



**Luís Filipe Fernandes dos Santos**

Licenciado em Engenharia Geológica

## **Calcretos no Alentejo - Contributo para a sua caracterização geotécnica**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Geológica

Orientadora : Ana Paula Fernandes da Silva, Prof<sup>a</sup>. Auxiliar,  
FCT-UNL

Co-orientadora : Sofia Maria Mesquita Soares, Prof<sup>a</sup>. Adjunta,  
ESTIG-IPBeja

Júri:

Presidente: Doutor Paulo do Carmo Sá Caetano, Prof. Auxiliar, FCT-UNL

Arguente: Doutor Pedro Calé da Cunha Lamas, Prof. Auxiliar, FCT-UNL

Vogais: Doutora Ana Paula Fernandes da Silva, Prof<sup>a</sup>. Auxiliar, FCT-UNL  
Doutora Sofia Maria Mesquita Soares, Prof<sup>a</sup>. Adjunta, ESTIG-  
IPBeja



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro, 2013**



## **Calcretos no Alentejo - Contributo para a sua caracterização geotécnica**

Copyright © Luís Filipe Fernandes dos Santos, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# Agradecimentos

- À Professora Ana Paula Silva, orientadora desta dissertação, por toda a amizade, empenho, dedicação, motivação e disponibilidade demonstrada.
- À Doutora Sofia Soares pela amizade, informação e documentação fornecida, assim como pelo apoio prestado na realização dos ensaios.
- Ao Professor Pedro Lamas pela amizade e ajuda no decorrer dos ensaios.
- À Engenheira Filomena Mendes pela ajuda prestada na realização dos ensaios de corte directo.
- Aos Professores Carlos Galhano e Joaquim Simão pela disponibilidade e fornecimento de material para a realização do ensaio de determinação do teor em carbonatos.
- Às Doutoras Aurora Bizarro e Anabela Oliveira e ao Mestre Joaquim Pombo pelo apoio prestado, e pela pronta realização dos ensaios de difracção de raios X em 6 amostras.
- Aos amigos e familiares pela motivação e apoio prestado ao longo de todo o meu percurso académico.



# Resumo

---

Os calcretos são depósitos importantes normalmente associados a climas semi-áridos, resultando, em regra, de carbonatação superficial devido ao contacto com água carbonatada estagnada e sua infiltração nas superfícies de fraqueza das rochas encaixantes. Existem, no entanto, exemplos de carbonatação associada a águas subterrâneas, onde a circulação interna de fluxos de água, eventualmente até associados a actividade hidrotermal tardia relacionada com a instalação de maciços ígneos, que conjugada com condições climáticas propícias, se evapora permitindo a precipitação de carbonato de cálcio e, nalguns casos, de magnésio.

O objectivo principal desta dissertação é contribuir para o conhecimento dos calcretos aflorantes na região junto a Beja, até agora pouco caracterizados, permitindo avaliar a sua eventual reutilização no âmbito de obras geotécnicas.

Neste contexto, foi efectuada uma revisão bibliográfica prévia e o respectivo enquadramento da área de estudo, entre a cidade de Beja e a localidade de Beringel, numa faixa limitada que acompanha o traçado do IP8, que foi objecto de um levantamento de terreno complementado pela recolha de amostras, umas remexidas e outras indeformadas (talhe de blocos), do material em referência. O estudo envolveu ainda uma caracterização em laboratório dessas amostras através de ensaios índice, químicos e mecânicos. Os resultados dos ensaios são analisados e é discutida a caracterização geotécnica preliminar dos calcretos amostrados. Finalmente, sintetizam-se as principais conclusões.

**Palavras-chave:** Calcretos, caliços, caracterização geotécnica, carbonato de cálcio, propriedades índice, propriedades mecânicas.

---



# Abstract

---

Calcretes are important deposits usually associated with semi-arid climates, generally resulting from superficial carbonation due to contact with stagnant carbonated water and its infiltration in the weakened surfaces of the host rocks. There are, however, examples of carbonation associated with groundwater flow, possibly linked to late hydrothermal activity associated with the installation of massive igneous rocks which, together with favourable climatic conditions, promotes evaporation and allows the precipitation of calcium and, in some cases, magnesium carbonates.

The main goal of this dissertation is to contribute to the knowledge of the calcretes that outcrop in the western region of Beja (South Portugal), poorly characterized up until now, in order to evaluate their possible reuse in the context of geotechnical works.

In this context, a previous literature review and the respective framework of the study area, between the city of Beja and the town of Beringel, in a limited strip that follows the path of the IP8 road, was made. Afterwards, a land survey of six sites was performed complemented by sampling of altered and undisturbed (cut block) samples. The study also involved a laboratory characterization of these samples through index, chemical and mechanic testing. The obtained results are analysed and the preliminary geotechnical characterization of the sampled calcretes is discussed. Finally, the main conclusions are summarized.

**Keywords:** Calcretes, caliche, geotechnical characterization, calcium carbonate, index properties, mechanical properties.

---



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Objectivo e metodologia . . . . .	1
1.2	Calcretos: Algumas considerações . . . . .	2
1.2.1	Caracterização geral . . . . .	2
1.2.2	Classificação . . . . .	3
1.2.3	Exemplos de ocorrências de calcretos . . . . .	4
1.2.4	Informação geotécnica de calcretos . . . . .	9
1.3	Organização da dissertação . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Caso de estudo: Calcretos na região a poente de Beja</b>	<b>11</b>
2.1	Enquadramento geográfico . . . . .	11
2.2	Enquadramento geomorfológico . . . . .	12
2.3	Enquadramento geológico . . . . .	12
2.3.1	Maciço Ibérico . . . . .	13
2.3.2	Zona de Ossa-Morena . . . . .	14
2.3.3	Complexo Ígneo de Beja . . . . .	16
2.3.4	Sequência Gabróica Bandada . . . . .	17
2.4	Clima . . . . .	19
2.5	Hidrogeologia . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Método experimental adoptado e alguns dos seus fundamentos</b>	<b>23</b>
3.0.1	Normas adoptadas . . . . .	32
3.1	Descrição e classificação de solos . . . . .	32
3.1.1	Classes granulométricas . . . . .	32
3.1.2	Granulometria por crivagem . . . . .	33
3.1.3	Granulometria por sedimentação . . . . .	34
3.1.4	Densidade das partículas . . . . .	34
3.1.5	Plasticidade . . . . .	34
3.1.6	Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS) . . . . .	37

3.1.7	Classificação de solos para fins rodoviários (AASHTO) . . . . .	40
3.2	Teor em carbonato de cálcio . . . . .	40
3.3	Difracção de raios X . . . . .	40
3.4	Resistência ao corte . . . . .	41
3.4.1	Critério de rotura . . . . .	41
3.4.2	Ensaio de corte directo . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Resultados da caracterização geotécnica</b>	<b>49</b>
4.1	Resultados Experimentais . . . . .	49
4.1.1	Teor em água . . . . .	49
4.1.2	Densidade das partículas . . . . .	50
4.1.3	Análise granulométrica . . . . .	50
4.1.4	Limites de consistência . . . . .	52
4.1.5	Teor em carbonatos . . . . .	52
4.1.6	Difracção de raios X . . . . .	53
4.1.7	Ensaio de corte directo . . . . .	56
4.2	Discussão . . . . .	58
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>63</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>67</b>
	<b>Anexos</b>	<b>73</b>
	<b>Anexo 1 - Determinação do teor em água</b>	
	<b>Anexo 2 - Determinação da densidade das partículas</b>	
	<b>Anexo 3 - Análise granulométrica</b>	
	<b>Anexo 4 - Determinação dos limites de consistência</b>	
	<b>Anexo 5 - Determinação do teor em carbonatos</b>	
	<b>Anexo 6 - Difracção de raios X</b>	
	<b>Anexo 7 - Ensaio de corte directo</b>	

# Lista de Figuras

1.1	Características morfológicas e pedológicas propícias ao desenvolvimento de calcretos . . . . .	3
1.2	Microestruturas de calcretos . . . . .	5
2.1	Localização das estações . . . . .	12
2.2	Mapa simplificado dos terrenos tectonoestratigráficos do Maciço Ibérico . . . . .	13
2.3	Mapa geológico esquemático da Zona de Ossa-Morena . . . . .	15
2.4	Mapa geológico do compartimento Oeste da Sequência Gabróica Bandada . . . . .	18
2.5	Colunas litológicas sintéticas para cada sector do compartimento Oeste da Sequência Gabróica Bandada e correlação inter-sectores . . . . .	19
2.6	Enquadramento geográfico do Sistema Aquífero dos Gabros de Beja . . . . .	21
2.7	Rede de drenagem do Sistema Aquífero dos Gabros de Beja . . . . .	22
3.1	Aspecto do talhe de amostragem em afloramento . . . . .	24
3.2	Aspecto geral de amostragem e mancha de calcretos da estação 1 . . . . .	26
3.3	Aspecto geral de amostragem e mancha de calcretos da estação 2 . . . . .	27
3.4	Aspecto geral de amostragem e mancha de calcretos da estação 3 . . . . .	28
3.5	Aspecto geral de amostragem e mancha de calcretos da estação 4 . . . . .	29
3.6	Aspecto geral de amostragem e mancha de calcretos da estação 5 . . . . .	30
3.7	Aspecto geral de amostragem e mancha de calcretos da estação 6 . . . . .	31
3.8	Obtenção do filamento cilíndrico de solo para determinação do limite de plasticidade durante o procedimento de ensaio . . . . .	35
3.9	Concha de Casagrande com amostra de solo . . . . .	36
3.10	Carta de Plasticidade de Casagrande . . . . .	36
3.11	Critério de rotura Mohr-Coulomb . . . . .	42
3.12	Envolvente de rotura e círculo de Mohr . . . . .	43
3.13	Esquema do aparelho de corte directo . . . . .	44
3.14	Obtenção da envolvente de rotura e dos parâmetros de resistência ao corte ( $c', \varphi'$ ) a partir de um ensaio de corte directo drenado . . . . .	45

3.15	Curvas de ensaios de corte drenado sobre amostras granulares de distinta densidade inicial . . . . .	47
3.16	Envolventes de rotura em função da densidade inicial da amostra . . . . .	47
4.1	Curvas granulométricas das amostras . . . . .	51
4.2	Difratogramas das amostras 1, 2 e 3 . . . . .	54
4.3	Difratogramas das amostras 4, 5 e 6 . . . . .	55
4.4	Gráfico $\tau$ vs. $\sigma$ para os ensaios de corte das amostras . . . . .	57
4.5	Proвете de solo submetido a corte . . . . .	60

# Lista de Tabelas

1.1	Resumo da percentagem dos principais minerais detectados por DRX dos calcretos de Adana, Turquia . . . . .	9
1.2	Resumo da gama de valores dos principais parâmetros geotécnicos definidos para os calcretos no NE do Quénia . . . . .	10
2.1	Precipitação total na região de Beja para os anos de 1960 a 2012 . . . . .	20
2.2	Temperatura média anual na região de Beja para os anos de 1960 a 2012 . . . . .	20
3.1	Localização das estações de recolha de amostras . . . . .	25
3.2	Algumas tendências de comportamento dos grupos da Classificação Unificada quando usados em obras de aterro . . . . .	39
3.3	Listagem de 7 registos classificados por d1 utilizando 1,54056 - CuKa1 para $2\theta$ . . . . .	41
3.4	Valores do ângulo de atrito de solos granulares não plásticos em função da granulometria e da compacidade . . . . .	48
4.1	Teores em água das amostras . . . . .	50
4.2	Densidade das partículas das amostras . . . . .	50
4.3	Percentagem das classes granulométricas para cada uma das amostras ensaiadas . . . . .	52
4.4	Limites de consistência obtidos . . . . .	52
4.5	Valores para o teor em carbonatos das amostras ensaiadas . . . . .	53
4.6	Semi-quantificação dos minerais identificados por DRX na fracção fina . . . . .	56
4.7	Resultado dos ensaios de corte directo . . . . .	57
4.8	Resultados dos ensaios realizados e classificação dos solos . . . . .	58
4.9	Algumas características dos solos classificados como SM e CL . . . . .	59
4.10	Comparação da percentagem dos principais minerais detectados por DRX das amostras ensaiadas com os calcretos da região de Adana, Turquia . . . . .	60

4.11	Comparação da gama de valores dos principais parâmetros geotécnicos definidos para os calcretos amostrados e os do NE do Quénia . . . . .	61
5.1	Resultado dos ensaios de corte directo . . . . .	65

# Abreviaturas, Siglas e Símbolos

$\delta v$	Deformação volumétrica
$\delta \varepsilon_v$	Deformação vertical
$\Delta H$	Deslocamento
$\Delta V$	Variação volumétrica
$\gamma$	Peso volúmico
$\lambda$	Comprimento de onda
$\sigma$	Tensão normal
$\tau$	Resistência ao corte do terreno
$\varphi$	Ângulo de atrito interno
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
c	Coesão
$C_c$	Coefficiente de Curvatura
$C_u$	Coefficiente de uniformidade
Ca	Cálcio
CIB	Complexo Ígneo de Beja
COBA	Complexo Ofiolítico de Beja-Acebuches
Cu	Cobre
DCT	Departamento de Ciências da Terra

DEC	Departamento de Engenharia Civil
DRX	Difracção de Raios X
e	Índice de vazios da amostra
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
Fe	Ferro
H	Altura da amostra
IH	Instituto Hidrográfico
IP	Índice de Plasticidade
IPB	Instituto Politécnico de Beja
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MI	Maciço Ibérico
N	Força normal
Ni	Níquel
NP	Norma Portuguesa
PIL	Procedimento Interno de Laboratório
S	Secção da amostra
SGB	Sequência Gabrónica Bandada
TF	Terreno Finisterra
TI	Terreno Ibérico
Ti	Titânio
TOS	Terreno Ofiolítico do SW Ibérico
TSP	Terreno Sul Português
u	Pressão intersticial
UNL	Universidade Nova de Lisboa
USDA	United States Department of Agriculture
V	Vanádio

w	Teor em água
$W_L$	Limite de Liquidez
$W_P$	Limite de Plasticidade
$W_R$	Limite de Retracção ou Consistência
ZAOL	Zona Astur-Occidental Leonesa
ZC	Zona Cantábrica
ZCI	Zona Centro-Ibérica
zcPTFA	Zona de cisalhamento Porto-Tomar-Ferreira do Alentejo
ZOM	Zona de Ossa-Morena
ZSP	Zona Sul-Portuguesa





# Introdução

## 1.1 Objectivo e metodologia

A presente dissertação, enquadrada no Mestrado em Engenharia Geológica (Geotecnia) da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Universidade Nova de Lisboa (UNL), tem como principal objectivo contribuir para a caracterização dos calcretos/calichos aflorantes na região a poente de Beja, até agora pouco conhecidos, adjacentes/interceptantes na actualmente designada Sequência Gabróica Bandada (SGB) do Complexo Ígneo de Beja (CIB). Assim, investigaram-se algumas propriedades físicas, químicas e mecânicas, permitindo avaliar preliminarmente as suas características geotécnicas, assim como contribuir para esclarecer a sua origem.

Para o efeito, e após análise bibliográfica, foram seleccionadas um conjunto de manchas de calcretos, numa faixa limitada que acompanha o traçado do IP8, essencialmente a poente de Beja, onde se efectuou amostragem por talhe de blocos e com colher do material em referência para uma caracterização física, química e mecânica preliminar. Após a identificação e acondicionamento das amostras, estas foram transportadas para laboratórios no Instituto Politécnico de Beja (IPB) e nos Departamentos de Ciências da Terra (DCT) e Engenharia Civil (DEC) da FCT-UNL onde, posteriormente, se realizaram os ensaios de caracterização. Com base nos resultados dos ensaios, nas observações de campo e na caracterização geotécnica avançaram-se algumas considerações relativas ao comportamento geotécnico previsível para os materiais testados.

## 1.2 Calcretos: Algumas considerações

Nesta secção serão abordadas, de uma forma sucinta e objectiva, características gerais do material em estudo tais como os processos de formação e deposição, sua classificação e distribuição. Finaliza-se a secção com uma síntese de alguns estudos geotécnicos efectuados em calcretos.

### 1.2.1 Caracterização geral

Calcreto é o termo geral dado à acumulação de carbonato de cálcio perto da superfície terrestre, que pode ocorrer de diversas formas, tais como laminar, maciça, pó ou nódulos (vénuas). Resulta da cimentação de carbonato de cálcio no solo, sedimentos ou rocha de uma dada região, na zona vadosa ou através de águas subterrâneas saturadas em carbonato de cálcio. Esta definição resulta de Goudie (1973) e Watts (1980) e modificada por Wright e Tucker (1991). O termo calço é um sinónimo usado especialmente nos Estados Unidos da América. Goudie (1973) fornece uma revisão detalhada da terminologia utilizada em vários países para este tipo de sedimento geoquímico. O termo calcreto é usado nos Estados Unidos para designar não só acumulações altamente duras e maciças, mas também não consolidadas (Nash e McLaren, 2007). Em Portugal o termo calço/caliche é utilizado para designar material mais desagregado, de baixa dureza; já a designação calcreto, refere-se a material cimentado, de maior dureza e mais próximo da rocha.

Quando o carbonato de cálcio se liga a um não-carbonato hóspede, a sua origem é claramente autigénica, mas também pode desenvolver-se em rochas carbonatadas, incluindo aquelas formadas nas margens de lagos, zonas húmidas sazonais e em águas subterrâneas, criando assim um espectro de relações complexas (Toledo e Andrews, 2001; Alonso-Zarza, 2003 *apud* Nash e McLaren, 2007).

Um erro comum é afirmar que os calcretos são pedogénicos na sua origem, apesar de o termo poder estar restrito a esse tipo de ocorrências, mas em alguns climas semi-áridos e áridos, com episódios de elevada precipitação concentrada, são originados grandes corpos de carbonato autigénico com muitas características em comum com calcretos pedogénicos. Estes são denominados calcretos de águas subterrâneas e podem exhibir relações complexas com formas pedogénicas e com alguns tipos de calcários palustres, como ilustra a Figura 1.1 (Nash e McLaren, 2007).

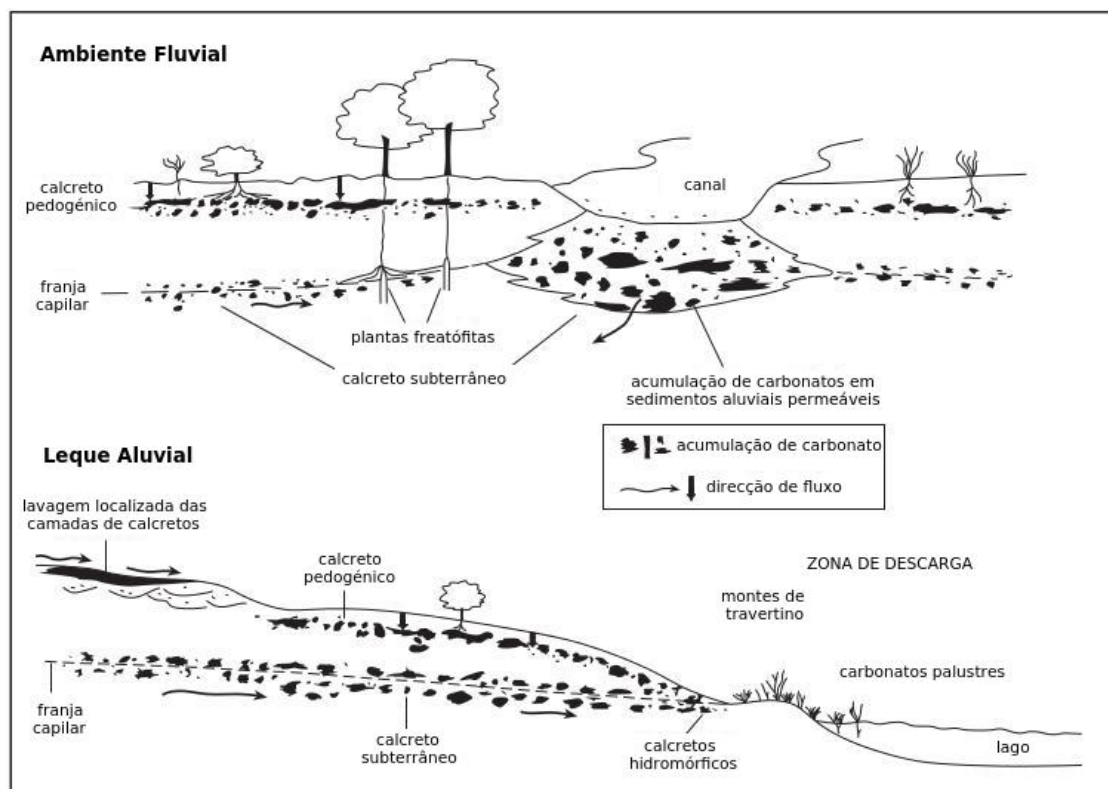


Figura 1.1: Características propícias ao desenvolvimento de calcretos (adaptado de Nash e McLaren, 2007)

### 1.2.2 Classificação

Existem várias formas de classificação de calcretos com base na sua morfologia, fases de desenvolvimento e microestrutura, porém é fundamental fazer a distinção entre calcretos que são formados dentro de perfis de solo, na zona vadosa, e aqueles originados por capilaridade ou em águas subterrâneas devido ao movimento lateral das mesmas (Figura 1.1), mormente em alguns casos de profundidade elevada (Carlisle, 1980, 1983 *apud* Nash e McLaren, 2007). O primeiro remete para a adição ou redistribuição de carbonato de cálcio associado a processos aluvionares, e os últimos são resultado de precipitação a partir da circulação de águas subterrâneas, às vezes muito evoluídas.

Os calcretos do tipo pedogénico foram os que receberam maior atenção por parte dos investigadores. Um tipo menos comum é caracterizado pela cimentação em canais e tem lugar onde águas, ricas em carbonato, se infiltram nos sedimentos do canal, levando à obstrução da camada de sedimentos por cimento carbonatado e à produção de camadas laminares (Mack *et al.*, 2000).

Estes calcretos pedogénicos desenvolvem-se dentro de perfis de solo e podem constituir horizontes de solo cálcicos (horizontes de cálcio ou horizontes de potássio, segundo Gile *et al.*, 1965 adaptado de Nash e McLaren, 2007) ou até mesmo sub-perfis dentro de um perfil. Os tipos de horizontes que se desenvolvem segundo estes sub-perfis têm sido usados como base para a identificação de cronossequências (Nash e McLaren, 2007).

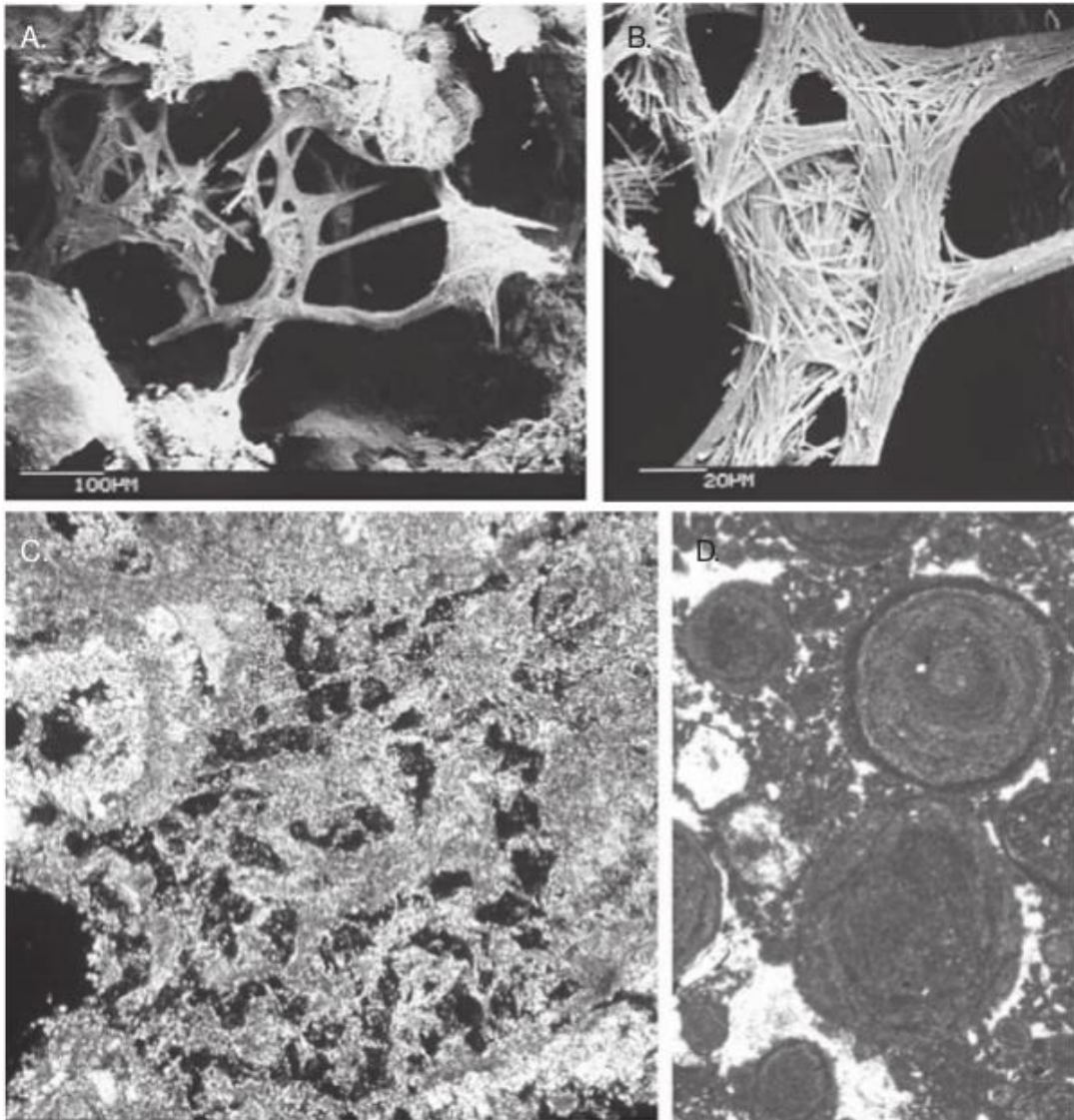
### 1.2.3 Exemplos de ocorrências de calcretos

Yaalon (1988) estimou que solos com cálcio ou horizontes petrocálcicos (horizontes de cálcio, contínuos, cimentados por carbonato cálcico e, às vezes, de carbonato magnésico) cobrem  $20 \times 10^6 \text{ km}^2$ , ou cerca de 13 % da superfície terrestre. A distribuição real de calcretos provenientes de águas de natureza subterrânea não é totalmente conhecida, mas certamente cobrem muitas dezenas, se não centenas, de milhares de quilômetros quadrados na Austrália. No registo estratigráfico, os calcretos pedogénicos são muito comuns em sucessões *red-bed*, com formações individuais contendo muitas dezenas, ou mesmo centenas, de paleossolos de calcretos. Muitas superfícies marinhas de sucessões carbonatadas, são importantes sequências estratigráficas que contêm frequentemente um grande número de horizontes de calcretos (Wright, 1994). Os calcretos de águas subterrâneas antigas também estão cada vez mais identificados (Colson e Cojan, 1996).

Os horizontes cálcicos desenvolvem-se em solos onde há um défice de humidade, já que o carbonato produzido em épocas mais secas não é lixiviado como durante uma época mais pluviosa. Os calcretos actuais surgem em áreas com clima temperado a quente (temperatura média anual de  $16^\circ \text{ C}$ ) e chuvas sazonais (100-500 mm) (Goudie, 1983), podendo atingir o auge quando a pluviosidade se enquadra entre 600 e 1000 mm (Mack e James, 1994). Royer (1999), a partir de 1481 estudos, concluiu que a concentração do carbonato em solos se correlaciona com uma precipitação média anual inferior a 760 mm. A maioria dos dados foram recolhidos na parte ocidental dos Estados Unidos da América e, como Retallack (2000) adverte, há grande variabilidade nos níveis de precipitação associados à fronteira entre solos calcários e não calcários em diferentes partes do mundo, ou mesmo como Birkeland (1999) assinala, são acentuadas variações locais na parte ocidental dos Estados Unidos.

Foram feitas várias tentativas para usar as profundidades em que os carbonatos se acumulam para estimar a precipitação anual (Retallack, 1994). No entanto, a existência de uma forte correlação entre precipitação anual e a espessura do horizonte de carbonato foi questionada por Royer (1999).

Factores locais como a chuva, drenagem e permeabilidade são claramente importantes. Isto é exemplificado pela ocorrência notável de uma espessura de 4 m de carbonatos cimentados do Holocénico, numa zona com abundantes raízes, relacionados com texturas calcréticas (Figura 1.2 A, B), hospedadas num cascalho glacial do Plistocénico, em North Yorkshire (Reino Unido), dificilmente descrita como uma região semi-árida (Strong *et al.*, 1992); estes cascalhos altamente porosos, ricos em carbonato, ocorrem muitos metros acima do lençol freático local, com drenagem livre e rápida, promovendo uma elevada evapotranspiração.



(A) Micrografia captada através de microscópio electrónico da textura alveolar de um cascalho do Holocénico em North Yorkshire, Reino Unido; (B) Ampliação do centro da imagem em (A), que mostra as fibras em agulha de calcite; (C) Tecidos do septo alveolar de solo Holocénico, em La Mora, Tarragona, Nordeste de Espanha, mostrando septos de calcite feitos de fibras em agulha alinhadas num molde de raiz. O campo de visão é de 2 mm de largura; (D) Oóides de Calcretos em Carlsbad, Novo México. O campo de visão é de 2 mm de largura.

Figura 1.2: Microestruturas de calcretos (adaptado de Nash e McLaren, 2007)

Os calcretos são também encontrados em áreas de deserto frias. Actualmente, foram identificadas crostas de carbonatos em regiões árticas (Bunting e Christensen, 1980; Lauriol e Clarke, 1999). Vogt e Del Valle (1994) e Vogt e Corte (1996) identificam calcretos do Plistocénico de períodos áridos frios em várias regiões. Candy (2002) descreveu calcretos rizogénicos de depósitos da fase glacial durante o Angliano, há 450 000 anos, em Norfolk, Reino Unido, provavelmente reflectindo um período de melhoria climática.

### 1.2.3.1 Desenvolvimento de calcretos nos sistemas de carbonatos coluvionares do mediterrâneo, Sudoeste de Espanha

Bedmar é uma província de Jaén, localizada a SE de Espanha, onde ocorrem perfis de calcretos em depósitos aluvionares e coluvionares, cobrindo muitos taludes na zona da Cordilheira Bética.

Como referido, o desenvolvimento de calcretos resulta de interacções entre o crescimento de raízes de plantas, disponibilidade de água e os processos de erosão e sedimentação que ocorrem na superfície das unidades coluvionares. A formação de todos os horizontes desses perfis de calcretos terá sido provavelmente o resultado de um processo específico predominante durante a formação de um solo pouco desenvolvido numa encosta.

A presença de fibras em agulha calcílicas foi identificada nos materiais estudados como um componente dos perfis de calcretos, bem como formas estalagmíticas sob clastos carbonatados dos depósitos coluvionares. Trabalhos anteriores (Klappa, 1979; Phillips et al, 1987; Goudie, 1996 *apud* Jiménez e Jiménez, 2003) têm apontado para que as fibras encontradas nos horizontes relacionados com o solo sejam, principalmente, filamentos calcificados. A maioria dos estudos considera que estes têm origem biológica, correspondendo a filamentos de fungos calcificados.

Nos perfis de calcretos, as morfologias cristalinas observadas apresentam ramificações em forma de "Y", bem como a morfologia dos filamentos não calcificados indicam uma origem fúngica. Esta actividade microbiana poderá estar relacionada com a acção das raízes das plantas que tem sido revelada pela existência de poros tubiformes e fissuras em alguns horizontes. A presença adicional de grãos revestidos, estruturas septais alveolares e pelóides também sugere que a maior parte do carbonato foi acumulado no solo com uma aceleração induzida pela actividade microbiana relacionada com raízes de plantas. Foi sugerida uma origem orgânica para a maioria das partículas redondas com calcite micrítica (Goudie, 1996 *apud* Jiménez e Jiménez, 2003). Uma grande parte dos pelóides ovóides descritos na literatura sobre calcretos (Harris, 1977; Calvet e Julia, 1983; Wright, 1983 *apud* Jiménez e Jiménez, 2003) são considerados como tendo uma origem fecal, enquanto a formação de envelopes micríticos parece ser controlada pela actividade micro-biogénica de organismos, especialmente de filamentos de fungos (Calvet e Julia, 1983; Alonso-Zarza et al, 1998 *apud* Jiménez e Jiménez, 2003).

Portanto e de acordo com Wright e Tucker (1991), a origem destes calcretos seria biogénica. Por outro lado, a ausência destas características nas formas estalagmíticas, oriundas de fibras calcíticas e desenvolvidas sob a parte inferior dos clastos dos depósitos coluvionares, não dentro dos perfis de calcretos, mas nos perfis de solos, sugere que esta calcite se formou por precipitação inorgânica, na sequência de percolação de soluções ricas em carbonato através dos materiais cascalhentos.

Assim, a aceleração da precipitação de carbonato por influência biogénica foi o principal factor de controlo do desenvolvimento de calcretos na região. No entanto, esta actividade biológica estava afectada por diferentes variáveis que determinaram a extensão dos perfis de calcretos e a formação dos diferentes horizontes observados.

A continuidade lateral restrita dos horizontes pode ser interpretada como resultante da combinação dos efeitos da topografia e da disponibilidade de água. Assim, admite-se que o substrato do coluvião deve ser caracterizada pela presença de declives mais suaves, onde se teriam desenvolvido pequenas zonas de acumulação de água sob os cascalhos, sobre os sedimentos mais finos.

A disponibilidade de água fornecer a humidade necessária ao solo que favorece a sua rápida colonização por plantas. A actividade das raízes acelerou o processo de precipitação de carbonato em águas saturadas em dióxido de carbono, ocorrendo também em níveis estratigráficos sem influências orgânicas. Este processo de endurecimento do horizonte pode produzir horizontes de cascalhos cimentados em zonas de fraco declive.

A formação de cascalhos cimentados desempenha um papel importante no desenvolvimento dos horizontes de calcretos sobrepostos. Considera-se que este horizonte actuou como uma barreira para a percolação de água, permitindo a presença de lençóis freáticos no horizonte do solo mais evoluído acima deste. A dificuldade de penetração no horizonte de cascalho cimentado favoreceu o crescimento horizontal das raízes das plantas. Estas condições favoreceram a precipitação de carbonato micrítico segundo a extensão lateral das raízes das plantas. O resultado foi o deslocamento do material do solo que dá origem à formação de um nível microlaminar. A espessura deste horizonte é controlada espacial e temporalmente através da rede de raízes sub-horizontal.

A formação de novos depósitos coluvionares poderia impedir o desenvolvimento do horizonte microlaminar, gerando espaço adicional disponível para a formação de um novo perfil de solo. Assim, a parte superior de granulometria fina do solo poderia ser colonizada pelo novo sistema radicular, permitindo a formação de pelóides e grãos revestidos cuja acumulação originou o horizonte calcário observado.

A presença de calcretos no registo estratigráfico foi considerada para marcar períodos de aridez relativa. No entanto, o estudo de Khadkikar et al. (2000) revela que os calcretos podem ser classificadas ainda tendo em conta as suas associações mineralógicas. Neste caso, a ausência de paligorskite-sepiolite e a presença de esmectite e hematite associada à calcite e magnésio baixos indicam que os calcretos estudados foram desenvolvidos sob um clima semi-árido (média de precipitação anual entre 100 e 500 mm) semelhante

ao actual clima desta região do SE de Espanha. A formação de hematite exigiria humidade suficiente para permitir uma actividade de meteorização química baixa de minerais primários e de água que iria impulsionar a desidratação. Usando argumentos termodinâmicos, Schmalz (1968) demonstra que a hematite não pode ser formada na presença de água líquida.

A cristalização de hematite exige temperaturas muito altas, em que a actividade da água é consideravelmente reduzida. Além disso, a sepiolite e palygorskite ocorrem normalmente em solos secos, em clima árido, com média de precipitação anual entre 50-100 mm (Verrecchia e Verrecchia, 1994; Singer et al, 1995 *apud* Jiménez e Jiménez, 2003).

O desenvolvimento de calcretos e a sedimentação dos depósitos coluvionares podem ter sido influenciados pela mudança do clima ou mudanças nas condições locais do talude. A mineralogia da fracção de argila da sequência coluvionar não sugere mudanças importantes no regime climático antes e após o período de formação de calcretos. No entanto, a associação do sistema coluvionar com superfícies de falhas alinhadas aproximadamente a NW-SE sugerem a existência de fenómenos tectónicos, erosão e sedimentação, afectando a estabilidade de taludes contemporâneos dos calcretos. A calchificação terá ocorrido em períodos de menor actividade tectónica, dado que a formação de calcretos seria inibida pela activação da sedimentação de materiais coluvionares, em consequência da actividade tectónica e instabilização de taludes. A gradação dos depósitos coluvionares estaria relacionada com a actividade tectónica, que induziria a erosão da formação superior e o inerente depósito coluvionar. A colonização de plantas à superfície do depósito coluvionar levou à formação de calcretos e é provável que tenha ocorrido em condições relativamente estáveis. Este período de estabilidade foi seguido por um novo período de deposição de cascalho, representando possivelmente o acréscimo de erosão e transporte de sedimentos devido à instabilização da encosta, formando-se a parte superior da unidade coluvionar (Jiménez e Jiménez, 2003).

### 1.2.3.2 Calcários do Cano-Casa Branca, Avis

A região de Avis localiza-se no Alentejo, no limite oriental da Bacia do Baixo Tejo. Ali afloram os calcários do Cano-Casa Branca, que são constituídos por calcários e calcretos desenvolvidos na Formação do Vale de Guizo (Paleogénico-Miocénico inferior).

A génese dos calcários do Cano-Casa Branca corresponde, na generalidade, a processos pós-deposicionais de natureza pedológica. Exceptuam-se algumas bancadas calcárias que podem ter origem lacustre ainda que também estejam afectadas por pedogénese. O nível hidrostático muito perto da superfície, mesmo no Verão, sugere que o desenvolvimento dos calcretos resultou de fenómenos de ascensão de águas subterrâneas, ricas de carbonatos, por capilaridade e evaporação superficial sob clima com estação seca bem marcada. Alguns calcários também se podem ter gerado por precipitação a partir de águas carbonatadas em pequenos lagos (origem lacustre). Os calcretos desenvolveram-se, sobretudo, na Formação de Vale de Guizo, mas também existem directamente sobre

os xistos paleozóicos.

De referir que, intercalado em níveis de calcretos, ocorrem na Horta do Cardoso (W-NW de Casa Branca), margas muito ricas de pisólitos ferruginosos que devem ter resultado de processos de lixiviação intensa sob clima quente com estações alternantes muito húmidas e secas. Depois da geração destes pisólitos voltou a haver condições para a formação de novos calcretos que os incorporaram.

A calichificação na zona de Avis ocorre sobre as rochas do Paleozóico e sobre os sedimentos paleogénicos e miocénicos, além de acompanhar a superfície topográfica. Contudo, parece óbvio, que grande parte do desenvolvimento dos carbonatos foi originado anteriormente à incisão da rede de drenagem actual.

O aparecimento de diferentes gerações de conglomerados calcários com cimento carbonato, e a ocorrência de várias gerações de pisólitos ferruginosos sugerem diversos episódios de carbonatação. A intercalação de bancadas calcárias e a calichificação das rochas paleozóicas sugere carbonatação também subterrânea. Deste modo, parecem haver episódios de carbonatação em três períodos distintos. Um primeiro episódio após, ou em simultâneo, à deposição da Formação do Vale do Guizo (Paleogénico-Miocénio inferior); um segundo, após a deposição da Formação de Tomar (Miocénico superior) e outro ulterior, provavelmente no Quaternário, que antecede a incisão fluvial e que se pode prolongar até a actualidade (Dias *et al.*, 2006).

#### 1.2.4 Informação geotécnica de calcretos

Existem alguns estudos geotécnicos que incluem a caracterização de calcretos/calichos. Apresentam-se seguidamente aqueles em que se efectuaram ensaios de amostras de solos.

Dois estudos foram levados a cabo por Dinçer *et al.* (2008) e Cobanoğlu *et al.* (2008) com o intuito de desenvolver e avaliar modelos estatísticos usando propriedades índice e físicas, e identificar as propriedades microestruturais e geotécnicas que controlam o comportamento geomecânico dos depósitos de calcretos, uns pedogénicos e outros epigénicos, na região de Adana, Turquia. A geologia da região consiste em depósitos de aluviões recentes, calcretos, depósitos de terraços fluviais Quaternários e uma formação silto-argilosa do Miocénico-Pliocénico. Os resultados dos ensaios estão resumidos na Tabela 1.1 que incluem difracção de raios X (DRX) para os calichos desta região.

Tabela 1.1: Resumo da percentagem dos principais minerais detectados por DRX dos calcretos de Adana, Turquia (adaptado de Dinçer *et al.*, 2008 e Cobanoğlu *et al.*, 2008)

<b>% calcite</b>	96,80 a 98,70
<b>% quartzo</b>	1,30 a 2,40

No Sudoeste do Quénia, foi efectuado um estudo geotécnico por Godana, H. *et al.*

(2010) em que o principal objectivo foi identificar as propriedades dos calcretos relacionando-os com a sua trabalhabilidade como material de construção para estradas. Os autores não referem a sua origem, pressupondo-se provirem da circulação de águas subterrâneas. Foram ensaiados materiais de seis locais distintos e a Tabela 1.2 apresenta os principais resultados para as localidades de El Rage e Kargi.

Tabela 1.2: Resumo da gama de valores dos principais parâmetros geotécnicos definidos para os calcretos no NE do Quénia (adaptado de Godana, H. *et al.*, 2010)

	% passada no crivo de malha			$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	W <sub>L</sub>	IP	Class. AASHTO	% carbonatos
	2 mm	0,425 mm	0,075 mm					
<b>El Rage</b>	43	16	13	26	73	36	A-2-7	35
<b>Kargi</b>	42	30	21	27	54	26	A-2-7	30

### 1.3 Organização da dissertação

Para além do capítulo introdutório, esta dissertação está organizada em mais quatro capítulos.

O segundo capítulo apresenta um enquadramento geomorfológico, geológico, climático e hidrogeológico da região onde afloram os calcretos em análise.

No terceiro capítulo pretende-se descrever a amostragem realizada e os ensaios efectuados, com referência para as normas adoptadas na realização dos mesmos e apresentando alguns valores característicos do tipo de material ensaiado.

O quarto capítulo exprime os resultados obtidos nos ensaios realizados e tecem-se algumas considerações.

Por fim, o quinto capítulo é dedicado às conclusões.

As fontes consultadas incluem o capítulo de referências bibliográficas, a que se sucede um conjunto de anexos de ensaios efectuados no decorrer da dissertação.



## **Caso de estudo: Calcretos na região a poente de Beja**

No presente capítulo pretende-se enquadrar a zona de estudo no contexto geográfico, morfológico e hidrogeológico nacional. É efectuada uma descrição das unidades geológicas em que se inserem os calcretos da região a poente de Beja, partindo de um contexto geral para um particular.

São também apresentadas e discutidas situações propícias ao surgimento do material analisado.

### **2.1 Enquadramento geográfico**

Na região de Beja foram encontradas recentemente no desenrolar de diversas obras (nomeadamente, estações elevatórias, canais de adução e barragens) integradas no Aproveitamento Hidroeléctrico do Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva, várias manchas de calcretos que não se encontravam cartografadas nas cartas geológicas, nem tinham sido caracterizadas no âmbito dos respectivos estudos geotécnicos e cujo conhecimento relativo ao seu comportamento era muito limitado.

Assim, e na sequência de estudos efectuados por Soares (2012), foram seleccionadas, entre a cidade de Beja e a localidade de Beringel, a poente, seis dessas áreas de calcretos para recolha de amostras, numa faixa limitada que acompanha o traçado do IP8, como pode ser observado na Figura 2.1.



Figura 2.1: Localização das estações (adaptado de Google Maps, 2013)

## 2.2 Enquadramento geomorfológico

Do ponto de vista geomorfológico o território continental português não apresenta relevos acentuados, predominando as áreas de baixa altitude. Mais de 70 % da área do país atinge altitudes inferiores a 400 m, sendo que relevos de altitude superior a 700 m constituem apenas 12 % do território (Ferreira, 2000).

O sector meridional do território nacional caracteriza-se por relevos aplanados de cotas pouco elevadas e extensas depressões. A designada peneplanície do Baixo Alentejo, originada por diferentes fases de nivelamento por erosão a partir do Paleogénico, é uma extensa aplanação de cota média a cerca de 200 m e constitui a unidade geomorfológica fundamental da região meridional do país (Feio, 1952). Pontualmente ocorrem alguns relevos mais acentuados que são, no entanto, pouco abundantes e espaçados, como são exemplo as serras de Grândola e Cercal. Estas estruturas positivas correspondem a levantamentos monoclinais para Oeste, definindo um maciço alongado na direcção N-S com cerca de 60 km de extensão e marginando a planície litoral ocidental (Feio, 1984).

## 2.3 Enquadramento geológico

A geração dos calcários terá sido distribuída no tempo, com episódios de carbonatação no Paleogénico, no Miocénico superior e no Quaternário, podendo prolongar-se a sua génese até a actualidade (Dias *et al.*, 2006).

Na zona em estudo, as formações predominantes são rochas básicas gabro-dioríticas, cobrindo uma área de cerca de 350 km<sup>2</sup>. Próximo da superfície, como resultado directo de clima árido e seco, ocorrem calcretos, devido à mobilização e reprecipitação de Ca<sup>2+</sup> na solução (Paralta, 1998 *apud* Rocha *et al.*, 2003).

### 2.3.1 Maciço Ibérico

O Maciço Ibérico (MI) aflora na parte ocidental da Península Ibérica (Figura 2.2). Corresponde ao troço mais ocidental da Cadeia Varisca europeia, de orientação geral NW-SE com a qual se relaciona através do designado Arco Ibero-Armoricano (Ribeiro, 2013). Este extenso afloramento de formações pré-câmblicas e paleozóicas ocupa grande parte da metade ocidental da Península Ibérica e cerca de dois terços do território continental português (Ribeiro *et al.*, 1990; Estêvão, 2010). Actualmente na divisão do MI são consideradas duas séries de unidades, de 1ª ordem e de 2ª ordem respectivamente (Ribeiro e Sanderson, 1996; Vera, 2004 e Ribeiro *et al.*, 2007 *apud* Ribeiro, 2013). As unidades de 2ª ordem, designadas por Zonas, definem unidades diferenciadas por critérios estratigráficos, magmáticos, metamórficos e morfoestruturais. São, de N para S: Zona Cantábrica (ZC); Zona Astur-Occidental Leonesa (ZAOL); Zona Ossa-Morena (ZOM); Zona Sul Portuguesa (ZSP). As unidades de 1ª ordem, designadas por Terrenos, apresentam semelhante evolução geodinâmica e são separadas pelos acidentes tectónicos que representam as principais linhas de sutura (Coney *et al.*, 1980 *apud* Pedro, 2004).

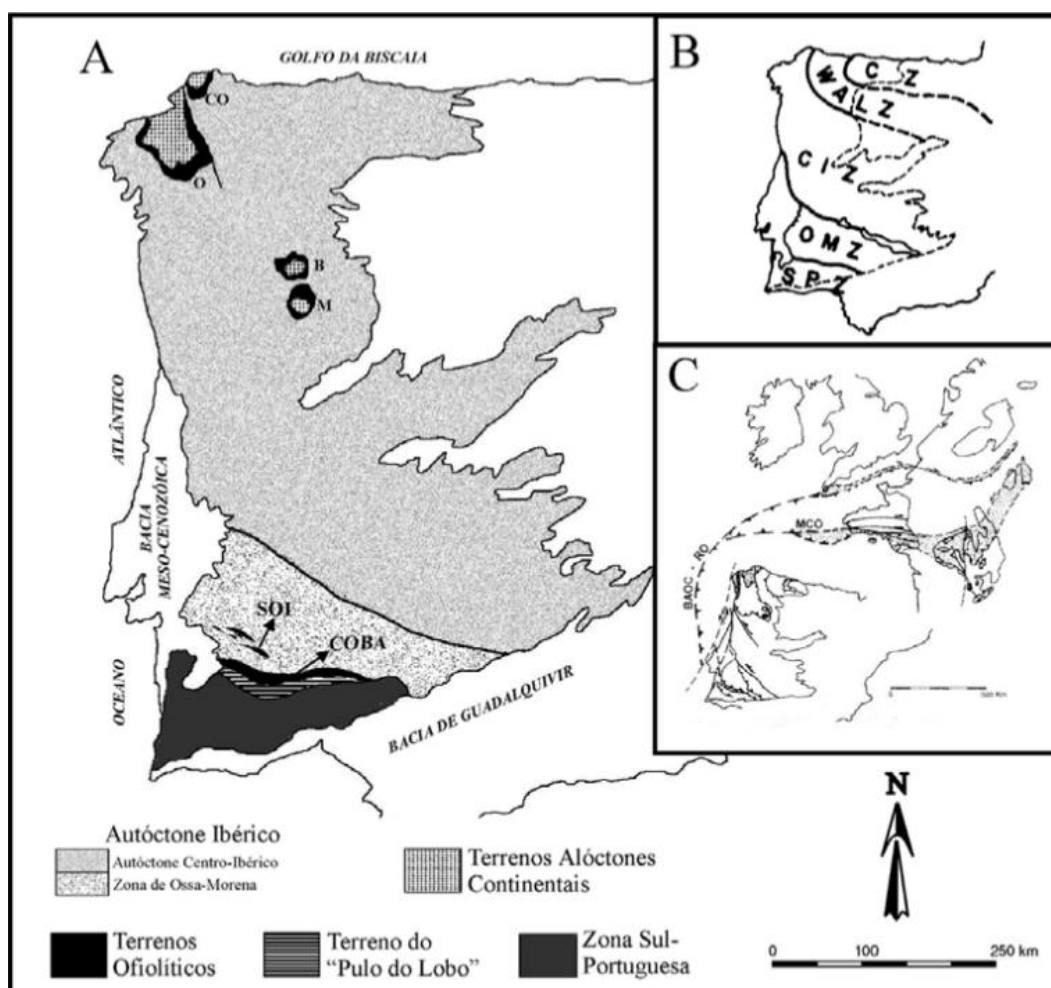


Figura 2.2: Mapa simplificado dos terrenos tectonoestratigráficos do Maciço Ibérico (adaptado de Pedro *et al.*, 2005)

A divisão por terrenos, segundo diversos autores (Ribeiro e Sanderson, 1996; Vera, 2004 e Ribeiro *et al.*, 2007 *apud* Ribeiro, 2013) inclui:

1. Terreno Ibérico (TI) autóctone, composto pelas ZC, ZAOL, ZCI e ZOM;
2. Terreno Sul Português (TSP), correspondente à ZSP;
3. Terrenos Exóticos, carreados sobre os anteriores, que incluem:
  - 3.1 Terrenos alóctones do NW peninsular;
  - 3.2 Terreno Ofiolítico do SW Ibérico (TOS), constituído por mantos alóctones, de onde se destaca o Complexo Ofiolítico de Beja - Acebuches (COBA) na sutura entre a ZOM e a ZSP (Munhá *et al.*, 1986 e Quesada *et al.*, 1994 *apud* Pedro, 2004);
  - 3.3 Terreno Finisterra (TF), a Oeste da zona de cisalhamento Porto-Tomar-Ferreira do Alentejo (zcPTFA), que corresponde a uma provável borda da ZOM (Ribeiro, 2013).

### 2.3.2 Zona de Ossa-Morena

A ZOM contacta, a Norte, com a Zona Centro-Ibérica e, a Sul, com a ZSP (Figura 2.3). Segundo Quesada (1990) podem definir-se os seguintes limites geológicos para esta zona:

- A Nordeste: Falha de Portalegre, a Oeste, e batólito de Pedroches, a Este;
- A Sudeste: Cobertura terciária do vale do Guadalquivir;
- A Sul: Cavalgamento de Ficalho-Almonaster;
- A Oeste: Sistema de desligamentos de Porto-Tomar.

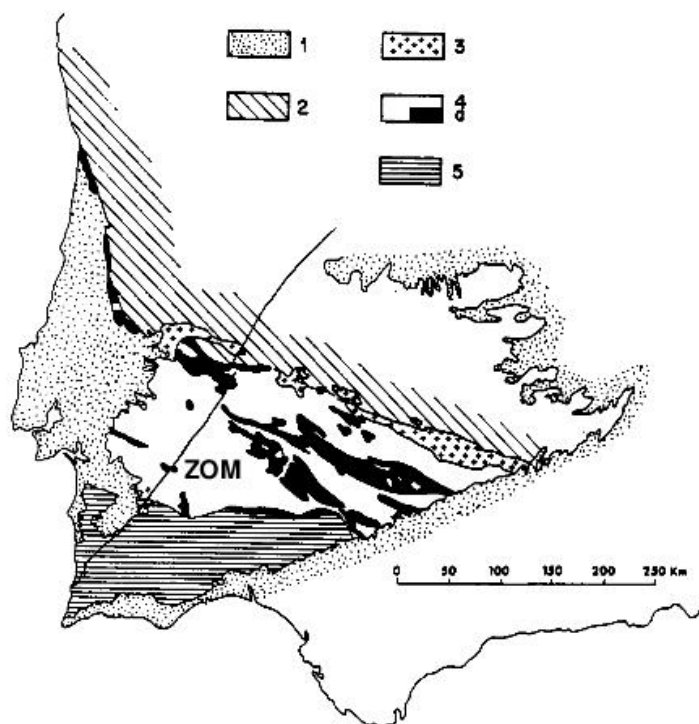
Tanto na parte setentrional como na meridional da ZOM, individualizam-se dois domínios onde ocorrem rochas ígneas básicas com afinidades oceânicas: a Faixa Blastomilonítica de Tomar-Badajoz-Córdova, a Norte, e o COBA, a Sul.

Na generalidade dos trabalhos, o COBA é considerado uma sutura de idade varisca (Munhá *et al.*, 1986; Ribeiro *et al.*, 1990 *apud* Antunes, 2006).

A ZOM é um sector extremamente heterogéneo do ponto de vista paleogeográfico, metamórfico e tectónico. Apresenta uma estrutura interna complexa resultante da justaposição de unidades tectonoestratigráficas com características distintas. Como consequência desta heterogeneidade, é possível subdividir a ZOM em vários domínios e sub-domínios.

Segundo Quesada (1990) e Ribeiro *et al.* (1979, 1990), os aspectos mais distintivos da ZOM são:

- Ocorrência de um Precâmbrico polimetamórfico, documentando a acção de um ciclo orogénico do final do Precâmbrico (orogenia Cadomiana ou Pan-Africana);



1 – Cobertura recente; 2 – Zona Centro-Ibérica; 3 – Batólito de Pedroches; 4 – Zona de Ossa-Morena (a - ocorrências precâmblicas); 5 – Zona Sul-Portuguesa.

Figura 2.3: Mapa geológico esquemático da Zona de Ossa-Morena (adaptado de Pedro, 2004)

- Presença de uma sucessão paleozóica completa desde o Câmbrio bem datado ao Carbónico;
- Existência de cinturas metamórficas e magmáticas bem definidas, alongadas segundo a direcção NW-SE.

Quesada (1990a) e Quesada *et al.* (1990) subdividem o ciclo precâmbrico da ZOM em dois estádios: pré-orogénico e sinorogénico *sensu lato*. No ciclo Paleozóico, distinguem três fases principais:

1. Fase de rifting continental,
2. Fase de margem passiva;
3. Fase sinorogénica (Antunes, 2006).

Junto ao bordo SW da ZOM individualizam-se o Complexo Ígneo de Beja (CIB) e o Domínio de Évora-Beja. O CIB instala-se ao longo do bordo SW da ZOM (Fonseca, 1995 *apud* Pedro, 2004) entre o Devónico médio-superior e o Carbónico, mais precisamente entre o Givetiano-Frasniano e o Tournaciano-Viseano (Conde e Andrade, 1974; Santos *et al.*, 1987; Dallmeyer *et al.*, 1993 *apud* Pedro, 2004). É constituído por diferentes maciços de rochas intrusivas, geneticamente relacionados com a subducção varisca entre a ZOM e a

ZSP, aos quais se associam espacialmente episódios de actividade vulcânica (Andrade *et al.*, 1991, 1992 *apud* Pedro, 2004)

Deste modo, é aceitável admitir-se que esta geometria foi fortemente influenciada por zonas de falhas pré-existentes, delimitando bacias intra-continentais de extensão e profundidade variáveis (Oliveira *et al.*, 1991; Quesada, 1991, Eguíluz *et al.*, 2000; Silva e Pereira, 2004; Pereira *et al.*, 2006 *apud* Almeida, 2010). Localmente, estes contactos tectónicos são representados por zonas de falha de desligamento com orientações preferenciais NNE-SSW e NE-SW, como é o caso da falha Odemira-Ávila, vulgarmente designada de Messejana, e orientações ENE-WSW, como é o caso da falha Ficalho-Aroche (Almeida, 2010).

A falha da Messejana, a mais extensa da Península Ibérica, intersecta o território continental Português com orientação NE-SW e estende-se, por uma distância de 500 km, desde a plataforma continental ao largo de Odemira, em Portugal, até Ávila, em Espanha. É considerada como activa, com base quer em evidências estratigráficas e geomorfológicas de movimento durante o Pliocénico, no troço entre Odemira e Aljustrel, com rejeitos da ordem da meia centena de metros (Silva, 2010), quer em registos sísmicos recentes..

### 2.3.3 Complexo Ígneo de Beja

O CIB estende-se ao longo do bordo SW da ZOM, entre Vendas Novas e Serpa, determinando o essencial da geologia do domínio Sul do Sector Évora-Beja-Aracena (Carvalho *et al.*, 1971; Oliveira *et al.*, 1991; Araújo *et al.*, 2006 *apud* Mateus *et al.*, 2010). Este Complexo inclui um vasto conjunto de rochas intrusivas, hipabissais e vulcânicas que hospedam diferentes sistemas mineralizantes, parte integrante da Faixa Mineira de S. Cristóvão - Beja - Serpa (Silva, 1948; Thadeu, 1965; Carvalho, 1972; Schermerhorn, 1981; Oliveira, 1986; Martins *et al.*, 1998; Mateus *et al.*, 2008 *apud* Mateus *et al.*, 2010).

Como consequência das sucessivas revisões petrográficas e cartográficas empreendidas nas últimas décadas, é possível subdividir o CIB em três unidades principais (Andrade, 1976, 1981, 1983, 1984; Andrade *et al.*, 1976; Santos, 1990; Santos *et al.*, 1990; Jesus *et al.*, 2006, 2007 *apud* Mateus *et al.*, 2010):

1. Sequência Gabróica Bandada (SGB), abarcando vários tipos de gabros heterogeneamente bordejados por rochas dioríticas;
2. Complexo Cuba-Alvito, essencialmente constituído por (grano-)dioritos e raros domínios gabróicos;
3. Complexo de Pórfiros de Baleizão, envolvendo diversos tipos de granitóides. Importa referir que as unidades tectonicamente desmembradas atribuíveis ao COBA (Munhá *et al.*, 1986; Fonseca e Ribeiro, 1993; Quesada *et al.*, 1994 *apud* Mateus *et al.*, 2010) foram, durante muito tempo, consideradas parte integrante da SGB (Andrade, 1972, 1977, 1978, 1979, 1981; Andrade *et al.*, 1976; Andrade e Ferreira Pinto, 1982 *apud* Mateus *et al.*, 2010).

### 2.3.4 Sequência Gabróica Bandada

É a esta unidade que estão associados os calcretos em análise. Os primeiros estudos sobre o então denominado Complexo Gabro-Diorítico do Maciço de Beja debruçaram-se sobre as características petrográficas e mineralógicas apresentadas por rochas em afloramentos chave, salientando-se os trabalhos devidos a Braga (1933), Santos Pereira (1949), Assunção e Brak-Lamy (1950), Rocha e Pissarra (1959), Silva *et al.*, (1970) e Batista *et al.* (1976). O bandado magmático, marcado pela ritmicidade de diferentes litologias cumuladas (*rhythmic layering*) e associado à possível presença de variações composicionais sistêmicas dos seus minerais constituintes (*cryptic layering*), foi colocado em evidência pela primeira vez por Silva *et al.* (1970). Com base em observações maioritariamente na região de Odivelas, Andrade (1976, 1983, 1984) propôs uma zonação interna para os Gabros de Beja, mais tarde retomada por Santos (1990) e Santos *et al.* (1990). Nesta zonação, o domínio inferior da intrusão (Gabros Inferiores ou Unidade Od-1 – Andrade, 1983; Andrade e Oliveira, 1983) incluía grande parte da mancha aflorante da janela da cobertura Cenozóica em Odivelas, Soberanas e Castelo Ventoso, bem como toda a porção da sequência reconhecida entre Ferreira do Alentejo e Serpa. O domínio superior da intrusão (Gabros Superiores ou Unidade Od-2 – Andrade, 1983; Andrade e Oliveira, 1983), dispendo-se a NE dos gabros inferiores, distinguia-se pela presença de gabros anfibólicos, dando lugar a NE aos dioritos marginais (denominados Dioritos do Olival) (Mateus *et al.*, 2010).

À SGB associam-se três tipos de mineralização:

1. Acumulações maciças de óxidos de Fe-Ti-V intra-gabros olivínicos (Silva, 1945; Mateus *et al.*, 2001; Jesus, 2002; Jesus *et al.*, 2003 *apud* Mateus *et al.*, 2010);
2. Sulfuretos maciços intercumulus ricos em Ni-Cu(-Co) relacionados com fácies noríticas e piroxeníticas da sequência gabróica (Jesus *et al.*, 2005, 2006, 2007 *apud* Mateus *et al.*, 2010);
3. *Stockworks* de sulfuretos de Cu(-Ni) que se desenvolvem no seio de gabros metasomatizados (Mateus *et al.*, 2001; Jesus *et al.*, 2003, 2007 *apud* Mateus *et al.*, 2010).

Os índices mineiros que, por vezes, se detectam no seio da unidade (grano-)diorítica são pouco significativos (Carvalho *et al.*, 1971; Andrade, 1972, 1983; Oliveira, 1986 *apud* Mateus *et al.*, 2010). As intrusões porfiríticas tardias do CIB enquadram, por sua vez, mineralizações epitermais de Cu(-Ag-Au?) (Carvalho *et al.* 1971; Carvalho, 1971; Oliveira, 1986, Relvas, 1987; Massano, 1988; Oliveira *et al.*, 2006 *apud* Mateus *et al.*, 2010).

Actualmente distinguem-se sete Séries na Sequência Grabóica Bandada: Soberanas I (SBI), Soberanas II (SBII), Odivelas I (ODVI), Odivelas II (ODVII), Odivelas III (ODVIII), Beringel I (BRGI) e Beringel II (BRGII); e o Grupo de Bordadura, explicitados nas Figuras 2.4 e 2.5. A medição sistemática do bandado magmático neste compartimento da sequência gabróica revela existir variações que, em parte, deverão ser primárias, embora se verifiquem reajustamentos estruturais significativos na proximidade de diferentes zonas de cisalhamento semi-frágil (especialmente as de rumo geral WNW-ESE, mas

também, localmente, as de direcção geral NNW-SSE); em termos gerais, a direcção do bandado magmático varia entre WSW-ESE a NW-SE, inclinando  $25^{\circ}$ - $30^{\circ}$  para SSW-SW (Mateus *et al.*, 2010).

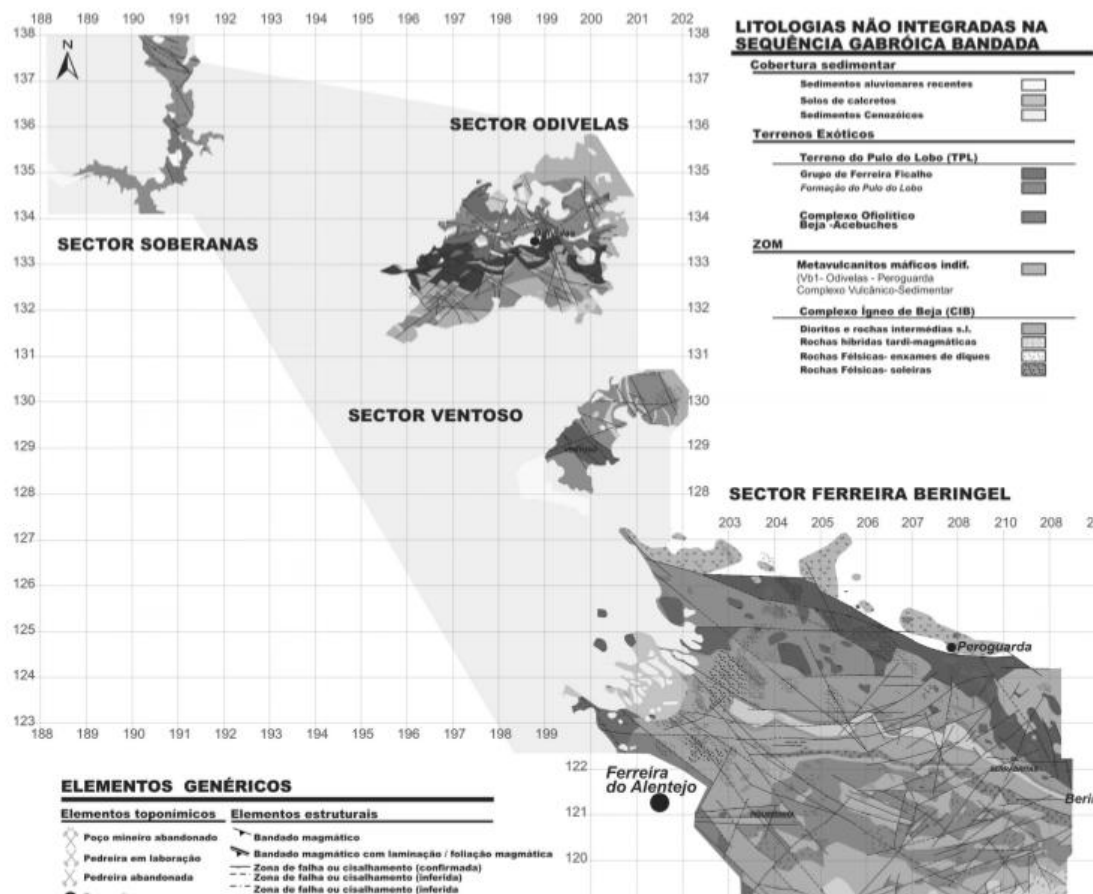


Figura 2.4: Mapa geológico do compartimento Oeste da Sequência Gabrótica Bandada (adaptado de Mateus *et al.*, 2010)

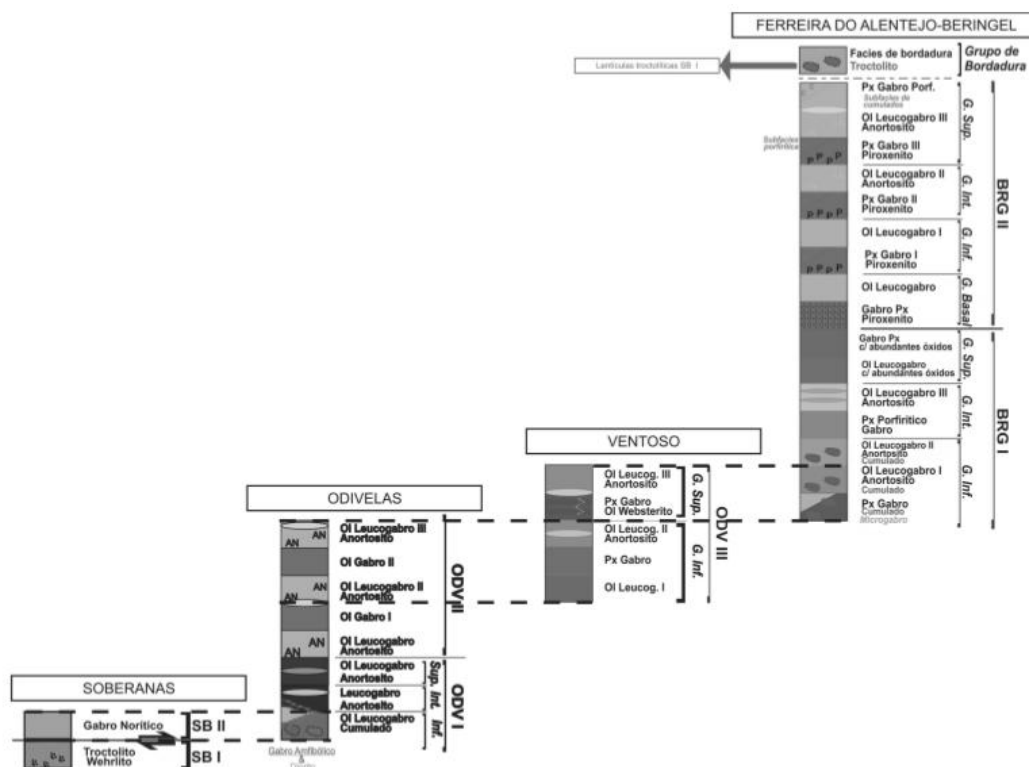


Figura 2.5: Colunas litológicas sintéticas para cada sector do compartimento Oeste da Sequência Gabróica Bandada e correlação inter-sector (adaptado de Mateus *et al.*, 2010)

## 2.4 Clima

De acordo com a bibliografia apresentada no capítulo anterior é possível efectuar uma relação directa entre o clima e o desenvolvimento de calcretos. Os calcretos actuais surgem em áreas com clima temperado a quente (temperatura média anual de 16<sup>o</sup> C) e chuvas sazonais (100-500 mm) (Goudie, 1983), podendo atingir o auge quando a pluviosidade se enquadra entre os os 600-1000 mm (Mack e James, 1994). A Tabela 2.1 apresenta a precipitação total para os anos de 1960 até 2012 na região em apreço, sendo possível verificar que, à excepção do ano de 1989, todos os outros se enquadram nos padrões propícios ao desenvolvimento de calcretos. A Tabela 2.2 apresenta a temperatura média anual para os anos de 1960 até 2012 da área em estudo, sendo possível verificar que a mesma varia entre 15,0<sup>o</sup> C (1972) e 17,9<sup>o</sup> C (1995). Da sua análise verifica-se que desde 1993 a temperatura média anual é sistematicamente superior a 16<sup>o</sup> C.

Tabela 2.1: Precipitação total na Região de Beja para os anos de 1960 a 2012 (IPMA/MA-MAOT, PORDATA, 2013)

Ano	Precipitação (mm)	Ano	Precipitação (mm)	Ano	Precipitação (mm)
1960	859,7	1980	423,3	2000	696,6
1961	602,7	1981	355,0	2001	669,6
1962	591,1	1982	457,0	2002	572,5
1963	872,3	1983	486,1	2003	585,8
1964	463,7	1984	550,3	2004	316,5
1965	689,1	1985	489,8	2005	339,1
1966	565,5	1986	480,2	2006	587,1
1967	525,7	1987	717,7	2007	346,1
1968	639,7	1988	515,5	2008	466,7
1969	811,6	1989	1042,3	2009	489,4
1970	559,1	1990	465,3	2010	816,5
1971	503,5	1991	445,5	2011	656,8
1972	626,6	1992	469,0	2012	572,4
1973	405,4	1993	528,8		
1974	375,0	1994	396,3		
1975	600,7	1995	535,9		
1976	726,4	1996	868,3		
1977	755,1	1997	930,8		
1978	585,9	1998	423,9		
1979	707,3	1999	585,7		

Tabela 2.2: Temperatura média anual na Região de Beja para os anos de 1960 a 2012 (IPMA/MAMAOT, PORDATA, 2013)

Ano	Temperatura (°C)	Ano	Temperatura (°C)	Ano	Temperatura (°C)
1960	15,9	1980	16,5	2000	17,0
1961	17,0	1981	17,2	2001	17,0
1962	16,3	1982	16,2	2002	16,9
1963	16,2	1983	16,6	2003	17,2
1964	16,4	1984	15,8	2004	17,1
1965	15,8	1985	16,6	2005	17,1
1966	16,0	1986	16,1	2006	17,4
1967	15,7	1987	17,0	2007	16,7
1968	16,1	1988	16,5	2008	16,5
1969	15,5	1989	17,2	2009	17,6
1970	16,0	1990	17,1	2010	17,1
1971	15,3	1991	16,8	2011	17,5
1972	15,0	1992	16,7	2012	16,7
1973	16,0	1993	15,8		
1974	16,0	1994	16,8		
1975	15,6	1995	17,9		
1976	15,7	1996	16,8		
1977	15,9	1997	17,5		
1978	16,3	1998	17,3		
1979	16,1	1999	16,7		

## 2.5 Hidrogeologia

A área de estudo enquadra-se no Sistema Aquífero dos Gabros de Beja que se estende pelos conselhos de Beja, Ferreira do Alentejo e Serpa, como mostra a Figura 2.6.

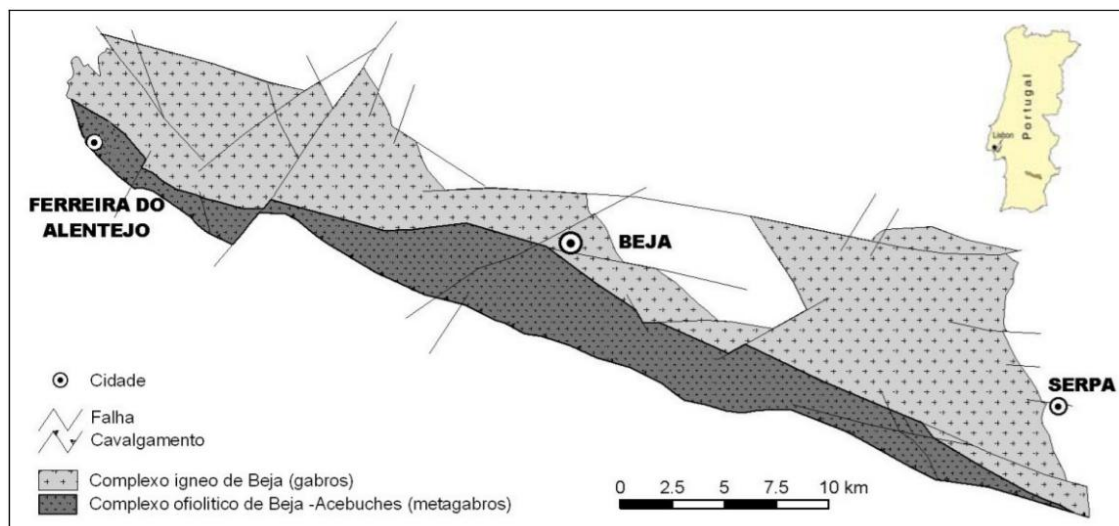


Figura 2.6: Enquadramento geográfico do Sistema Aquífero dos Gabros de Beja (adaptado de Paralta, 2005)

A área ocupada pelo sistema corresponde fundamentalmente ao CIB e COBA. A separação entre os dois complexos é baseada no facto do CIB não ter sido afectado pelo primeiro evento tectono-metamórfico varisco (Fonseca, 1995 *apud* Almeida *et al.*, 2000).

O afloramento do CIB tem um comprimento de cerca de 100 km, com uma forma alongada e, ainda que localmente interrompido para SW, prolonga-se até à região espanhola de Castilblanco de los Arroyos (Andrade, 1984 *apud* Almeida *et al.*, 2000).

Em termos gerais, as formações geológicas predominantemente gabro-dioríticas do Sistema Aquífero dos Gabros de Beja apresentam comportamento hidrogeológico característico de um meio poroso nos horizontes superiores, passando progressivamente a fissurado em profundidade. Desta forma define-se um aquífero livre com espessura variável, com 20 a 50 m de espessura.

A produtividade média do Sistema Aquífero dos Gabros de Beja é da ordem dos 5 l/s, podendo atingir máximos na ordem dos 36 l/s. Na área de Beja a taxa de insucessos é reduzida (< 20 %), enquanto na zona de Serpa é da ordem dos 50 % para caudais superiores a 1 l/s (Partalta e Francés, 2000 *apud* Paralta *et al.*, 2005).

As transmissividades mais frequentes estimadas com base em ensaios de bombagem e caudais específicos de 62 dados, situam-se entre 40 e 60 m<sup>2</sup>/dia (Duque 1997 *apud* Paralta *et al.*, 2005).

De acordo com a avaliação da recarga aquífera obtida por balanço hídrico sequencial diário e por balanço de cloretos (Partalta, 2001; Paralta *et al.*, 2003), a recarga do Sistema Aquífero dos Gabros de Beja será na ordem dos 10 a 20 % da precipitação média anual,





## **Método experimental adoptado e alguns dos seus fundamentos**

Para caracterizar a origem e prever o comportamento geotécnico dos calcretos optou-se por recolher amostras entre os 4 e 5 kg de cada estação, com o cuidado de talhar blocos suficientemente grandes, que permitissem a cravação do molde da caixa de corte. Devido ao facto dos afloramentos de calcretos intersectarem uma série de taludes, as amostras foram submetidas a ensaios de caracterização mecânica.

Os ensaios de teor em água e corte directo foram realizados no laboratório do IPB, o ensaio de difracção de raios X foi realizado no laboratório de Geologia Marinha do Instituto Hidrográfico (IH) e os restantes (densidade das partículas, análise granulométrica, limites de consistência e teor em carbonatos) foram realizados nos laboratórios do DCT e DEC da FCT-UNL.

As amostras foram recolhidas no dia 28 de Maio de 2013, mês em que foram registadas amplitudes térmicas de  $23,5^{\circ}\text{C}$ , sendo a temperatura máxima absoluta de  $29,7^{\circ}\text{C}$  e mínima de  $6,2^{\circ}\text{C}$  (IPMA, 2013).

Tendo em conta o ensaio a que se destinavam, foram recolhidas amostras não alteradas (Figura 3.1) e remexidas. As primeiras tiveram como intuito a realização de ensaios de corte directo rápido, sendo as segundas para os restantes ensaios.



Figura 3.1: Aspecto do talhe de amostragem em afloramento

A amostragem foi essencialmente superficial, todavia com recobrimentos diferentes nos respectivos taludes. O recobrimento variou entre 0 e 2 m para as estações 2 e 3, respectivamente. A área das manchas de calcretos apresentam extensões muito variáveis, apresentando um máximo de 180 000 m<sup>2</sup> na estação 6 e um mínimo de 70 m<sup>2</sup> na estação 5.

As estações 1 e 2 estão localizadas junto à estrada IP8 na localidade de Beringel, em dois pontos opostos na mesma mancha de calcretos, correspondentes a um talude com cerca de 1 m, encontrando-se bastante contaminados por raízes e minerais provenientes dos gabros.

A amostragem efectuada na estação 3, proveniente de um talude de escavação com cerca de 3 m, igualmente nas imediações da localidade de Beringel e estrada IP8, apresenta um aspecto homogéneo e fraca contaminação do material envolvente.

A estação 4 corresponde a uma mancha de fraca dimensão, num talude com sensivelmente 1 m, à beira de uma estrada secundária a N de Beringel, coberto por vegetação densa.

Na margem S da linha ferroviária que passa na cidade de Beja situa-se a estação 5, tratando-se de um talude com 2,5 m igualmente coberto por vegetação.

Por último, a estação 6, localizada num caminho nas imediações da estrada N18, apresenta um talude com cerca de 2 m, com vegetação cerrada e a ocorrência dos calcretos,

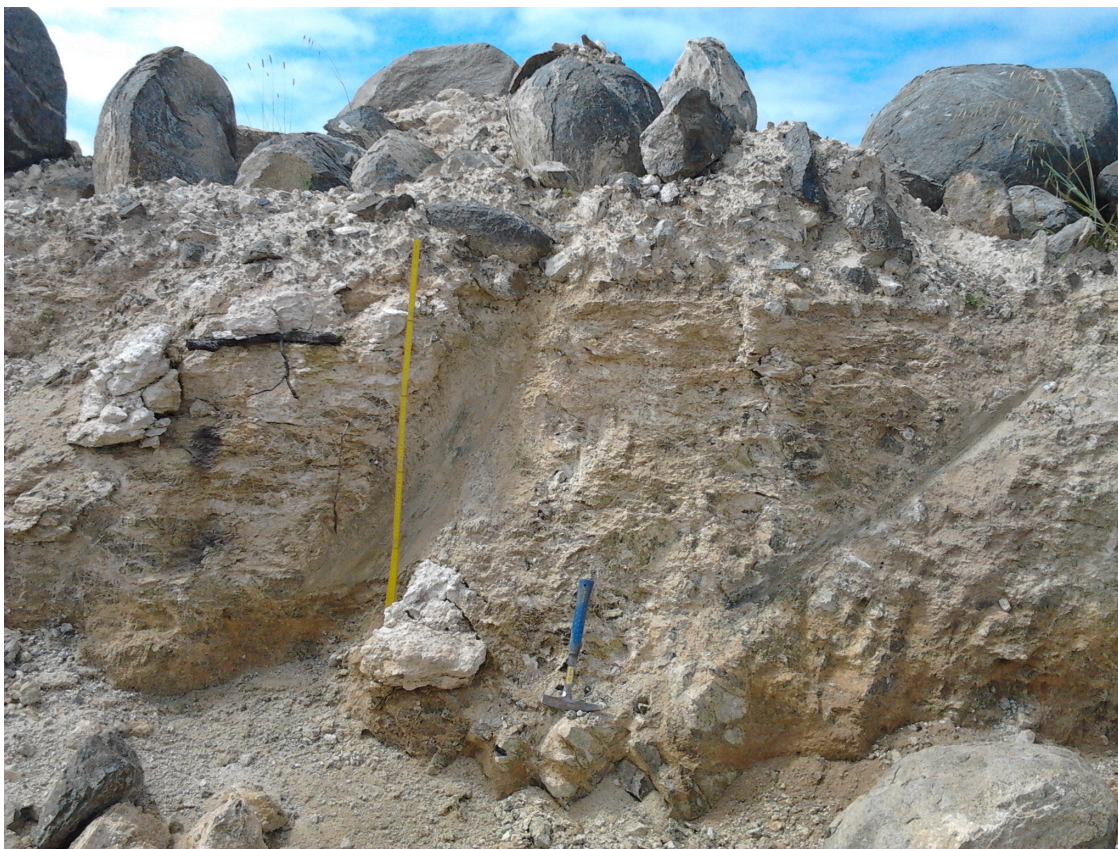
principalmente em vénulas, dificultou a amostragem, nomeadamente indeformada.

A localização precisa das estações encontra-se discriminada na Tabela 3.1.

As Figuras 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 mostram o aspecto geral dos locais de amostragem, nomeadamente a dimensão do talude e a extensão da mancha de calcretos associada às diferentes estações.

Tabela 3.1: Localização das estações de recolha de amostras

<b>Estação</b>	<b>Coordenadas</b>	<b>Profundidade da amostra (m)</b>	<b>Área da mancha de calcretos (m<sup>2</sup>)</b>
<b>1 (A)</b>	N 38° 3' 26,33" W 8° 0' 36,80" 236,7m	0,50	2 000
<b>2 (B)</b>	N 38° 3' 27,04" W 8° 0' 34,19" 256,8m	0,00	2 000
<b>3 (C)</b>	N 38° 2' 56,54" W 7° 59' 18,26" 241,0m	1,50	20 000
<b>4 (D)</b>	N 38° 4' 54,33" W 7° 58' 18,69" 226,1m	1,00	90
<b>5 (E)</b>	N 38° 0' 13,39" W 7° 51' 13,97" 300,8m	1,00	70
<b>6 (F)</b>	N 38° 0' 20,89" W 7° 57' 37,61" 278,5m	1,00	180 000



(a) Aspecto geral do local de amostragem da estação 1

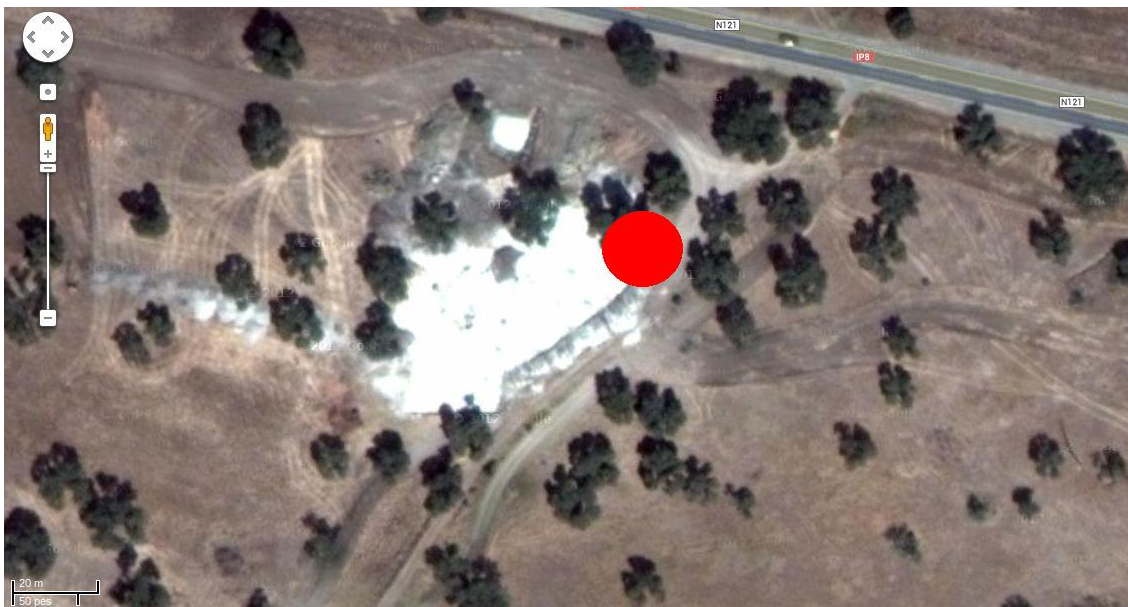


(b) Mancha da estação 1 (adaptado de Google Maps, 2013)

Figura 3.2: Aspecto geral de amostragem e mancha de calcretos da estação 1



(a) Aspecto geral do local de amostragem da estação 2



(b) Mancha da estação 2 (adaptado de Google Maps, 2013)

Figura 3.3: Aspecto geral de amostragem e mancha de calcretos da estação 2



(a) Aspecto geral do local de amostragem da estação 3



(b) Mancha da estação 3 (adaptado de Google Maps, 2013)

Figura 3.4: Aspecto geral de amostragem e mancha de calcretos da estação 3



(a) Aspecto geral do local de amostragem da estação 4

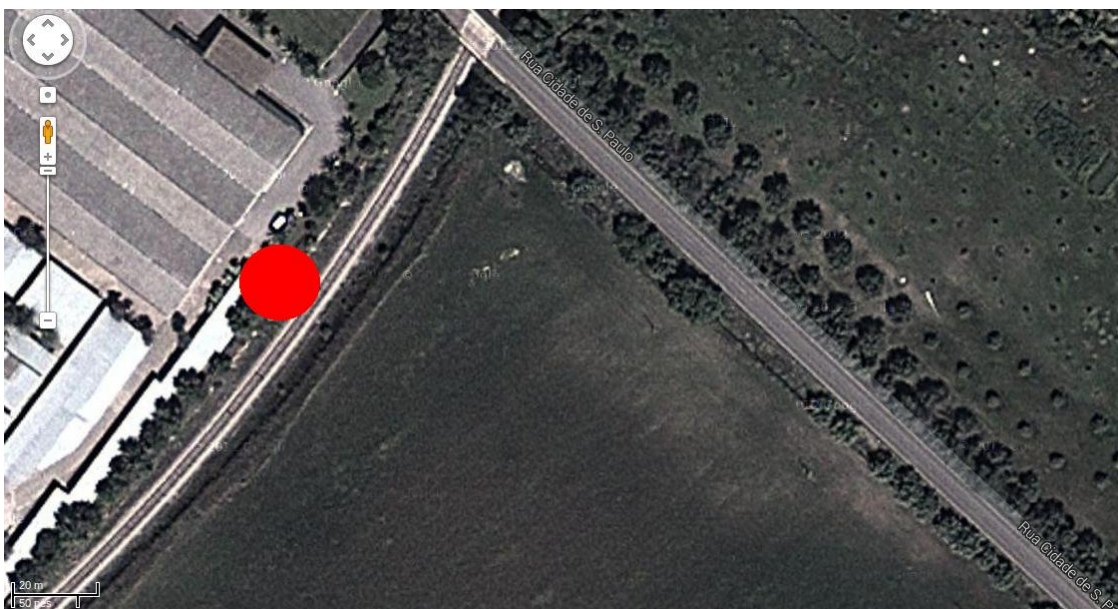


(b) Mancha da estação 4 (adaptado de Google Maps, 2013)

Figura 3.5: Aspecto geral de amostragem e mancha de calcretos da estação 4



(a) Aspecto geral do local de amostragem da estação 5



(b) Mancha da estação 5 (adaptado de Google Maps, 2013)

Figura 3.6: Aspecto geral de amostragem e mancha de calcetros da estação 5



(a) Aspecto geral do local de amostragem da estação 6



(b) Mancha da estação 6 (adaptado de Google Maps, 2013)

Figura 3.7: Aspecto geral de amostragem e mancha de calcretos da estação 6

### 3.0.1 Normas adoptadas

Todos os ensaios efectuados seguiram as documentações normativas estabelecidas por entidades credenciadas para o efeito e geralmente utilizadas em estudos geotécnicos.

Seguidamente apresentam-se as normas utilizadas:

- **LNEC E 195-1966** Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação.
- **LNEC E 196-1966** Análise granulométrica.
- **LNEC E 239-1970** Análise granulométrica por peneiração húmida.
- **NP-83 1965** Determinação da densidade das partículas.
- **NP-143 1969** Determinação dos limites de consistência.
- **ASTM D 3080-04** Ensaio de corte directo.
- **PIL DCT (sem data)** Determinação do teor em carbonatos.

Uma vez que se pretendiam aplicar as classificações geotécnicas de solos aos materiais ensaiados, adoptaram-se as normas que utilizam os peneiros da série ASTM (*American Society for Testing and Materials*), aplicados pelas classificações normalmente mais utilizadas:

- Classificação de Solos e Misturas de Solos-Agregados para Fins Rodoviários - AASHTO (ASTM D 3282-09) e
- Sistema Unificado de Classificação de Solos (ASTM D 2487-06).

## 3.1 Descrição e classificação de solos

### 3.1.1 Classes granulométricas

Para estudar um material complexo como o solo (com diferente tamanho de partículas e composição química) é necessário seguir uma metodologia com definições e sistemas de avaliação de propriedades, de forma a que se constitua uma linguagem facilmente compreendida por técnicos de diferentes especialidades e países.

Assume-se globalmente que os solos podem ser constituídos pelas seguintes classes de materiais:

- **Cascalho** Grãos com tamanho compreendido entre 6 e 2 mm. Caracterizam-se pela observação directa dos grãos. Não retêm a água devido à inactividade da sua superfície e pelos grandes vazios entre as partículas.
- **Areia** Partículas com tamanho entre 2 mm e 0,06 mm, ainda assim observadas a olho nu. Quando misturadas com água não se formam agregados contínuos, visto que se separam desta com facilidade.

- **Silte** Partículas compreendidas entre 0,06mm e 0,002 mm. Retêm a água mais facilmente que os tamanhos superiores. Ao formar-se uma pasta água-silte e colocando-a na mão, esta expulsa a água facilmente ao apertar-se.
- **Argila** Formada por partículas com tamanhos inferiores a 0,002 mm ( $2 \mu\text{m}$ ). Tratam-se de partículas de tamanho reduzido e é necessário que hajam transformações químicas para que se alcancem estas dimensões. São formadas, essencialmente, por minerais silicatados, constituídos por cadeias de elementos tetraédricos e octaédricos (o ião silício encontra-se no centro de cada uma destas estruturas regulares), unidas por ligações covalentes débeis, onde moléculas de água podem entrar na cadeia e produzir aumentos de volume, recuperáveis após a evaporação desta. Tudo isto faz com que a capacidade de retenção de água seja enorme (pequenos vazios com uma grande superfície de absorção nas partículas e uma estrutura que permite reter a água), pelo que são geralmente os materiais mais problemáticos (tempos muito elevados de consolidação ou de expulsão de água sob esforços) (Vallejo et al., 2002).

### 3.1.2 Granulometria por crivagem

Para conhecer a proporção de cada material presente no solo são realizadas análises granulométricas, utilizando a via seca para partículas de tamanhos superiores a 0,075 mm e a granulometria por sedimentação mediante via húmida para tamanhos iguais ou inferiores a 0,075 mm. Os primeiros executam-se tomando uma amostra representativa do solo, secando-a e desagregando em seco o conjunto de partículas. Faz-se passar a amostra por um conjunto de peneiros ASTM de malha quadrada (cujos tamanhos diminuem em progressão geométrica de razão 2) agitando o conjunto.

Para uma melhor definição da granulometria de um solo utilizam-se os seguintes coeficientes:

- **Coefficiente de uniformidade ( $C_u$ )** É a relação entre o diâmetro correspondente ao peneiro pelo qual passa 60 % do material e o diâmetro correspondente ao peneiro pelo qual passa 10 %;
- **Coefficiente de Curvatura ( $C_c$ )** É dado pela expressão  $C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60} \times D_{10})}$  indicativo da forma da curva granulométrica entre o peneiro pelo qual passou 60 % e 10 % do material. Se entre estes diâmetros a curva tiver uma evolução suave,  $C_c$  estará compreendido entre 1 e 3 e o solo será bem graduado;
- **Conteúdo de finos** Expressa-se através da percentagem de material que passa o peneiro número 200 da série ASTM (0,075 mm). Esta percentagem indica a proporção de argila e silte que contém o solo, estando relacionada com a possibilidade de retenção de água. Quanto maior for o conteúdo de finos, maior será a dificuldade de expulsão de água do solo quando submetido a esforços (Vallejo et al., 2002).

### 3.1.3 Granulometria por sedimentação

Neste método determinam-se os valores acumulados do peso em função do tempo.

Como procedimento normal, as classes finas sobre as quais se efectua a granulometria provêm de uma separação prévia, utilizando o peneiro número 200 (0,075 mm) da série ASTM em via húmida, das classes grosseiras (cascalhos e areias) e das classes lutíticas (siltes e argilas).

Antes de se efectuar a granulometria, a amostra é sujeita a dispersão e estabilização, com o objectivo de desaglutinar e desagregar as partículas ao máximo, por forma a que, desejavelmente, se obtenha uma suspensão em que as partículas estejam todas individualizadas e se mantenham, durante a análise, neste estado. Utilizam-se, para tal, substâncias alcalinizantes, com propriedades tamponizantes (estabilizadoras do pH), e que se combinam com os catiões plurivalentes subsistentes à lavagem, sendo o produto mais utilizado o Hexametáfosfato de Sódio. Em geral, para se obter uma suspensão dispersa e estabilizada, basta adicionar estas substâncias até se obter aproximadamente  $\text{pH} = 8$ . A amostra é vertida numa proveta de litro e, imediatamente antes da primeira colheita granulométrica, é agitada cuidadosamente até se ter a garantia que todas as partículas presentes se encontram em suspensão homogénea.

Como a densidade da suspensão vai diminuindo continuamente à medida que as partículas vão sedimentando, o registo, pelo densímetro, dessa variação, em função do tempo, permite conhecer a distribuição granulométrica.

### 3.1.4 Densidade das partículas

A densidade das partículas de um solo é o quociente do peso de um dado volume dessas partículas que passaram o peneiro número 4 da série ASTM (4,76 mm) à temperatura do ensaio, pelo peso de igual volume de água destilada a  $20^{\circ}\text{C}$ . O resultado deste ensaio é utilizado na análise granulométrica de finos (sedimentação) e foi efectuado segundo a NP-83 1965.

### 3.1.5 Plasticidade

A granulometria proporciona uma primeira aproximação da identificação do solo, mas às vezes torna-se insuficiente em geotecnia, pelo que se utilizam os índices, derivados da Agronomia, que definem a consistência do solo em função da percentagem de água, através da determinação do teor em água: peso da água do solo dividido pelo peso do solo seco.

Assim, Atterberg definiu três limites a que correspondem três teores particulares em água destes:

- **Retracção ou consistência ( $W_R$ )** que separa os estados sólido seco e semisólido;
- **Limite de plasticidade ( $W_P$ )** que separa o estado semisólido do plástico;

- **Limite de liquidez ( $W_L$ )** que separa o estado plástico do semilíquido.

Estes dois últimos limites, os mais usados na prática, determinam-se com a fracção de solo que passa pelo peneiro número 40 da série ASTM (0,1 mm).

O  $W_P$  determina-se amassando solo seco com pouca água e formando filamentos cilíndricos, enrolando-os com a palma da mão numa superfície lisa, até chegar a um diâmetro de 3 mm e uma longitude de 25-30 mm (Figura 3.8).



Figura 3.8: Obtenção do filamento cilíndrico de solo para determinação do limite de plasticidade durante o procedimento de ensaio

O  $W_L$  determina-se amassando bem o solo seco (previamente desagregado), com bastante água e estendendo a massa sobre um molde denominado Concha de Casagrande (Figura 3.9).

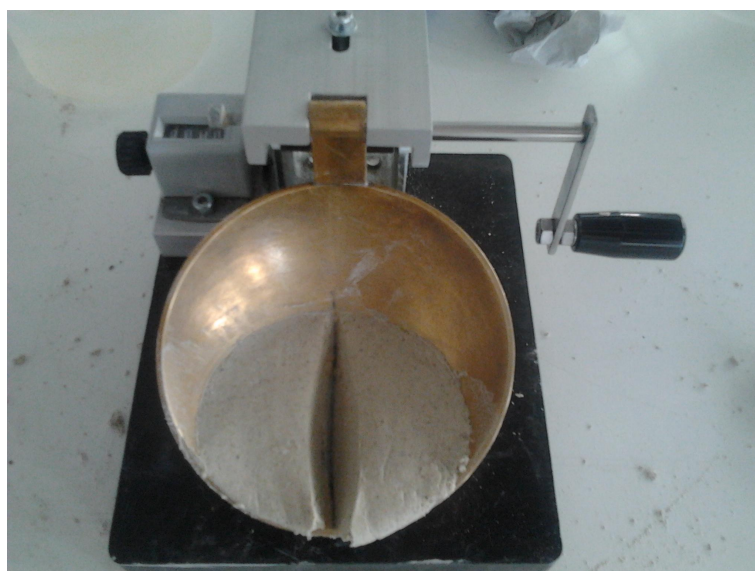


Figura 3.9: Concha de Casagrande com amostra de solo

Determinados os  $W_L$  e  $W_P$  pode-se obter um ponto representativo de cada amostra de solo na Carta de Plasticidade de Casagrande (Figura 3.10).

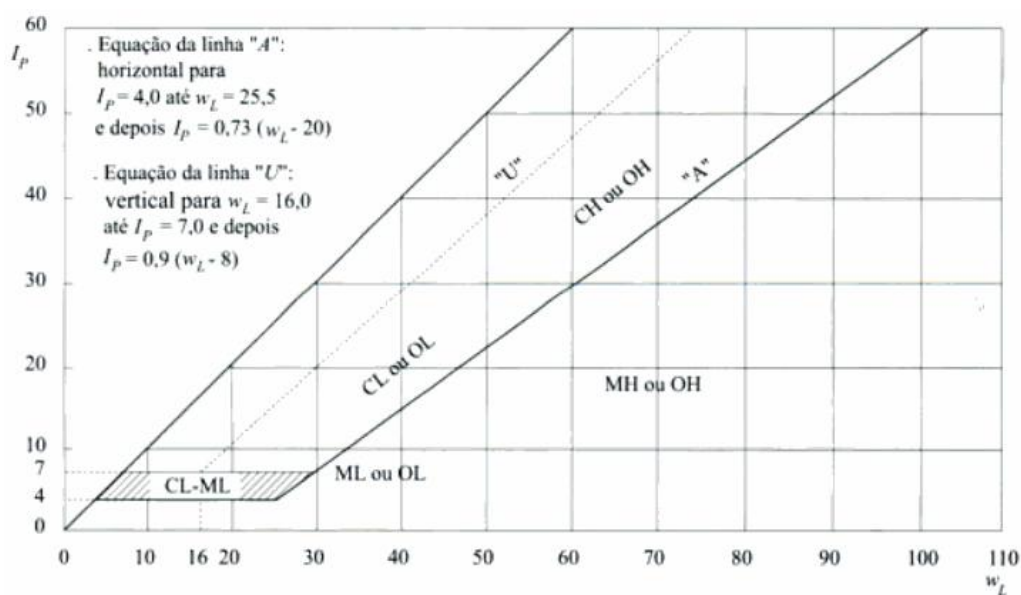


Figura 3.10: Carta de Plasticidade de Casagrande

Utilizando a linha A e o critério de plasticidade baixa e elevada, definem-se na carta de Casagrande várias zonas, representadas na Figura 3.10.

Em alternativa ao método da concha de Casagrande foi desenvolvido por John Olson, entre 1914 e 1922, um dispositivo apelidado de "Cone Sueco". Actualmente, o dispositivo sofreu algumas modificações e é denominado de *fall cone* ou cone penetrómetro. Posteriormente, segundo Wasti (1987), surgiram novas variantes em diferentes países

com a introdução de pequenas alterações no aparelho original, nomeadamente no ângulo do cone, peso do conjunto de queda e na definição da profundidade de leitura do  $W_L$ .

Nos anos 70, surgiu pela primeira vez uma norma para este ensaio, apresentada pela *British Standards Institution - Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes* (BS 1377: Parte 2, 1990) precedida pela norma Canadiana, *Quebec Standards Bureau 2501 - 09* (BUDHU, 1999). Estas duas normas referem o método de *fall cone* como o eleito para o estudo dos limites de consistência, mais precisamente para a determinação do  $W_L$ .

O funcionamento deste dispositivo baseia-se na queda de um cone de massa  $m$  e ângulo do cone  $\alpha$  sobre uma amostra remoldada de solo, anotando-se o valor da penetração do cone. No mínimo deverão ser realizados 4 ensaios repetidos, com diferentes teores em água, de forma a traçar um gráfico linear de penetração (mm) *versus* teor em água (%). O  $W_L$  será o valor do teor em água para uma profundidade de penetração de 20 mm (Sousa, 2011).

O método de *fall cone*, apesar de mais preciso terá menor repetibilidade, pelo que nesta dissertação optou-se por determinar o  $W_L$  pelo método da concha de Casagrande.

Casagrande completou o sistema de identificação com dados de granulometria e definiu o Sistema Unificado de Classificação de Solos, muito usado na prática.

Deve determinar-se ainda o conteúdo de alguns componentes químicos para completar esta identificação: A matéria orgânica (para conhecer a parte compressível das partículas) e os teores de sulfatos (para determinar possíveis dissoluções) e de carbonatos (como possível agente cimentante). Para problemas especiais deve ser determinada a composição química restante e, sobretudo, o conteúdo mineralógico da fracção argilosa, para conhecer o tipo de minerais e as respectivas características, nomeadamente expansibilidade (Vallejo et al., 2002).

### 3.1.6 Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS)

De entre as classificações dos solos destinadas a aplicações geotécnicas, destaca-se a Classificação Unificada. Esta classificação, destinada a orientar a utilização dos solos como materiais de aterro (aterros para estradas, aeródromos, barragens de terra etc.), divide os solos em 15 grupos, com base nas respectivas características de identificação (composição granulométrica e limites de consistência).

Na versão utilizada (ASTM D 2487-06), a classificação do solo, isto é, o seu grupo, corresponde a um símbolo (duas letras maiúsculas, em geral) e a um nome. Em anexo à referida norma encontra-se uma vasta informação destinada a exemplificar a sua aplicação, nomeadamente nos casos menos comuns, e ainda respeitante aos processos a adoptar na preparação das amostras e nos ensaios necessários à classificação.

A utilidade desta classificação reside no facto de a experiência de muitas obras ter possibilitado uma associação de cada um dos grupos de solos referidos a determinados

comportamentos mais ou menos desejáveis para diversos fins. Na fase de estudo de determinada obra de aterro é assim possível, com base em ensaios tão simples como os de identificação, escolher, entre os solos que se apresentam como passíveis de utilização, aqueles que melhor correspondem às exigências daquela. A Tabela 3.2 resume algumas importantes propriedades dos solos dos grupos em que se divide a Classificação Unificada de solos compactados.

Tabela 3.2: Algumas tendências de comportamento dos grupos da Classificação Unificada quando usados em obras de aterro (USDA, 2012)

<b>Símbolo do grupo</b>	<b>Permeabilidade quando compactado</b>	<b>Resistência ao corte quando compactado e saturado</b>	<b>Compressibilidade quando compactado e saturado</b>	<b>Trabalhabilidade como material de construção</b>
<b>GW</b>	Permeável	Excelente	Desprezável	Excelente
<b>GP</b>	Muito permeável	Boa	Desprezável	Boa
<b>GM</b>	Semipermeável a impermeável	Boa	Desprezável	Boa
<b>GC</b>	Impermeável	Boa a razoável	Muito baixa	Boa
<b>SW</b>	Permeável	Excelente	Desprezável	Excelente
<b>SP</b>	Permeável	Boa	Muito baixa	Razoável
<b>SM</b>	Semipermeável a impermeável	Boa	Baixa	Razoável
<b>SC</b>	Impermeável	Boa a razoável	Baixa	Boa
<b>ML</b>	Semipermeável a impermeável	Razoável	Média	Razoável
<b>CL</b>	Impermeável	Razoável	Média	Boa a razoável
<b>OL</b>	Semipermeável a impermeável	Fraca	Média	Razoável
<b>MH</b>	Semipermeável a impermeável	Razoável a fraca	Elevada	Fraca
<b>CH</b>	Impermeável	Fraca	Elevada	Fraca
<b>OH</b>	Impermeável	Fraca	Elevada	Fraca
<b>PT</b>	—	—	—	—

### 3.1.7 Classificação de solos para fins rodoviários (AASHTO)

Esta classificação foi elaborada principalmente para uso dos engenheiros rodoviários e classifica o comportamento previsível dos solos na camada de fundação (subleitos) dos pavimentos de rodovias. Os solos são classificados em grupos, de A-1 a A-7, reunidos em grupos e subgrupos. Os "materiais granulares" compreendem os grupos A-1; A-2, A-3 e os "materiais siltsos e argilosos" os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7, três dos quais divididos em subgrupos.

O melhor material de subleito é um solo bem graduado constituído principalmente por cascalho e areia, mas contendo pequena quantidade de finos para servir de ligação (A-1). Solos mal graduados, como areias finas, são difíceis de serem compactados para alcançar altas densidades elevadas e são menos desejáveis para suportar pavimentos (solo A-3).

Solos contendo grande proporção de finos são inadequados como materiais de subleito. Estes são classificados de A-4 a A-7, na ordem decrescente de adequação. Quando o subleito tem comportamento inadequado, é executado o respectivo reforço ou o material que o constitui é substituído.

Argilas com  $W_L$  e  $W_P$  elevados estão sujeitas a amplas variações na resistência durante os ciclos de secagem e humedecimento, que são indesejáveis. Quando, nestes solos, estão presentes em quantidades suficientes para influir no seu comportamento, o solo é enquadrado como A-6 ou A-7.

## 3.2 Teor em carbonato de cálcio

O teor em carbonato de cálcio de um solo é dado pelo quociente entre o peso de um dado volume de partículas de solo após reagir com uma solução de ácido clorídrico até que não se registre efervescência e o peso inicial do mesmo solo antes da reacção, ambos secos em estufa até peso constante. Foi seguido o procedimento interno do laboratório do DCT da FCT-UNL, que contempla o ensaio de dois provetes para cada amostra de solo passado no peneiro número 40 da série ASTM, sendo o teor em carbonatos a média das duas determinações. Inicialmente é utilizada uma solução de ácido clorídrico com concentração baixa, 10 %, até um máximo de 50 %. Durante todo o processo é utilizada uma placa de aquecimento com temperatura a cerca de 80° C, permitindo acelerar a reacção.

## 3.3 Difracção de raios X

A técnica de difracção de raios X toma uma amostra em pó de material passado no peneiro número 200 da série ASTM e coloca-a num suporte onde esta é iluminada por raios X de um determinado comprimento de onda ( $\lambda$ ) e a intensidade de radiação reflectida é gravada usando um goniómetro. Estes dados são então analisados para o ângulo de reflexão ( $2\theta$ ), calculando-se o espaçamento inter-atómico (valor  $d$  em unidades Angstrom ( $\text{Å}$ ))

-  $10^{-8}$  cm). A intensidade (I) é medida para identificar os diferentes espaçamentos  $d$  e os resultados são comparados com a Tabela 3.3 para identificar possíveis correspondências (Web Mineral, 2013).

Através da equação de Bragg é possível calcular o espaçamento ( $d$ ):

$$n\lambda = 2d\sin(\theta)$$

Tabela 3.3: Listagem de 7 registos classificados por  $d1$  utilizando  $1,54056 - \text{CuK}\alpha 1$  para  $2\theta$  (Web Mineral, 2013)

$d1 \text{ \AA}(2\theta)$	I1(%)	$d2 \text{ \AA}(2\theta)$	I2(%)	$d3 \text{ \AA}(2\theta)$	I3(%)	Mineral	Fórmula
2,730(32,78)	100	3,300(27,00)	100	3,580(24,85)	100	Vaterite	$\text{CaCO}_3$
2,730(32,78)	100	3,580(24,85)	100	3,300(27,00)	100	Vaterite	$\text{CaCO}_3$
3,035(29,40)	100	2,095(43,14)	18	2,285(39,40)	18	Calcite	$\text{CaCO}_3$
3,035(29,40)	100	2,285(39,40)	18	2,095(43,14)	18	Calcite	$\text{CaCO}_3$
3,300(27,00)	100	2,730(32,78)	100	3,580(24,85)	100	Vaterite	$\text{CaCO}_3$
3,396(26,22)	100	1,977(45,86)	65	3,273(27,22)	52	Aragonite	$\text{CaCO}_3$
3,580(24,85)	100	3,300(27,00)	100	2,730(32,78)	100	Vaterite	$\text{CaCO}_3$

### 3.4 Resistência ao corte

#### 3.4.1 Critério de rotura

Quando se altera o estado de tensão do solo ocorrem deformações que podem originar a sua rotura.

A resistência ao corte do solo não deve ser considerado como um parâmetro único e constante, já que depende da sua natureza, estrutura, ligações, nível de deformações etc., assim como, especialmente, do seu estado de tensão e da pressão de fluido que preenche os seus poros.

O critério de rotura em solos mais difundido deriva do proposto por Coulomb, que relaciona tensões efectivas normais e tensões tangenciais actuantes em qualquer plano do solo. Este critério estabelece que, para um solo saturado, a resistência ao corte é dada pela expressão:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u)\tan(\phi') \quad (3.1)$$

A equação anterior representa uma recta no espaço  $(\sigma', \tau)$ , que se denomina por linha de resistência intrínseca ou envolvente de rotura do solo (Figura 3.11). Esta linha proporciona, para cada valor da tensão efectiva normal a um plano que atravessa um elemento do solo, a máxima tensão tangencial mobilizada no do dito plano.

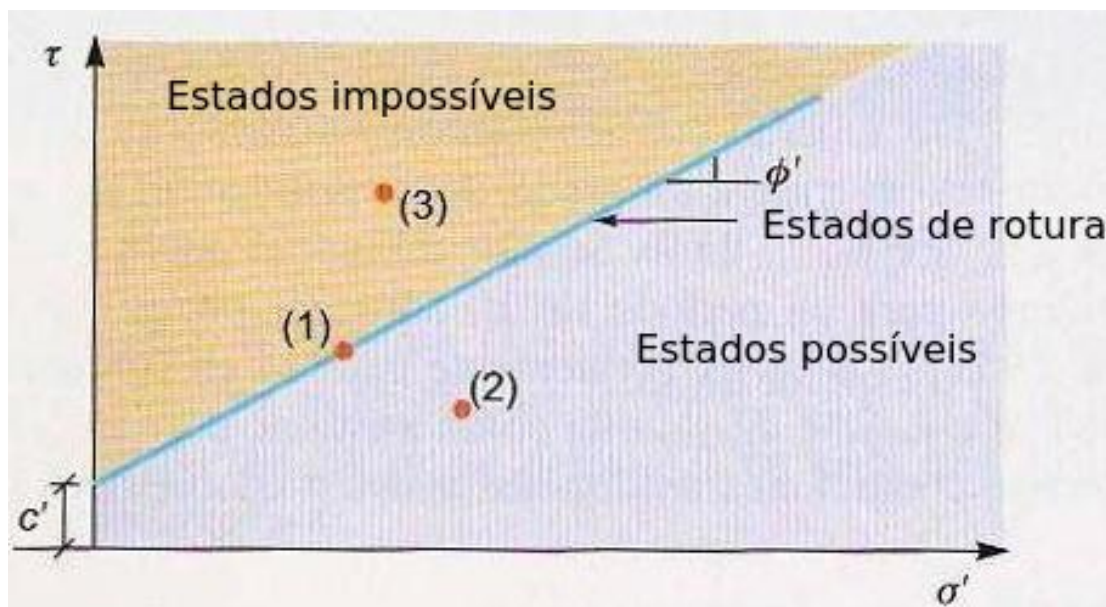


Figura 3.11: Critério de ruptura Mohr-Coulomb (adaptado de Vallejo, 2002)

Pode então deduzir-se que a coesão efectiva é a ordenada na origem da envolvente de ruptura, representando a máxima resistência tangencial mobilizável num plano qualquer, enquanto a tensão efectiva normal é nula. Verifica-se também proporcionalidade directa entre a tensão tangencial mobilizável e a tensão efectiva normal que actuam sobre o mesmo plano, ou seja, o solo apresenta maior resistência quanto maior for o seu nível de tensões efectivas. A linha de resistência definida actua como uma envolvente ou superfície de estado, separando estados possíveis de impossíveis.

- O ponto (1) assinalado na Figura 3.11 representa um estado de ruptura;
- O ponto (2) representa uma combinação  $(\sigma', \tau)$  que conta com um certo factor de segurança, já que para uma determinada tensão efectiva normal a tensão tangencial é inferior à máxima mobilizável;
- O ponto (3) representa um estado impossível já que se situa acima da envolvente de ruptura, o que significa que excedeu a combinação máxima  $(\sigma', \tau)$  do critério de ruptura, não sendo compatível com a resistência do solo.

Assim, os conceitos básicos do tensor de tensões e o círculo de Mohr podem ser facilmente relacionados com as condições de ruptura num dado plano com tensões actuantes favoráveis em outros planos. Na Figura 3.12 estão representados três círculos de Mohr no espaço  $(\sigma', \tau)$ , que podem representar três estados de tensão de um elemento de solo.

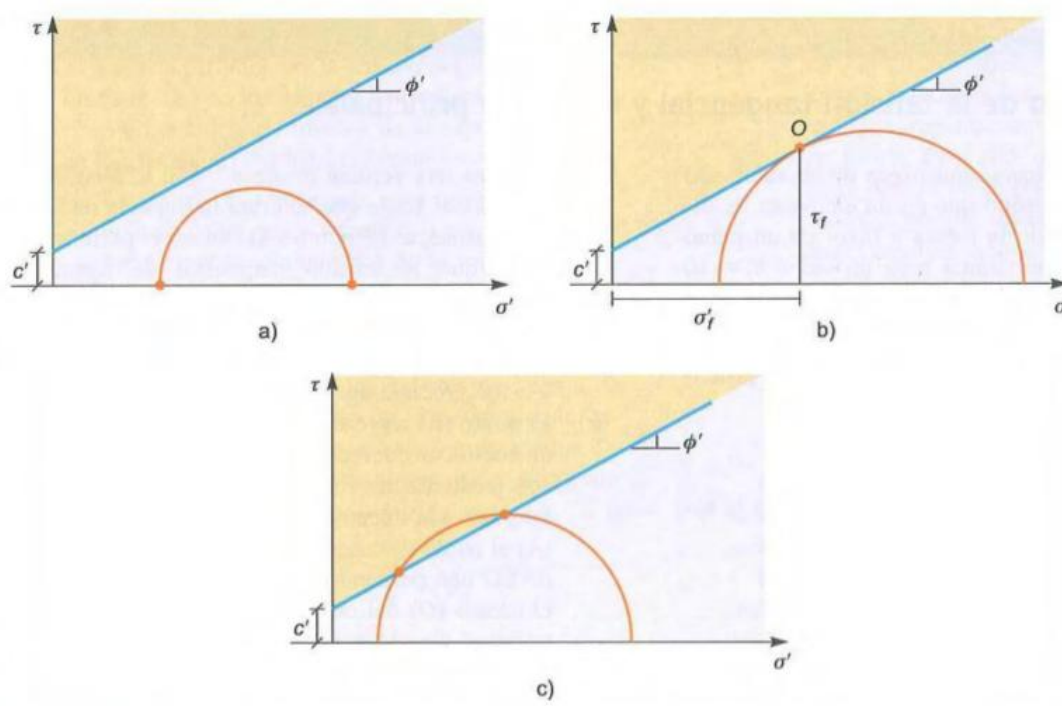


Figura 3.12: Envolvente de rotura e círculo de Mohr (adaptado de Vallejo, 2002)

É então possível observar que o estado tensional representado pelo círculo a) apresenta uma margem de segurança, já que não chega a alcançar a envolvente de rotura do solo, sendo portanto, um estado possível e seguro.

O estado tensional representado pelo círculo b) indica uma situação de rotura. Assim, o ponto O representa a combinação  $(\sigma'_f, \tau_f)$  num plano que atravessa o elemento de solo no momento em que se alcançam as condições do critério de rotura definidas.

O estado tensional representado pelo círculo c) é impossível, pois existem orientações de planos a atravessar o elemento de solo que excedem as condições  $(\sigma', \tau)$  de rotura (todos os planos representados por pontos do círculo situados acima da linha de resistência intrínseca).

Da análise anterior depreende-se que, quando se atingem as condições de rotura de um elemento de solo, o círculo de Mohr que representa o seu estado tensional será tangente à linha de resistência intrínseca e que, além disso, o plano a favor do qual se atingem as ditas condições de rotura será o representado pelo ponto de tangência (Vallejo, 2002).

### 3.4.2 Ensaio de corte directo

No caso de estudo o ensaio de corte directo é importante na definição dos parâmetros de resistência ao corte dos calcretos para avaliar a sua estabilidade em zonas de escavação, pois estes estão a aflorar em taludes revelando alguma instabilidade. Os cortes foram rápidos como é recomendado em solos grosseiros.

### 3.4.2.1 Descrição do ensaio

O dispositivo de ensaio utilizado está representado esquematicamente na Figura 3.13. Trata-se de uma caixa rígida de aço, normalmente de secção quadrada, que se encontra dividida em duas metades, colocando-se no interior a amostra de solo a ensaiar. Sobre esta dispõe-se uma placa de distribuição rígida sobre a qual se pode aplicar uma carga vertical ( $N$ ). Introduce-se, posteriormente, o conjunto num recipiente de maiores dimensões, podendo ser preenchido com água para realizar o ensaio em condições de saturação (neste caso podem dispor-se placas porosas nas faces superior e inferior da amostra para facilitar a drenagem). A indução de tensões cortantes no solo obtém-se pelo deslizamento horizontal da parte inferior da caixa de corte enquanto se impede completamente o movimento da parte superior. Nesta situação a superfície de rotura é a imposta pelo dispositivo e não aquela em que necessariamente se mobilizaria menor resistência ao corte.

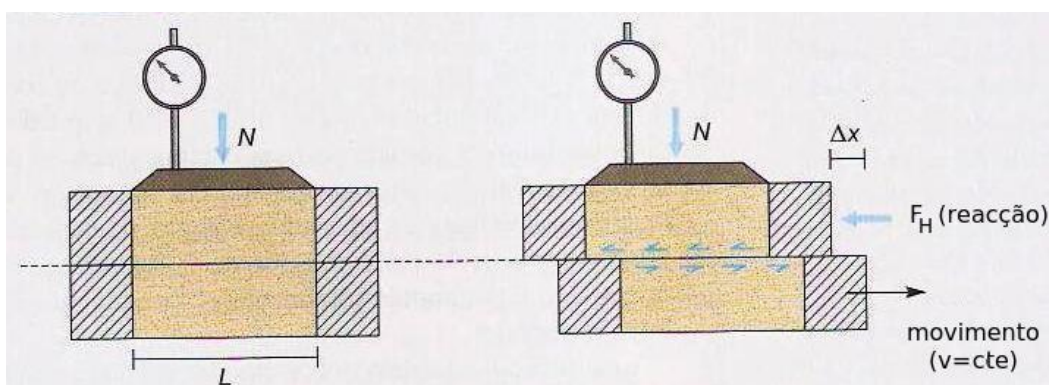


Figura 3.13: Esquema do aparelho de corte directo (adaptado de Vallejo, 2002)

Um ensaio completo de um determinado solo consiste em ensaiar pelo menos três amostras idênticas do mesmo material sob três cargas verticais distintas ( $N_1, N_2, N_3$ ), geralmente cada uma dupla da precedente.

Em cada ensaio individual, à medida que se dá o movimento horizontal a velocidade constante da parte inferior da caixa vai-se medindo a força ( $F_H$ ) necessária para impedir o movimento da parte superior e o deslocamento vertical da amostra. A força  $F_H$  divide-se pela secção ( $S_0$ ) da amostra e obtém-se a tensão tangencial ( $\tau$ ) actuante em cada momento sobre o plano de corte. Tendo em conta que as paredes da caixa de corte são rígidas, como no edómetro, a deformação vertical medida ( $\delta\varepsilon_v$ ) equivale à deformação volumétrica da amostra ( $\delta v$ ), já que:

$$\delta\varepsilon_v = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta \cdot S_0}{H_0 \cdot S_0} = \frac{\Delta V}{V_0} = \delta v$$

Contudo, este ensaio aproxima em cada medida as condições de deslizamento num talude, pelo que foi adaptado ao presente estudo.

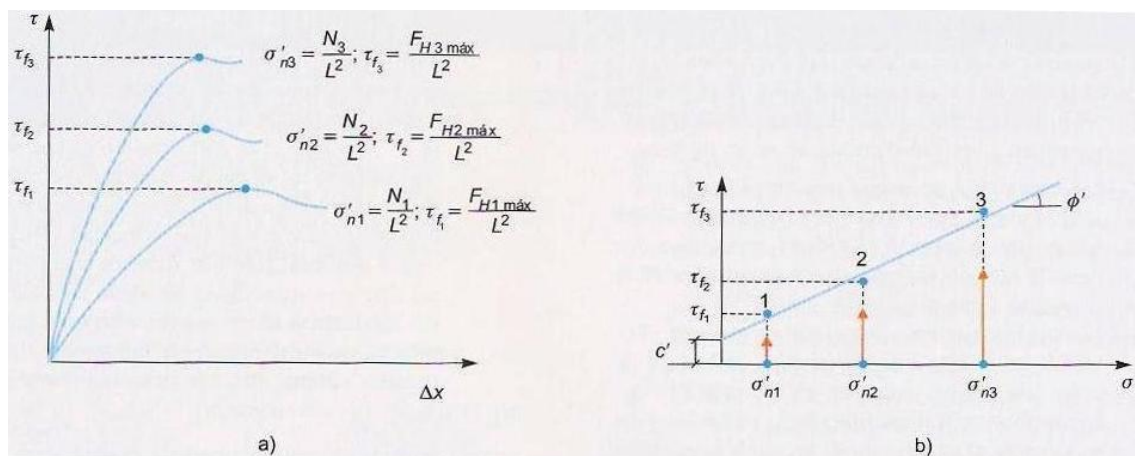


Figura 3.14: Obtenção da envolvente de rotura e dos parâmetros de resistência ao corte ( $c', \phi'$ ) a partir de um ensaio de corte directo drenado (adaptado de Vallejo, 2002)

Na Figura 3.14 podem observar-se os seguintes aspectos:

- Seja qual for a tensão efectiva normal aplicada, a tensão tangencial mobilizada aumenta progressivamente à medida que se processa o deslocamento da caixa de corte até que se alcance um máximo ( $\tau_f$ ).
- Quanto maior é a tensão efectiva normal inicial, maior é a tensão tangencial máxima alcançada.
- O declive inicial da curva de "tensão tangencial - deslocamento horizontal" é tanto maior quanto maior for a tensão efectiva normal inicial, o que indica que o solo aumenta a rigidez com o nível de tensões.

Na Figura 3.14b) mostram-se as tensões tangenciais máximas das curvas anteriores juntamente com as tensões efectivas normais iniciais. Como se pode observar, os pontos representativos ( $\sigma'_n, \tau_f$ ) dos três ensaios pode unir-se de forma bastante aproximada com uma recta, que seria a linha de resistência intrínseca ou envolvente de rotura, de onde se podem obter facilmente os parâmetros ( $c', \phi'$ ) (Vallejo, 2002).

### 3.4.2.2 Vantagens e desvantagens do ensaio de corte directo

O simples dispositivo de ensaio descrito conta com algumas vantagens, assim como uma série de limitações. As principais vantagens são:

- É um ensaio rápido e barato.
- Os seus princípios básicos são elementares.
- Simplicidade na preparação das amostras.
- Com caixas de corte grandes podem ensaiar-se materiais de grão grosseiro.

- Com algumas modificações podem empregar-se os mesmos princípios para determinar a resistência de descontinuidades em rocha.
- Pode usar-se para medir a resistência residual em argilas.

Por outro lado, as limitações são as seguintes:

- A superfície de rotura é imposta.
- A distribuição de tensões na superfície de corte não é uniforme.
- Não se podem medir pressões intersticiais, de modo que a única forma de controlar a drenagem é variando a velocidade de deslocamento horizontal.
- A área de contacto do plano de corte diminui à medida que se produz o deslocamento horizontal relativo entre ambas as meias caixas.

### 3.4.2.3 Comportamento dos solos granulares submetidos a corte

Apesar das limitações do ensaio de corte directo, a sua simplicidade facilita o estabelecimento conceptual de certos padrões de comportamento do solo, que posteriormente se podem ampliar às diversas formas de sollicitação. Nos parágrafos seguintes descrevem-se estes padrões para solos granulares.

Ao ensaiarem-se três amostras do mesmo solo grosseiro com densidades diferentes e crescentes, isto é, a amostra 1 encontra-se num estado muito solto e com um índice de vazios elevado. A amostra 2, constituída pela mesma areia, é um pouco mais densa que a anterior de forma a que o volume de vazios seja menor. A amostra 3, de densidade elevada e, portanto, apresentando o menor índice de vazios das três amostras.

Submetem-se as três amostras ao ensaio de corte directo em condições drenadas, aplicando a mesma tensão normal, de modo a que as tensões totais e efectivas coincidam em qualquer momento.

Na Figura 3.15 estão representados os resultados destes ensaios. A Figura 3.15a) mostra as curvas "tensão tangencial mobilizada - deslocamento horizontal". A Figura 3.15b) representa a relação "deslocamento horizontal - variação de volume". A Figura 3.15c) exprime a relação "índice de vazios - deslocamento horizontal". Por último, a Figura 3.15d) mostra a rota tensional exercida no plano  $(\sigma', \tau)$ .

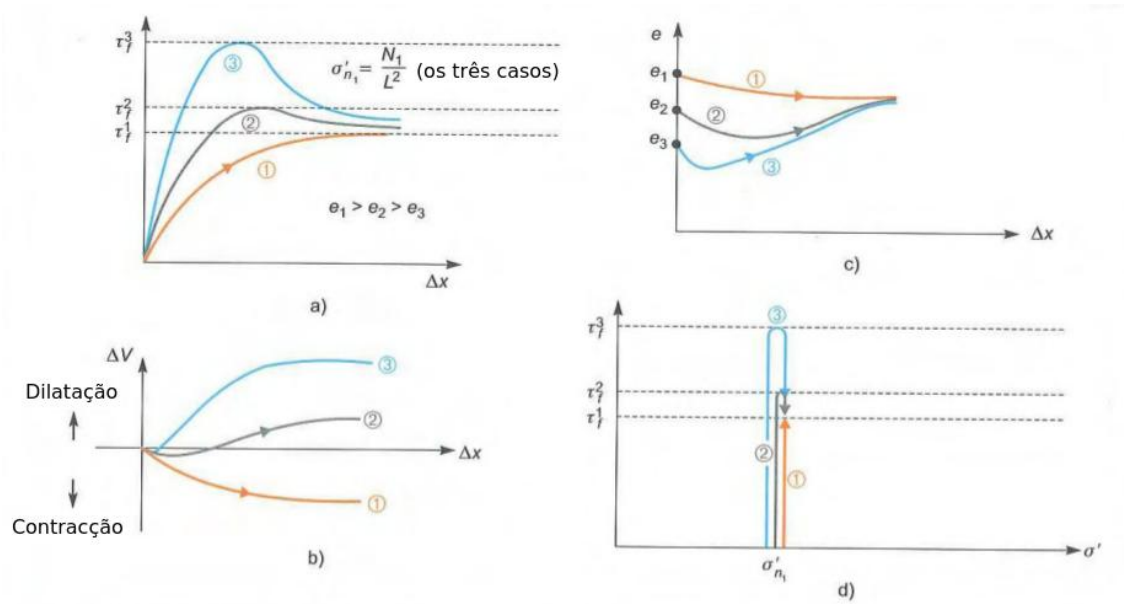


Figura 3.15: Curvas de ensaios de corte drenado sobre amostras granulares de distinta densidade inicial (adaptado de Vallejo, 2002)

O índice de vazios pode ser expresso a qualquer momento aplicando a seguinte expressão:

$$\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{e_0 - e}{1 + e_0} \Rightarrow e = e_0 - \frac{\Delta H}{H_0}(1 + e_0)$$

Estes três ensaios de corte poderiam repetir-se em amostras idênticas às anteriores, mas submetidas a tensões efectivas normais maiores. A Figura 3.16 representa esquematicamente as três envolventes de rotura resultantes, mostrando como o ângulo de atrito de pico depende directamente da densidade inicial do solo.

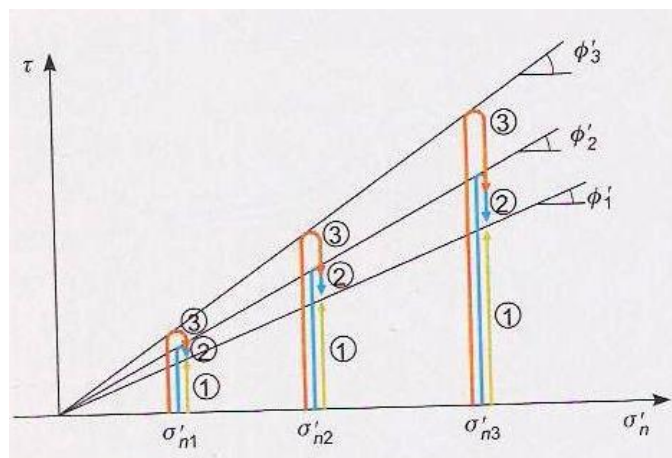


Figura 3.16: Envolventes de rotura em função da densidade inicial da amostra (adaptado de Vallejo, 2002)

Embora a compactidade seja um factor primário indiscutível, a maior ou menor resistência de um solo granular depende também de alguns outros factores, como a forma das partículas, a distribuição granulométrica e o tamanho dos grãos. Nos três casos citados a influência sobre a resistência é simples e intuitiva. Assim, relativamente à forma, é evidente que será mais fácil fazer deslizar ou rodar entre si partículas arredondadas do que angulosas e irregulares, de forma que um solo constituído por estes dois últimos tipos de partículas apresentará uma maior resistência ao corte. Relativamente à granulometria, num solo uniforme a maioria das partículas são de tamanho similar, de forma que o índice de vazios entre partículas depende directamente do tamanho das mesmas. Um solo bem graduado possui partículas de vários tamanhos, onde grãos medianos podem ocupar os espaços entre partículas mais grossas, e partículas mais finas os das medianas, diminuindo assim o índice de vazios. Logicamente que esta melhor possibilidade de acomodação das partículas num solo bem graduado implica uma estrutura mais densa e resistente que num solo uniforme. Finalmente, será mais difícil fazer deslizar e rodar entre si partículas de grandes dimensões que partículas pequenas.

Na Tabela 3.4 mostram-se algumas ordens de grandeza dos ângulos de atrito que se podem esperar em função da compactidade e tipo de solo, onde se podem verificar alguns dos aspectos referidos anteriormente (Vallejo, 2002).

Em siltes, os valores de referência para o ( $\tau$ ) rondam os 75 kPa (GEOL, 2013).

Tabela 3.4: Valores do ângulo de atrito de solos granulares não plásticos em função da granulometria e da compactidade (adaptado de Vallejo, 2002)

Tipos de solo	Ângulo de atrito em função da densidade inicial (°)		
	Solto	Medianamente denso	Denso
<b>Silte não plástico</b>	26 a 30	28 a 32	30 a 34
<b>Areia uniforme fina a média</b>	26 a 30	30 a 34	32 a 36
<b>Areia bem graduada</b>	30 a 34	34 a 40	38 a 46
<b>Mistura de areia e cascalho</b>	32 a 36	36 a 42	40 a 48

# 4

## Resultados da caracterização geotécnica

Neste capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização física, mecânica e mineralógica realizados, assim como a análise dos mesmos.

Os diferentes ensaios seguiram as normas apresentadas e explicadas no capítulo precedente, sendo efectuados em laboratórios, na FCT-UNL, IPB e IH, nas amostras não alteradas e remexidas que foram recolhidas nas seis estações.

Os resultados obtidos são sintetizados em gráficos e tabelas, e discutidos, remetendo-se para anexo a este texto o conjunto de dados completos consultados para a sua elaboração.

### 4.1 Resultados Experimentais

#### 4.1.1 Teor em água

Foi efectuado um ensaio para cada estação para a determinação do teor em água natural das amostras.

A Tabela 4.1 mostra o teor em água natural para cada amostra das diferentes estações e o Anexo 1 inclui os respectivos resultados discriminados.

Tabela 4.1: Teores em água das amostras

<b>Amostra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Teor em água (%)</b>	20,3	4,3	3,8	10,2	2,4	0,8

Verificou-se que a primeira amostra apresenta um teor em água duplo das restantes, o que pode ser explicado pelo facto de ter sido recolhida numa zona mais superficial, nomeadamente virada a norte e após um certo período de pluviosidade matinal, factores que conjugados proporcionaram um melhor acesso de água aos poros do solo.

#### 4.1.2 Densidade das partículas

Foram efectuados 3 ensaios para cada estação e os resultados enquadram-se com os valores esperados para este tipo de solo, à excepção da amostra 2, que apresenta uma densidade das partículas ligeiramente inferior.

Não obstante o cuidado na elaboração do ensaio, factores como a pureza da água destilada usada, erros na calibragem do picnómetro, ineficiência da sílica-gel anidra no exsiccador e ainda a presença de outros materiais não carbonatados no solo em análise podem ter tido influência nos resultados obtidos.

A Tabela 4.2 resume a densidade média das partículas para cada amostra das diferentes estações e o Anexo 2 inclui os respectivos resultados dos ensaios.

Tabela 4.2: Densidade das partículas das amostras

<b>Amostra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Densidade das partículas (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,64	2,24	2,64	2,74	2,74	2,46

A determinação da densidade das partículas permite calcular o peso volúmico, variando este entre 22 kN/m<sup>3</sup> (solo 2) e 27 kN/m<sup>3</sup> (solos 4 e 5). Os pesos volúnicos mais elevados deverão corresponder a materiais com alguma ligação genética à rocha gábrica encaixante.

#### 4.1.3 Análise granulométrica

Como referido no capítulo anterior, foi realizada uma análise granulométrica por crivagem e sedimentação para cada uma das amostras provenientes das estações.

A Figura 4.1 mostra as diferentes curvas granulométricas obtidas e o Anexo 3 apresenta os dados referentes aos ensaios realizados.



A Tabela 4.3 mostra as percentagens de calhaus, seixos, areias, siltes e argilas presentes em cada amostra de solo.

Tabela 4.3: Percentagem das classes granulométricas para cada uma das amostras ensaiadas

<b>Amostra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Calhaus (%)</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Seixos (%)</b>	0,40	5,18	2,40	0,59	6,19	0,59
<b>Areias (%)</b>	46,82	60,49	80,55	61,67	72,18	55,17
<b>Siltes (%)</b>	45,70	28,20	13,93	34,96	17,95	31,19
<b>Argilas (%)</b>	7,07	6,12	3,12	2,78	3,68	13,04

As diferentes curvas granulométricas referentes às amostras das várias estações permitem verificar que todos os solos apresentam uma percentagem nula de calhaus e inferior a 7% de seixos, estando a maior concentração da fracção granulométrica nas areias, siltes e argilas. A percentagem da fracção areia oscila entre um máximo de 80,55% e um mínimo de 46,82%, respectivamente para a amostra 3 e 1. O solo 1 apresenta maior percentagem de siltes, com 45,70 % e, o solo 3 é o que apresenta menor percentagem, com 13,93 %. Relativamente à percentagem de argila, esta varia entre 13,04 % para o solo 6 e 2,78 % para o solo 4.

#### 4.1.4 Limites de consistência

Realizaram-se 4 ensaios para cada solo na determinação do  $W_L$  e outros 4 para o  $W_P$ .

A Tabela 4.4 sintetiza os resultados obtidos na determinação dos limites de consistência, encontrando-se os respectivos registos no Anexo 4.

Tabela 4.4: Limites de consistência obtidos

<b>Amostra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b><math>W_L</math> (%)</b>	30	37	28	35	28	36
<b>IP (%)</b>	9	6	6	7	3	9

A determinação dos limites de consistência veio a confirmar que todas as amostras eram de solos com plasticidade baixa, já que os seus  $W_L$  e  $W_P$  apresentam valores muito próximos e o IP é sempre igual ou inferior a 9 %.

#### 4.1.5 Teor em carbonatos

Foram realizados dois ensaios para cada solo das diferentes estações e obtiveram-se os resultados expressos na Tabela 4.5. Os valores completos dos registos encontram-se

no Anexo 5.

Tabela 4.5: Valores para o teor em carbonatos das amostras ensaiadas

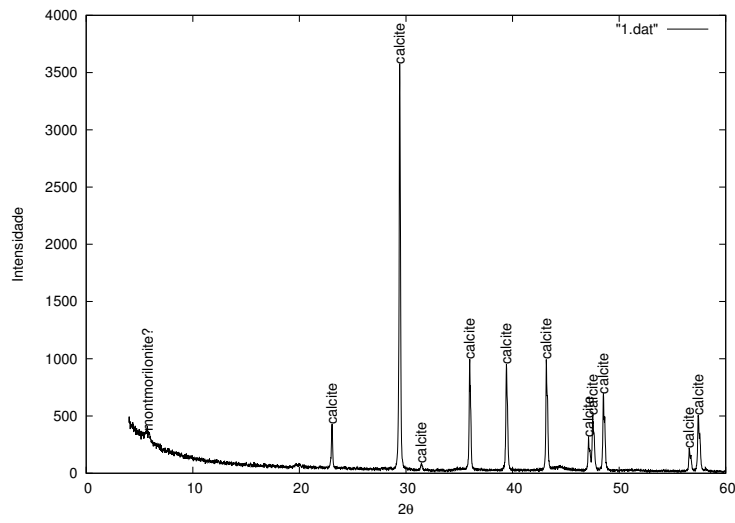
<b>Amostra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Carbonatos (%)</b>	53,8	63,7	53,9	52,2	61,4	60,0

Os ensaios confirmaram que se trata de solos carbonatados, com teores na ordem dos 50 a 60%. Todas as amostras apresentaram teores semelhantes entre si.

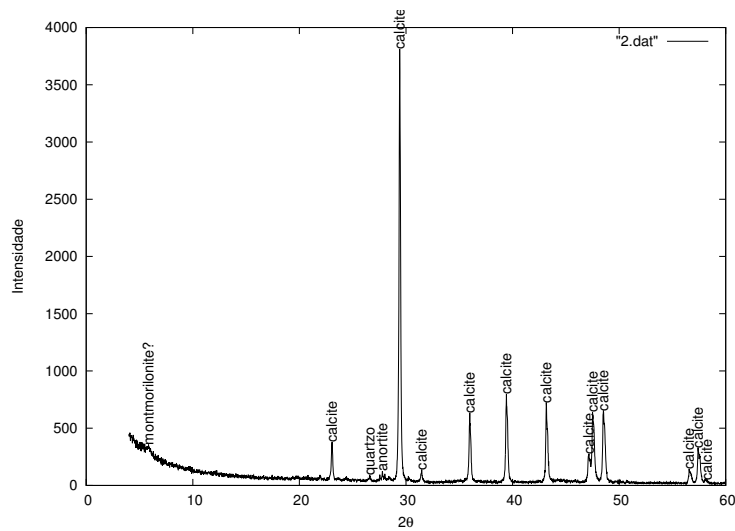
#### 4.1.6 Difraccção de raios X

A análise de DRX da fracção fina vem confirmar que o principal mineral presente nos calcretos ensaiados é a calcite. A calcite é identificada pela elevada intensidade da radiação difractada quando  $d = 3,035\text{\AA}$  ( $2\theta = 29,4$ ).

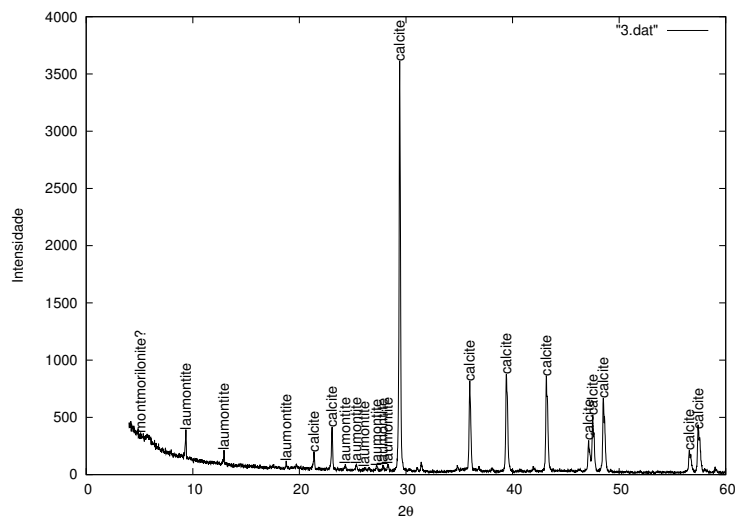
Os difratogramas das Figuras 4.2 e 4.3 mostram os picos de intensidade das diferentes amostras ensaiadas e o Anexo 5 contém os resultados dos referidos ensaios.



(a) Solo 1

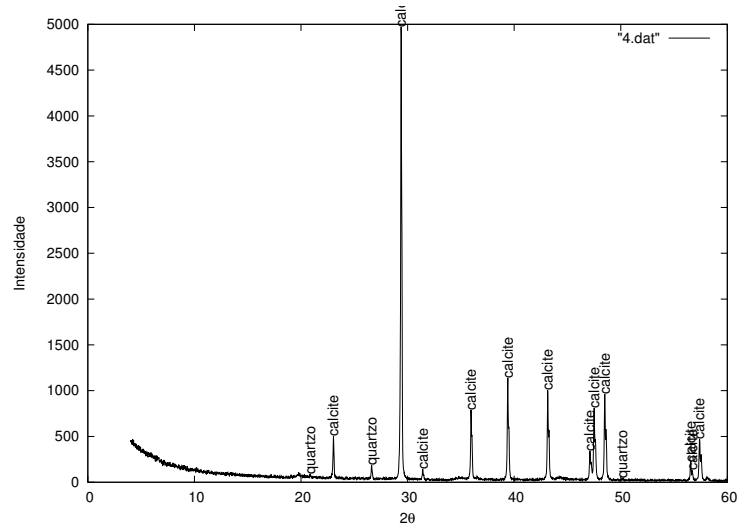


(b) Solo 2

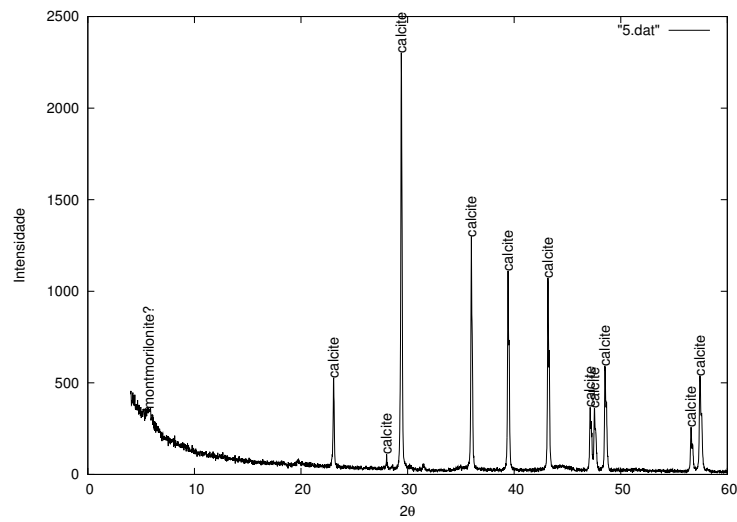


(c) Solo 3

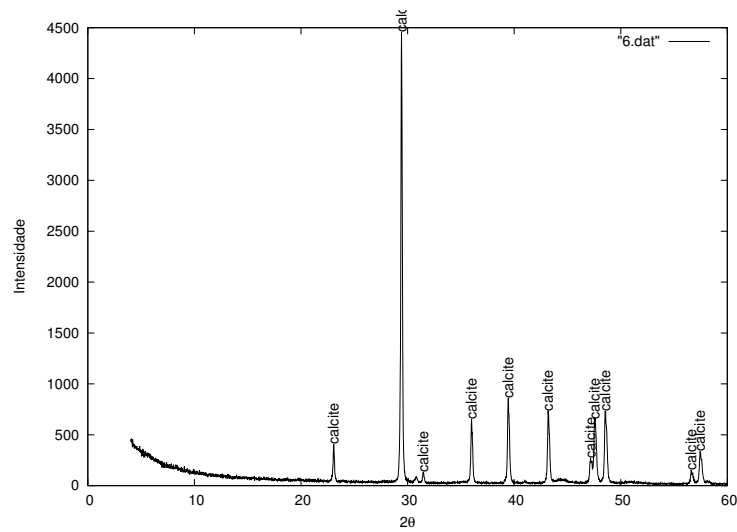
Figura 4.2: Difractogramas das amostras 1, 2 e 3



(a) Solo 4



(b) Solo 5



(c) Solo 6

Figura 4.3: Difractogramas das amostras 4, 5 e 6

Na Figura 4.2(a) é possível observar vários picos de intensidade da radiação difractada. Quando  $d = 15,193\text{\AA}$  ( $2\theta = 5,8$ ) é identificado, com algumas dúvidas, o mineral montmorilonite. Todos os restantes picos de intensidade correspondem ao mineral calcite.

Na Figura 4.2(b) quando  $d = 15,193\text{\AA}$  ( $2\theta = 5,8$ ) é identificado, à semelhança da amostra 1 também com algumas dúvidas, o mineral montmorilonite. Para  $d = 3,347\text{\AA}$  ( $2\theta = 26,6$ ) é identificado o mineral quartzo e para  $d = 3,210\text{\AA}$  ( $2\theta = 27,7$ ), anortite. Todos os restantes picos de intensidade correspondem ao mineral calcite.

Na Figura 4.2(c) quando  $d = 15,193\text{\AA}$  ( $2\theta = 5,8$ ) é identificado, à semelhança da amostra 1 e 2 também com algumas dúvidas, o mineral montmorilonite. Entre  $d = 9,451\text{\AA}$  ( $2\theta = 9,451$ ) e  $d = 3,153\text{\AA}$  ( $2\theta = 28,3$ ) é identificado o mineral laumontite (zeólito). Todos os restantes picos de intensidade correspondem ao mineral calcite.

Na Figura 4.3(a) Para  $d = 4,263\text{\AA}$  ( $2\theta = 20,8$ ),  $d = 3,347\text{\AA}$  ( $2\theta = 26,6$ ) e  $d = 1,818\text{\AA}$  ( $2\theta = 50,1$ ) é identificado o mineral quartzo. Todos os restantes picos de intensidade correspondem ao mineral calcite.

Na Figura 4.3(b), à semelhança da amostra 1, 2 e 3 também com algumas dúvidas, é identificado o mineral montmorilonite quando  $d = 15,373\text{\AA}$  ( $2\theta = 5,7$ ). Todos os restantes picos de intensidade correspondem ao mineral calcite.

Na Figura 4.3(c) todos os picos de intensidade correspondem ao mineral calcite.

A Tabela 4.6 mostra a percentagem dos minerais identificados para as diferentes amostras de solo.

Tabela 4.6: Semi-quantificação dos minerais identificados por DRX na fracção fina

Amostra	1	2	3	4	5	6
<b>Anortite (%)</b>	-	1,19	-	-	-	-
<b>Calcite (%)</b>	97,67	96,76	94,94	98,22	97,62	99,7
<b>Montmorilonite (%)</b>	2,33	1,6	0,93	-	1,75	-
<b>Quartzo (%)</b>	-	0,31	-	1,24	-	-
<b>Zeólito (%)</b>	-	-	4,1	-	-	-
<b>Não identificado(%)</b>	-	0,14	0,03	0,54	0,63	0,30

Em todas as amostras a percentagem de calcite é superior a 94 %.

#### 4.1.7 Ensaio de corte directo

Nas estações 2 e 5 não foi possível recolher amostras não alteradas e, conseqüentemente, o ensaio de corte não foi realizado. Na estação 2, localizada a cerca de 70 m da estação 1, as amostras de calcretos tinham fraca possança, impossibilitando o talhe de blocos. O bloco recolhido na estação 5 foi mantido em ambiente húmido e, ainda assim, tinha um aspecto muito compacto, não tendo sido possível cravar com sucesso o molde da caixa de corte e, assim, obter amostra.

Em todos os ensaios de corte rápidos realizados, os provetes foram consolidadas na caixa de corte durante 10 minutos com tensão vertical constante.

Seguidamente, são apresentados sob a forma de tabelas e gráficos os resultados obtidos para as diferentes amostras de solo ensaiadas, encontrando-se no Anexo 7 todos os valores registados. A Figura 4.4 mostra a obtenção da envolvente de rotura e a Tabela 4.7 os valores registados de  $c$  e  $\varphi$ .

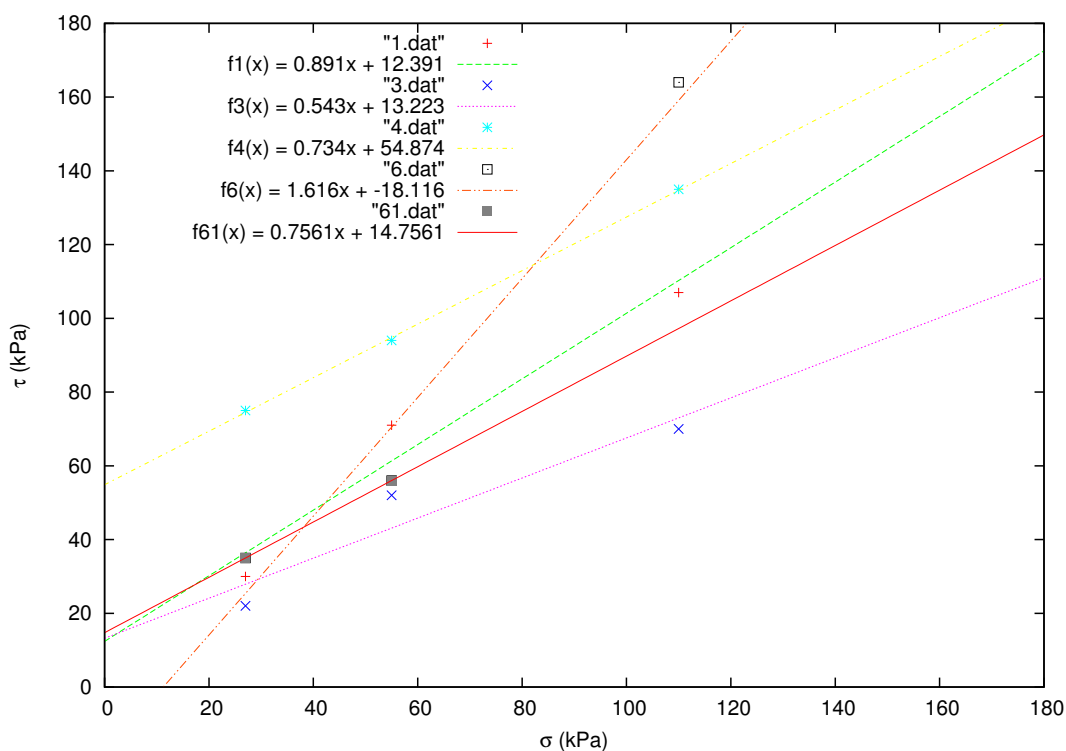


Figura 4.4: Gráfico  $\tau$  vs.  $\sigma$  para os ensaios de corte das amostras

Tabela 4.7: Resultado dos ensaios de corte directo

Amostra	1	3	4	6
$c$ (kPa)	12,4	13,2	54,9	36,9
$\varphi$ (°)	41,7	28,4	36,1	14,8

Nas amostras ensaiadas, a coesão variou entre 12,4 kPa (solo 1) e 54,9 kPa (solo 4), contudo, para a amostra 6 foi de -18,1 kPa. O valor de coesão negativo, que se verificou no provete correspondente à tensão vertical de 110 kPa, pressupõe que, nessa zona, a envolvente de rotura poderá não ser rectilínea, mas sim curva. Dada esta casualidade, decidi considerar-se o referido ponto como um *outlier* e efectuou-se nova análise sem o mesmo. Nessa situação, obteve-se uma coesão de 36,9 kPa, mais concordando com as restantes.

Relativamente ao ângulo de atrito, este variou entre 28,4° para o solo 3 e 41,7° para o solo 1. Considerando o ensaio correspondente ao provete da amostra 6 com  $\sigma = 110$  kPa, o ângulo de atrito obtido é de 58,3°. Desprezando o mesmo valor, o ângulo de atrito baixa consideravelmente para 36,9°, estando assim em conformidade com os restantes.

## 4.2 Discussão

A Tabela 4.8 apresenta os resultados obtidos para cada amostra dos ensaios realizados e a classificação dos solos de acordo com os sistemas AASHTO e Unificado.

Tabela 4.8: Resultados dos ensaios realizados e classificação dos solos

<b>Amostra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>w (%)</b>	20,3	4,3	3,8	10,2	2,4	0,8
<b><math>\gamma</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	26	22	26	27	27	25
<b>W<sub>L</sub></b>	30	37	28	35	28	36
<b>IP</b>	9	6	6	7	3	9
<b>Carbonatos (%)<sup>a</sup></b>	54	64	54	52	61	60
<b>DRX - Calcite (%)<sup>b</sup></b>	97,67	96,76	94,94	98,22	97,62	99,7
<b>c (kPa)</b>	12,4	-	13,2	54,9	-	14,8
<b><math>\varphi</math> (°)</b>	41,7	-	28,4	36,1	-	36,9
<b>Class. AASHTO</b>	A-4	A-4	A-2-4	A-4	A-2-4	A-4
<b>Class. Unificada</b>	CL	SM	SM	SM	SM	SM

<sup>a</sup> A percentagem de carbonatos é calculada para a fracção passada no peneiro 40.

<sup>b</sup> A percentagem de Calcite é calculada para a fracção passada no peneiro 200.

O ensaio granulométrico permite constatar que os solos ensaiados são constituídos por areias médias a finas siltosas. O facto de apresentarem material grosseiro sugere que a sua origem será epigénica, até porque contêm material contaminante proveniente do CIB.

De acordo com a Classificação AASHTO, as amostras 1, 2, 4 e 6 são classificadas como materiais granulares do tipo A-4, o que lhes confere um comportamento regular como leito de fundação de pavimentos. Já as amostras 3 e 5 são classificados como A-2-4, traduzindo um bom comportamento como subleito do pavimento.

Utilizando o Sistema Unificado de Classificação de Solos (ASTM) os solos 2,3,4,5 e 6 são classificados como SM (Areia com silte) e o solo 1 como CL (Argila magra).

De acordo com USDA, 2012 e a norma ASTM D 2487-06, os solos 2, 3, 4, 5 e 6, classificados como SM e o solo 1, classificado como CL apresentam as características expressas na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Algumas características dos solos classificados como SM e CL

<b>Class. Unificada</b>	<b>SM</b>	<b>CL</b>
<b>Amostras</b>	<b>2, 3, 4, 5 e 6</b>	<b>1</b>
<b>Resistência ao corte</b>	Boa a razoável	Razoável
<b>Compressibilidade</b>	Baixa	Média
<b>Trabalhabilidade como materiais de construção</b>	Razoável	Boa a razoável
<b>Permeabilidade quando compactado</b>	Semi-permeável a impermeável ( $k = 10^{-3}$ a $10^{-6}$ cm/s)	Impermeável ( $k = 10^{-6}$ a $10^{-8}$ cm/s)
<b>Resistência à erosão interna em taludes</b>	Fraca a muito fraca	Boa a razoável
<b>Capacidade de deformação plástica sob carga sem corte em taludes</b>	Baixa	Elevada a baixa
<b>Drenagem</b>	Boa	Média
<b>Resistência ao gelo</b>	Média	Média
<b>Expansibilidade</b>	Baixa	Média a baixa

Com base apenas nos ensaios de DRX e nas observações de campo, os calcretos amostrados parecem provir maioritariamente da circulação de águas subterrâneas (estações 2, 4 e 5), eventualmente associados a zonas de fracturação (estações 1, 3 e 6). Concluindo-se que todos os calcretos amostrados sejam epigénicos.

Os ensaios de corte rápidos revelaram que os valores de  $c$  são baixos relativamente aos espectáveis referidos na bibliografia. Já os valores de  $\varphi$  estão compreendidos entre  $28,4^\circ$  (solo 3) e  $41,7^\circ$  (solo 1), estando em conformidade com os sugeridos para solos constituídos pelas classes granulométricas de areias e siltes.

A Figura 4.5 mostra o provete de solo após o ensaio, revelando o plano de corte.



Figura 4.5: Provete de solo submetido a corte

As Tabelas 4.11 e 4.10 mostram a comparação entre os calcretos estudados e os localizados na Turquia e Quênia, respectivamente<sup>1</sup>.

Tabela 4.10: Comparação da percentagem dos principais minerais detectados por DRX das amostras ensaiadas com os calcretos da região de Adana, Turquia (adaptado de Dinçer *et al.*, 2008 e Cobanoğlu *et al.*, 2008)

	Turquia	Solo 1	Solo 2	Solo 3	Solo 4	Solo 5	Solo 6
<b>Calcite (%)</b>	96,80 a 98,70	97,67	96,76	94,94	98,22	97,62	99,7
<b>Quartzo (%)</b>	1,30 a 2,40	-	0,31	-	1,24	-	-

<sup>1</sup>Ver secção 1.2.4

Tabela 4.11: Comparação da gama de valores dos principais parâmetros geotécnicos definidos para os calcretos amostrados e os do NE do Quênia (adaptado de Godana, H. *et al.*, 2010)

	% passada no crivo de malha			$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	W <sub>L</sub>	IP	Class. AASHTO	Carbonatos (%)
	2 mm	0,425 mm	0,075 mm					
<b>El Rage</b>	43	16	13	26	73	36	A-2-7	35
<b>Kargi</b>	42	30	21	27	54	26	A-2-7	30
<b>Solo 1</b>	100	89	59	26	30	9	A-4	54
<b>Solo 2</b>	95	74	41	22	37	6	A-4	64
<b>Solo 3</b>	98	71	19	26	28	6	A-2-4	54
<b>Solo 4</b>	99	81	38	27	35	7	A-4	52
<b>Solo 5</b>	94	64	27	27	28	2	A-2-4	61
<b>Solo 6</b>	99	83	47	24	36	9	A-4	60

Da Tabela 4.10, a mineralogia detectada por DRX é muito semelhante em ambos os casos. Porém, os calcretos de Adana (Turquia), pedogénicos e epigénicos, são classificados como rochas, tendo sido inclusive submetidos a ensaios de caracterização geotécnica de rochas, ao contrário dos alentejanos, que serão epigénicos e essencialmente solos, com algumas passagens mais cimentadas (caso das estações 2 e 5), em particular quando ocorrem sob a forma de vénulas.

Da análise da Tabela 4.11 verifica-se que os calcretos do Alentejo são granulometricamente, em regra, mais finos e menos plásticos, verificando-se que o W<sub>L</sub> é quase metade dos obtidos nas amostras quenianas. Desse modo, os materiais portugueses são, no geral, solos que irão exibir menor tendência para expansão e para colapsar relativamente aos daquela região africana.





## Conclusões

A presente dissertação versa sobre os depósitos carbonáticos designados de duricrustas/calcretos/caliches/caliços que têm cor branca, ocre, amarela, rosada ou vermelha acastanhada, consoante as impurezas que contêm, e às vezes apresentam um aspecto pulverulento. Tratam-se de paleossolos, a maioria dos quais originados durante o Plio-Quaternário, formados sob condições climáticas áridas a semi-áridas, com evaporação elevada, aproveitando condições de porosidade variáveis e, portanto, de permeabilidade nos terrenos que os integram, noutros aproveitando fendas, fracturas e falhas nas rochas encaixantes.

Os calcretos/caliços constituem, geralmente, níveis superficiais ou subsuperficiais, pelo menos aquando da sua formação, e podem ser constituídos a partir de transporte eólico de materiais organogénicos e da alteração química de rochas (p. e. basaltos e gabros, entre muitas outras), de que resultam minerais secundários com carbonatos. Geralmente ocorrem segundo camadas localmente tabulares e formato lenticular a uma escala menor, de espessura irregular, noutros casos consistem em vénulas correspondentes a pequenas fracturas preenchidas aleatoriamente (devido a processos epigénicos).

Especificamente, a dissertação pretende contribuir para a caracterização geotécnica dos calcretos aflorantes no Alentejo, alguns deles interessados no âmbito de obras hidráulicas associadas ao Aproveitamento do Alqueva, mais concretamente na região a poente de Beja, até agora pouco caracterizados do ponto de vista geotécnico, permitindo assim preconizar o seu potencial comportamento em escavações e avaliar a sua potencial reutilização no âmbito de obras geotécnicas. Para tal foram seleccionadas seis estações na envolvente do IP8, entre Beringel e Beja, nas quais foram recolhidas amostras, umas remexidas e outras não alteradas (em bloco) para submeter a posterior caracterização em laboratório. Os calcretos amostrados assentam sobre o Complexo Ígneo de Beja, não

estando apenas associados aos gabros que o integram, mas também a algumas falhas regionais que ali existem. As linhas de drenagem obedecem à orientação (NE-SW) sugerida pela falha de Odemira-Ávila, vulgarmente designada de Messejana.

Os ensaios de laboratório desenrolaram-se seguindo, geralmente, normas nacionais desde que fossem próximas das ASTM (NP-83, NP-143, LNEC E 195, LNEC E 196-1966, ASTM D 3080-04), ou inclusive PIL DCT (sem data), caso tal não se verificasse. Foram realizados os seguintes ensaios:

1. Ensaio índice, como teor em água natural, densidade das partículas sólidas, análise granulométrica com sedimentação, limites de consistência,
2. Ensaio de identificação química e mineralógica, através de determinação do teor em carbonatos e difracção de raios X, e ainda
3. Ensaio para caracterização preliminar dos parâmetros geomecânicos, através do ensaio de corte directo.

As amostras foram recolhidas no mês de Maio, em que se registaram grandes amplitudes térmicas, sendo a temperatura máxima absoluta de 29,7° C e a mínima de 6,2° C. Este facto traduziu-se nos valores em regra baixos obtidos para o teor em água das diversas amostras recolhidas, geralmente inferiores a 10 % e até um mínimo de 0,8 % (solo 6), à excepção do solo proveniente da estação 1, que fora recolhido durante uma manhã após um certo período de pluviosidade e que rondou os 20 %.

O peso volúmico das amostras enquadra-se nos valores expectáveis para materiais areno-siltosos com grau de cimentação variável, variando entre 22 kN/m<sup>3</sup> (solo 2) e 27 kN/m<sup>3</sup> (solos 4 e 5). As variações observadas resultam da contaminação dos calcretos por outras litologias às quais estes estão associados, nomeadamente os minerais mais ferromagnesianos dos gabros.

A análise granulométrica, por crivagem e sedimentação, revelou que se tratam de solos de granulometria extensa e que, em todas as amostras, a percentagem predominante das partículas se enquadra na fracção areia média a fina (variando entre 47 % para o solo 1 e 81 % para o solo 3), com uma percentagem ainda relevante de silte (variando entre 14 % para o solo 3 e 46 % para o solo 1). A maior percentagem de areia deve-se à evolução dos calcretos na dependência dos saprólitos de gabros. As quebras registadas nas curvas granulométricas das várias amostras não são devidas tanto à falta de material da gama correspondente, mas provavelmente à falta de experiência do operador nas leituras do densímetro e às dificuldades de leitura devido à espuma das amostras ensaiadas.

A determinação dos limites de consistência veio confirmar que todas as amostras apresentam nível de plasticidade baixo, com valores de  $W_L$  e  $W_P$  próximos. O IP varia entre 3% (solo 5) e 9% (solos 1 e 6).

Utilizando o Sistema Unificado de Classificação de Solos (ASTM D 2487-09), as amostras 2, 3, 4, 5 e 6 são classificadas como SM (Areia com silte) e a amostra 1 como CL (Argila magra). As amostras classificadas como SM, quando compactadas, irão apresentar um

comportamento semipermeável a impermeável, resistência ao corte boa e compressibilidade baixa, sendo a trabalhabilidade razoável. O solo CL, nas mesmas condições, é impermeável, com resistência ao corte razoável, compressibilidade média e trabalhabilidade boa a razoável. Este comportamento é sublinhado por estudos internacionais, mormente realizados em África, que indicam estes materiais como adequados para reutilizar na construção de aterros rodoviários.

De acordo com a Classificação AASHTO (ASTM D 3282-06), as amostras 1, 2, 4 e 6 são classificadas como materiais silto-argilosos do tipo A-4, o que lhes confere um comportamento regular como leito de fundação de pavimentos. Já as amostras 3 e 5 são classificados como materiais granulares do tipo A-2-4, traduzindo um bom comportamento como subleito do pavimento.

O ensaio para a determinação do teor em carbonatos<sup>1</sup> veio confirmar que todas as amostras se tratavam de depósitos carbonáticos, revelando teores compreendidos entre 52% (solo 4) e 64% (solo 2).

A análise de difracção de raios X<sup>2</sup> veio confirmar que o principal mineral presente nos calcretos ensaiados é a calcite, estando claramente identificada em todas as análises para as amostras das diferentes estações. Acresce que a análise granulométrica faz prever que na fracção fina a calcite está presente maioritariamente na dimensão silte. Nas amostras 1, 2, 3 e 5 foi identificado o mineral montmorilonite, todavia com algumas dúvidas. Nas amostras 2 e 4 foi detectado quartzo e, no solo 2, anortite. O mineral laumontite (zeólito) foi ainda identificado no solo 3. Esta constituição faz antever uma origem epigénica relacionada com o CIB e respectiva evolução tectónica, mormente na estação 3.

O ensaio de corte directo foi realizado em provetes obtidos a partir das amostras 1, 3, 4 e 6, face à impossibilidade de recolha de amostras por talhe nas restantes duas estações. Houve necessidade de, durante a montagem das amostras na caixa de corte, recorrer à colmatação de cavidades com solo extra, podendo, eventualmente, ter ocorrido compactação das mesmas. Foi neste ensaio que os resultados se revelaram mais divergentes e, consequentemente, menos característicos. A Tabela 5.1 resume os resultados dos valores dos parâmetros de resistência ao corte nas amostras ensaiadas.

Tabela 5.1: Resultado dos ensaios de corte directo

<b>Amostra</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>6</b>
<b>c (kPa)</b>	12,4	13,2	54,9	14,8
<b><math>\varphi</math> (°)</b>	41,7	28,4	36,1	36,9

A natureza destes solos, misturas de areias médias a finas com siltes, com plasticidade baixa e fraca coesão, fazem antever a probabilidade de apresentarem uma susceptibilidade a fenómenos de erosão significativa, quer no que respeita a erosão por águas

<sup>1</sup>A percentagem de carbonatos é calculada para a fracção passada no peneiro 40.

<sup>2</sup>A percentagem de Calcite é calculada para a fracção passada no peneiro 200.

de escorrência superficial, quer por águas internas, que se escoam no subsolo, devendo estes fenómenos ser devidamente acautelados por medidas de protecção contra a erosão:

1. À superfície, nomeadamente por revestimento de taludes com terra vegetal e revestimento de valetas;
2. Em profundidade, por adopção de dispositivos de drenagem interna adequados aos caudais envolvidos.

Acresce que parecem tratar-se de solos eventualmente colapsíveis, isto é, de materiais cujo comportamento mecânico irá variar substancialmente com o teor em água que apresentarem, entre o estado seco e saturado, podendo apresentar subsidências bruscas por escavações subterrâneas, liquefacção devido a sismos e deformação de aterros deficientemente compactados.

Neste contexto e com vista a aprofundar a caracterização geotécnica deste comportamento, aconselha-se a ampliação da gama de ensaios de laboratório a realizar, a curto prazo, nomeadamente através de identificação química (p. e. fluorescência de raios X) para avaliar do eventual contributo de materiais do CIB nos calcretos ensaiados, bem como ensaios de dispersividade para avaliar a respectiva colapsabilidade. Acresce que se impõe a realização de uma cartografia das manchas de calcretos, numa escala grande, na região em apreço.

## Referências Bibliográficas

- Almeida, C., Mendonça, J., Jesus, M. e Gomes, A. "Sistema Aquífero: Gabros de Beja (A9)". Em: *Sistemas Aquíferos de Portugal Continental*. Instituto da Água, 2000, pp. 100–107.
- Almeida, E. "Caracterização Electromagnética da Zona de Ossa Morena". Tese de doutoramento. Portugal: Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2010. 225 pp.
- Antunes, A. "Rochas Granitóides da Zona de Ossa Morena: magmatismo, geodinâmica e reconstituição geohistórica". Tese de mestrado. Portugal: Universidade de Aveiro, 2006. 178 pp.
- ASTM. *D 3080 – 04: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. 2004.
- ASTM. *D 2487 – 06: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. 2006.
- ASTM. *D 3282 – 09: Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*. 2009.
- Birkeland, P. W. "Soils and Geomorphology". Em: *Oxford University Press* 3 (1999), pp. 175–188.
- Cobanoglu, I., Bozdog, S. e Kumsar, H. "Microstructural, geochemical and geomechanical properties of caliche deposits from the Adana Basin, Turkey". Em: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 67 (2008), pp. 367–374.

- Colson, J. e Cojan, I. "Groundwater dolocretes in a lake-marginal environment: an alternative model for dolocrete formation in continental settings (Danian of the Provence Basin, France)". Em: *Sedimentology* 43 (1996), pp. 175–188.
- Dias, J. *A análise sedimentar e o conhecimento dos sistemas marinhos*. Faro: Universidade do Algarve, 2004.
- Dias, R. P., Pais, J., Barbosa, B. e Piçarra, J. "Nova interpretação dos calcários do Cano-Casa Branca (nota preliminar)". Em: *Livro de Resumos*. Ed. por Mirão, J. e Balbino, A. C. Vol. II. VII Congresso Nacional de Geologia, 2006, pp. 629–632.
- Dinçer, I., Acar, A. e Ural, S. "Estimation of strength and deformation properties of Quaternary caliche deposits". Em: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 67 (2008), pp. 353–366.
- Estêvão, C. "O Património Geológico em Áreas Protegidas no Maciço Ibérico: Inventariação de Geossítios baseada em pesquisa bibliográfica". Tese de mestrado. Portugal: Universidade do Minho, 2010. 154 pp.
- Feio, M. *A Evolução do Relevo do Baixo Alentejo e Algarve: Estudo de Martinez Geomorfologia*. Lisboa: Centro de Estudos Geográficos, 1952. 186 pp.
- Feio, M. "Geomorfologia". Em: *Carta Geológica de Portugal, escala 1:200 000 - Notícia Explicativa da Folha 7*. Ed. por Oliveira, J. T. C. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal, 1984, pp. 11–16.
- Fernandes, M. *Mecânica dos Solos - Conceitos e Princípios Fundamentais*. Vol. 1. Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006, pp. 64–66. ISBN: 978-972-752-086-2.
- Ferreira, A. "Dados Geoquímicos de Base de Sedimentos Fluviais de Amostragem de Baixa Densidade de Portugal Continental: Estudo de Factores de Variação Regional". Tese de doutoramento. Portugal: Universidade de Aveiro, 2000. 234 pp.
- GEOL615. *Some Useful Numbers on the Engineering Properties of Materials (Geologic and Otherwise)*. [Consultado a 18 de Setembro de 2013]. 2013. URL: <http://www.stanford.edu/~tyzhu/Documents/Some%20Useful%20Numbers.pdf>.

Godana, H., Mwatelah, J. e Abiero-Gariy, Z. "Suitability of calcrete as a road construction material for low volume roads in the arid and semi-arid regions: case study Northeastern Kenya". Em: *Journal of Agriculture, Science and Technology* 12 (2010), pp. 110–126.

Goudie, A. S. "Calcrete". Em: *Chemical Sediments and Geomorphology*. Ed. por Goudie, A. S. e Pye, K. Vol. 184. London: Academic Press, 1983, pp. 93–131.

IPMA. *Boletim Climatológico Mensal - Portugal Continental*. [Consultado a 2 de Setembro de 2013]. URL: [http://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20131028/bJtVeZnWzSAMvUCLNomu/cli\\_20130501\\_20130531\\_pcl\\_mm\\_co\\_pt.pdf](http://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20131028/bJtVeZnWzSAMvUCLNomu/cli_20130501_20130531_pcl_mm_co_pt.pdf).

Jiménez-Espinosa, R. e Jiménez-Millan, J. "Cálcrete development in mediterranean coluvial carbonate systems from SE Spain". Em: *Journal of Arid Environments* 53 (2003), pp. 479–489.

LNEC. *Norma Portuguesa NP-83: Determinação da densidade das partículas*. 1965.

LNEC. *Especificação E 195: Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação*. 1966.

LNEC. *Especificação E 196: Análise granulométrica*. 1966.

LNEC. *Norma Portuguesa NP-143: Determinação dos limites de consistência*. 1969.

LNEC. *Especificação E 239: Análise granulométrica por peneiração húmida*. 1970.

Mack, G. H., Cole, D. R. e Trevino, L. "The distribution and discrimination of shallow, authigenic carbonates in the Pliocene-Pleistocene Palomas Basin, southern Rio Grande Rift". Em: *Bulletin of the Geological Society of America* 112 (2000), pp. 643–656.

Mack, G. H. e James, W. "Palaeoclimate and global distribution of paleosols". Em: *Journal of Geology* 102 (1994), pp. 360–336.

Mateus, A., Munhá, J. M. e Jesus, A. "Mineralizações associadas à sequência gabróica do Complexo Ígneo de Beja". Em: *Ciências Geológicas - Ensino, Investigação e sua História*. Ed. por Noronha, F. C. Vol. II. Geologia e Recursos Geológicos, 2010, pp. 37–46.

Mineral, W. *X-Ray Analysis of a Solid*. [Consultado a 2 de Setembro de 2013]. URL: <http://materials.binghamton.edu/labs/xray/xray.html>.

- Mineral, W. *X-Ray Diffraction of Minerals*. [Consultado a 2 de Setembro de 2013]. URL: <http://webmineral.com/MySQL/xray.php?lambda=1.54056+-+CuKa1&lambda1=&ed1=&ed2=&ed3=&minmax=&chem=CaCO3&submit=Submit+Query#.UpfkoUPbB4V>.
- Nash, D. J. e McLaren, S. J. *Geochemical Sediments and Landscapes*. United Kingdom: Blackwell Publishing Ltd., 2007. 465 pp. ISBN: 978-1-4051-2519-2.
- Paralta, E. "Caracterização Hidrogeológica da Bacia da Ribeira da Chaminé (Aquífero dos Gabros de Beja) (Resultados Preliminares)". Em: *Congresso da Água 4* (1998).
- Paralta, E., Alain, F. e Ribeiro, L. "Avaliação da Vulnerabilidade do Sistema Aquífero dos Gabros de Beja e Análise Crítica das Redes de Monitorização no Contexto da Directiva Quadro da Água". Em: *SILUSBA 7* (2005).
- Pedro, J. "Estudo geológico e geoquímico das sequências Ofiolíticas Internas da Zona de Ossa-Morena (Portugal)". Tese de doutoramento. Portugal: Universidade de Évora, 2004. 225 pp.
- Pedro, J. C., Araújo, A., Fonseca, P. E. e Munhá, J. M. "Sequências ofiolíticas internas da zona de Ossa-Morena: implicações geodinâmicas na evolução da Cadeia Varisca Ibérica". Em: *Geologia e Recursos Geológicos*. Ed. por Noronha, F. C. Vol. 30. Coruña: Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe, 2005, pp. 235–258.
- PORDATA. *Precipitação total em Portugal*. [Consultado a 2 de Agosto de 2013]. 2013. URL: <http://www.pordata.pt/Portugal/Precipitacao+total-1070>.
- PORDATA. *Temperatura média do ar (média anual) em Portugal*. [Consultado a 2 de Agosto de 2013]. 2013. URL: <http://www.pordata.pt/Portugal/Temperatura+media+do+ar+%28media+anual%29-1067>.
- Retallack, G. J. "The environmental approach to the interpretation of paleosols". Em: *Factors of Soil Formation: a Fiftieth Anniversary Retrospective*. Ed. por Amundson, R., Harden, J. e Singer, M. Vol. 33. Madison: Special Publication, 1994, pp. 31–64.
- Retallack, G. J. "Depth to pedogenic carbonate horizon as a paleoprecipitation indicator: comment". Em: *Geology* 28 (2000), pp. 572–573.
- Ribeiro, A. "Evolução geodinâmica de Portugal. Os ciclos ante-mesozóicos". Em: *Geologia de Portugal no contexto da Ibéria*. Ed. por Dias, R., Araújo, A., Terrinha, P. e Kullberg, J. C. Vol. 1. Lisboa: Escolar Editora, 1990, pp. 15–58.

- Ribeiro, A., Quesada, C. e Dallmeyer, R. "Geodynamic evolution of the Iberian Massif". Em: *Pre-Mesozoic geology of Iberia*. Ed. por Dallmeyer, R. D. e Martinez, E. Berlin: Springer-Verlag, 1990, pp. 348–362.
- Rocha, R., Ramalho, E. e Afonso, A. *Estimativa de porosidades em rochas básicas a partir de diagramas eléctricos e nucleares através de dois métodos - um estudo comparativo*. [Consultado a 30 de Agosto de 2013]. 2003. URL: [http://repositorio.lneg.pt/bitstream/10400.9/987/1/Rocha\\_28627CD\\_E50.pdf](http://repositorio.lneg.pt/bitstream/10400.9/987/1/Rocha_28627CD_E50.pdf).
- Royer, D. "Depth to pedogenic carbonate horizons as a paleoprecipitation indicator?" Em: *Geology* 27 (1999), pp. 1123–1126.
- Silva, L. "Reabilitação da Estação de Caminho de Ferro de Casa Branca - Linha do Alentejo". Tese de mestrado. Portugal: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2010. 92 pp.
- Soares, S. M. M. "Contribuição para o conhecimento das características geotécnicas dos gabros de Beja, faixa entre Beringel e Beja". Tese de doutoramento. Portugal: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2012. 252 pp.
- Sousa, P. "Limite de Liquidez - Correlações e comparações entre os métodos de Fall Cone e da Concha de Casagrande". Tese de mestrado. Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, 2011.
- Strong, G. E., Giles, J. R. A. e Wright, V. P. "A Holocene calcrete from North Yorkshire, England: implications for interpreting palaeoclimates using calcretes". Em: *Sedimentology* 39 (1992), pp. 333–347.
- USDA. *Part 650 Engineering Field Handbook - Chapter 4 Elementary Soil Engineering*. Natural Resources Conservation Services, 2012. 50 pp.
- Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. e Oteo, C. *Ingeniería geológica*. Madrid: Prentice Hall, 2002. 715 pp. ISBN: 84-2053104-9.
- Wright, V. P. "Paleosols in shallow marine carbonate sequences". Em: *Earth-Science Reviews* 35 (1994), pp. 367–395.
- Wright, V. P. e Tucker, M. E. "Calcretes: an introduction". Em: *Calcretes*. Ed. por Wright, V. e Tucker, M. E. Oxford: Blackwell Scientific, 1991, pp. 629–632.



# **Anexos**



# Anexo 1 - Determinação do teor em água

Tabela 2: Determinação do teor em água da amostra 1

Número do recipiente	T1C1
$m_1$	32,13
$m_2$	46,97
$m_3$	44,47
$m_a = m_2 - m_3$	2,50
$m_s = m_3 - m_1$	12,34
$w = \frac{m_a}{m_s} \times 100$	<b>20,3</b>

Tabela 3: Determinação do teor em água da amostra 2

Número do recipiente	T1C2
$m_1$	29,31
$m_2$	49,07
$m_3$	48,25
$m_a = m_2 - m_3$	0,82
$m_s = m_3 - m_1$	18,94
$w = \frac{m_a}{m_s} \times 100$	<b>4,3</b>

Tabela 4: Determinação do teor em água da amostra 3

<b>Número do recipiente</b>	<b>T1C3</b>
$m_1$	29,06
$m_2$	44,76
$m_3$	44,18
$m_a = m_2 - m_3$	0,58
$m_s = m_3 - m_1$	15,12
$w = \frac{m_a}{m_s} \times 100$	<b>3,8</b>

Tabela 5: Determinação do teor em água da amostra 4

<b>Número do recipiente</b>	<b>T1C4</b>
$m_1$	31,89
$m_2$	50,55
$m_3$	48,82
$m_a = m_2 - m_3$	1,73
$m_s = m_3 - m_1$	16,93
$w = \frac{m_a}{m_s} \times 100$	<b>10,2</b>

Tabela 6: Determinação do teor em água da amostra 5

<b>Número do recipiente</b>	<b>T1C6</b>
$m_1$	28,37
$m_2$	48,76
$m_3$	48,29
$m_a = m_2 - m_3$	0,47
$m_s = m_3 - m_1$	19,92
$w = \frac{m_a}{m_s} \times 100$	<b>2,4</b>

Tabela 7: Determinação do teor em água da amostra 6

<b>Número do recipiente</b>	<b>T1C7</b>
$m_1$	28,76
$m_2$	50,57
$m_3$	50,39
$m_a = m_2 - m_3$	0,18
$m_s = m_3 - m_1$	21,63
$w = \frac{m_a}{m_s} \times 100$	<b>0,8</b>



## Anexo 2 - Determinação da densidade das partículas

Tabela 8: Determinação da Densidade das Partículas da amostra 1

Número do provete	1A	1B	1C
Número do picnómetro	1	2	3
$m_1$	43,23	44,85	49,42
$m_2$	141,89	144,52	149,02
$t_1$	26	26	26
$d_4^{t_1}$	0,99681	0,99681	0,99681
$t_x$	26	26	26
$d_4^{t_x}$	0,99681	0,99681	0,99681
$m_3 = \frac{d_4^{t_x}}{d_4^{t_1}}(m_2 - m_1) + m_1$	141,89	144,52	149,02
$m_4$	28,98	32,01	30,51
$m_5$	159,95	164,28	168,12
$k$	0,999	0,999	0,999
$d_{20}^{t_x} = \frac{m_4}{m_3 - (m_5 - m_4)} \times k$	2,65	2,61	2,67
$d_{20}^{t_x}$ média		<b>2,64</b>	

Tabela 9: Determinação da Densidade das Partículas da amostra 2

Número do provete	2A	2B	2C
Número do picnómetro	1	2	3
$m_1$	44,85	49,42	44,85
$m_2$	144,52	149,02	144,52
$t_1$	26	26	26
$d_4^{t_1}$	0,99681	0,99681	0,99681
$t_x$	26	26	26
$d_4^{t_x}$	0,99681	0,99681	0,99681
$m_3 = \frac{d_4^{t_x}}{d_4^{t_1}}(m_2 - m_1) + m_1$	144,52	149,02	144,52
$m_4$	29,12	31,56	26,63
$m_5$	159,95	167,02	159,48
$k$	0,999	0,999	0,999
$d_{20}^{t_x} = \frac{m_4}{m_3 - (m_5 - m_4)} \times k$	2,12	2,33	2,28
<b><math>d_{20}^{t_x}</math> média</b>		<b>2,24</b>	

Tabela 10: Determinação da Densidade das Partículas da amostra 3

Número do provete	3A	3B	3C
Número do picnómetro	1	2	3
$m_1$	49,42	43,23	44,85
$m_2$	149,02	141,89	144,52
$t_1$	26	26	26
$d_4^{t_1}$	0,99681	0,99681	0,99681
$t_x$	26	26	26
$d_4^{t_x}$	0,99681	0,99681	0,99681
$m_3 = \frac{d_4^{t_x}}{d_4^{t_1}}(m_2 - m_1) + m_1$	149,02	141,89	144,52
$m_4$	27,97	28,31	31,12
$m_5$	166,57	159,58	163,62
$k$	0,999	0,999	0,999
$d_{20}^{t_x} = \frac{m_4}{m_3 - (m_5 - m_4)} \times k$	2,68	2,66	2,59
<b><math>d_{20}^{t_x}</math> média</b>		<b>2,64</b>	

Tabela 11: Determinação da Densidade das Partículas da amostra 4

Número do provete	4A	4B	4C
Número do picnómetro	1	2	3
$m_1$	44,85	43,23	49,42
$m_2$	144,52	141,89	149,02
$t_1$	26	26	26
$d_4^{t_1}$	0,99681	0,99681	0,99681
$t_x$	26	26	26
$d_4^{t_x}$	0,99681	0,99681	0,99681
$m_3 = \frac{d_4^{t_x}}{d_4^{t_1}}(m_2 - m_1) + m_1$	144,52	141,89	149,02
$m_4$	28,83	27,42	30,03
$m_5$	163,02	159,13	168,11
$k$	0,999	0,999	0,999
$d_{20}^{t_x} = \frac{m_4}{m_3 - (m_5 - m_4)} \times k$	2,79	2,69	2,74
$d_{20}^{t_x}$ média		<b>2,74</b>	

Tabela 12: Determinação da Densidade das Partículas da amostra 5

Número do provete	5A	5B	5C
Número do picnómetro	1	2	3
$m_1$	43,23	44,85	49,42
$m_2$	141,89	144,52	149,02
$t_1$	26	26	26
$d_4^{t_1}$	0,99681	0,99681	0,99681
$t_x$	26	26	26
$d_4^{t_x}$	0,99681	0,99681	0,99681
$m_3 = \frac{d_4^{t_x}}{d_4^{t_1}}(m_2 - m_1) + m_1$	141,89	144,52	149,02
$m_4$	28,93	29,64	28,88
$m_5$	160,31	163,50	167,19
$k$	0,999	0,999	0,999
$d_{20}^{t_x} = \frac{m_4}{m_3 - (m_5 - m_4)} \times k$	2,75	2,78	2,69
<b><math>d_{20}^{t_x}</math> média</b>		<b>2,74</b>	

Tabela 13: Determinação da Densidade das Partículas da amostra 6

Número do provete	6A	6B	6C
Número do picnómetro	1	2	3
$m_1$	43,23	44,85	49,42
$m_2$	141,89	144,52	149,02
$t_1$	26	26	26
$d_4^{t_1}$	0,99681	0,99681	0,99681
$t_x$	26	26	26
$d_4^{t_x}$	0,99681	0,99681	0,99681
$m_3 = \frac{d_4^{t_x}}{d_4^{t_1}}(m_2 - m_1) + m_1$	141,89	144,52	149,02
$m_4$	29,12	29,98	27,65
$m_5$	158,89	162,20	165,82
$k$	0,999	0,999	0,999
$d_{20}^{t_x} = \frac{m_4}{m_3 - (m_5 - m_4)} \times k$	2,40	2,43	2,55
<b><math>d_{20}^{t_x}</math> média</b>		<b>2,46</b>	

# Anexo 3 - Análise granulométrica

## Calibração do Densímetro

### Determinação do Volume

Tabela 14: Determinação do Volume

<b>Volume de água na proveta (cm<sup>3</sup>)</b>	800
<b>Volume após introdução do densímetro (cm<sup>3</sup>)</b>	830
<b>Volume do bolbo V (cm<sup>3</sup>)</b>	30
<b>Peso do densímetro (g)</b>	32,42
<b>Volume do bolbo V (cm<sup>3</sup>)</b>	32,42
<b>Média (cm<sup>3</sup>)</b>	31,21

## Calibração

### Área média A

Tabela 15: Área média A utilizando os traços entre as graduações 100 e 900 cm<sup>3</sup>

<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	800
<b>Distância entre os traços (cm)</b>	27,91
<b>A (cm<sup>2</sup>)</b>	28,70

### Distância h<sub>s</sub>

Tabela 16: Distância  $h_s$

$L_i - L_s$	$h_s$
1,500 - 1,000	6,39
1,500 - 1,100	5,06
1,500 - 1,200	3,75
1,500 - 1,300	2,51
1,500 - 1,400	1,25
1,500 - 1,500	0,00

**Distância d**

$$d = 7,11 \text{ cm}$$

**Distância  $H_s$**

$$H_s = h_s + d$$

**Altura do bolbo h**

$$h = 12,75 \text{ cm}$$

**Profundidade efectiva  $Z_s$**

$$Z_s = H_s + \frac{1}{2} \left( h - \frac{V}{A} \right)$$

Tabela 17: Profundidade correspondente a cada uma das marcas principais de calibração

$L_s$	$h_s$	$H_s$	$Z_s$
1,000	6,39	13,50	19,3306
1,100	5,06	12,17	18,0006
1,200	3,75	10,86	16,6906
1,300	2,51	9,62	15,4506
1,400	1,25	8,36	14,1906
1,500	0,00	7,11	12,9406

Tabela 18: Dados  $L_s$  vs.  $Z_s$

$L_s$	$Z_s$
1,0350	18,8415
1,0340	18,8543
1,0280	18,9308
1,0170	19,0710
1,0140	19,1092
1,0100	19,1602
1,0100	19,1602
1,0020	19,2622
1,0020	19,2622

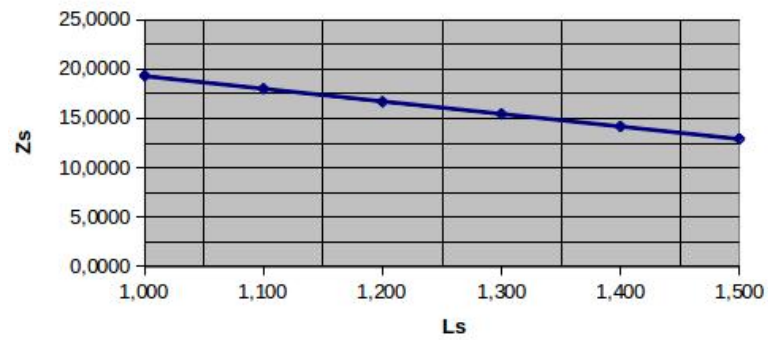


Figura 1: Calibração do densímetro

## Amostra 1

### Peneiração

Tabela 19: Peneiração

<b>Massa total da amostra (g)</b>	449,64
<b>Massa retida no n.º 10 (g)</b>	1,81
<b>% retida no peneiro n.º 10</b>	0,40

Tabela 20: Fração retida no reneiro de 2,00mm (n.º 10)

Peneiros		Massa Retida	% Retida	% Retida Acum.	% Acumulada que Passa
ASTM	mm	(m <sub>x</sub> ) (g)	$N_x = \frac{m_x}{m_t} \times 100$	$N'_x$	$N''_x = 100 - N'_x$
3"	75		0,0	0,0	100,0
2"	50		0,0	0,0	100,0
1 1/2"	37,5		0,0	0,0	100,0
1"	25		0,0	0,0	100,0
3/4"	19		0,0	0,0	100,0
3/8"	9,5		0,0	0,0	100,0
4	4,75		0,0	0,0	100,0
10	2,00	1,81	0,4	0,4	99,6
<10	<2,00	447,83	99,6		
<b>Total</b>		449,64			

Massa de solo após pré-tratamento: m<sub>b</sub> = 112,89g

Tabela 21: Fração passada no peneiro de 2,00mm (n.º 10)

Peneiros		Massa Retida	% Retida	% Retida Acumulada	% Acumulada que passa	% Acumulada que passa (Total)
ASTM	mm	(m <sub>x</sub> ) (g)	$n_x = \frac{m_x}{m_b} \times 100$	$n'_x$	$n''_x = 100 - n'_x$	$N''_x = n''_x \left( \frac{100 - N'_{10}}{100} \right)$
20	0,850	7,28	6,4	6,4	93,6	93,2
40	0,425	5,19	4,6	11,0	89,0	88,6
60	0,250	8,43	7,5	18,5	81,5	81,2
140	0,106	10,70	9,5	28,0	72,0	71,7
200	0,075	14,78	13,1	41,1	58,9	58,7
<200	<0,75	66,51	58,9	100,0	0,0	0,0
<b>Total</b>		449,64				

## Sedimentação

Tabela 22: Sedimentação

Tempo (min)	Temperatura (°C)	Correcção da Temperatura ( $C_T$ )	Leituras do Densímetro ( $L_S$ )	$L_C = L_S + C_M -$ $-C_A + C_T$	$n_D$	$N_D$	$Z_s$	$D = \sqrt[k]{\frac{Z}{t}}$
1	25,0	0,00100	1,0350	1,0360	51,3342	51,1276	18,8415	0,0558
2	25,0	0,00100	1,0340	1,0350	49,9083	49,7074	18,8543	0,0395
5	25,0	0,00100	1,0280	1,0290	41,3526	41,1861	18,9308	0,0250
15	25,0	0,00100	1,0170	1,0180	25,6671	25,5638	19,0710	0,0145
30	25,0	0,00100	1,0140	1,0150	21,3893	21,3032	19,1092	0,0103
60	25,0	0,00100	1,0100	1,0110	15,6855	15,6223	19,1602	0,0073
250	25,0	0,00100	1,0100	1,0110	15,6855	15,6223	19,1602	0,0036
1440	25,0	0,00100	1,0020	1,0030	4,2779	4,2606	19,2622	0,0015
2880	25,0	0,00100	1,0020	1,0030	4,2779	4,2606	19,2622	0,0011

## Amostra 2

### Peneiração

Tabela 23: Peneiração

<b>Massa total da amostra (g)</b>	386,69
<b>Massa retida no n.º 10 (g)</b>	20,04
<b>% retida no peneiro n.º 10</b>	5,18

Tabela 24: Fração retida no reneiro de 2,00mm (n.º 10)

Peneiros		Massa Retida	% Retida	% Retida Acum.	% Acumulada que Passa
ASTM	mm	(m <sub>x</sub> ) (g)	$N_x = \frac{m_x}{m_t} \times 100$	$N'_x$	$N''_x = 100 - N'_x$
3"	75		0,0	0,0	100,0
2"	50		0,0	0,0	100,0
1 1/2"	37,5		0,0	0,0	100,0
1"	25		0,0	0,0	100,0
3/4"	19		0,0	0,0	100,0
3/8"	9,5		0,0	0,0	100,0
4	4,75	3,12	0,8	0,8	99,2
10	2,00	16,92	4,4	5,2	94,8
<10	<2,00	366,65	94,8		
<b>Total</b>		386,69			

Massa de solo após pré-tratamento:  $m_b = 110,00g$

Tabela 25: Fração passada no peneiro de 2,00mm (nº 10)

Peneiros		Massa Retida	% Retida	% Retida Acumulada	% Acumulada que passa	% Acumulada que passa (Total)
ASTM	mm	(m <sub>x</sub> ) (g)	$n_x = \frac{m_x}{m_b} \times 100$	$n'_x$	$n''_x = 100 - n'_x$	$N''_x = n''_x \left( \frac{100 - N'_{10}}{100} \right)$
20	0,850	14,33	13,0	13,0	87,0	82,5
40	0,425	9,38	8,5	21,6	78,4	74,4
60	0,250	11,80	10,7	32,3	67,7	64,2
140	0,106	16,18	14,7	47,0	53,0	50,3
200	0,075	11,23	10,2	57,2	42,8	40,6
<200	<0,75	47,08	42,8	100,0	0,0	0,0
<b>Total</b>		449,64				

### Sedimentação

Tabela 26: Sedimentação

Tempo (min)	Temperatura (°C)	Correcção da Temperatura ( $C_T$ )	Leituras do Densímetro ( $L_S$ )	$L_C = L_S + C_M -$ $-C_A + C_T$	$n_D$	$N_D$	$Z_s$	$D = \sqrt[3]{\frac{Z}{t}}$
1	25,0	0,00100	1,0210	1,0210	36,1290	34,2567	19,0200	0,0598
2	25,0	0,00100	1,0210	1,0210	36,1290	34,2567	19,0200	0,0423
5	25,0	0,00100	1,0190	1,0190	32,8446	31,1424	19,0455	0,0268
15	25,0	0,00100	1,0150	1,0150	26,2757	24,9139	19,0965	0,0155
30	25,0	0,00100	1,0130	1,0130	22,9912	21,7997	19,1220	0,0110
60	25,0	0,00100	1,0100	1,0100	18,0645	17,1283	19,1602	0,0078
250	25,0	0,00100	1,0070	1,0070	13,1378	12,4570	19,1985	0,0038
1440	25,0	0,00100	1,0020	1,0020	4,9267	4,6714	19,2622	0,0016
2880	25,0	0,00100	1,0010	1,0010	3,2845	3,1142	19,2750	0,0011

## Amostra 3

### Peneiração

Tabela 27: Peneiração

<b>Massa total da amostra (g)</b>	451,94
<b>Massa retida no n.º 10 (g)</b>	10,86
<b>% retida no peneiro n.º 10</b>	2,40

Tabela 28: Fração retida no reneiro de 2,00mm (n.º 10)

Peneiros		Massa Retida	% Retida	% Retida Acum.	% Acumulada que Passa
ASTM	mm	(m <sub>x</sub> ) (g)	$N_x = \frac{m_x}{m_t} \times 100$	$N'_x$	$N''_x = 100 - N'_x$
3"	75		0,0	0,0	100,0
2"	50		0,0	0,0	100,0
1 1/2"	37,5		0,0	0,0	100,0
1"	25		0,0	0,0	100,0
3/4"	19		0,0	0,0	100,0
3/8"	9,5		0,0	0,0	100,0
4	4,75	0,61	0,1	0,1	99,9
10	2,00	10,25	2,3	2,4	97,6
<10	<2,00	441,08	97,6		
<b>Total</b>		451,94			

Massa de solo após pré-tratamento:  $m_b = 113,22g$

Tabela 29: Fração passada no peneiro de 2,00mm (n° 10)

Peneiros		Massa Retida	% Retida	% Retida Acumulada	% Acumulada que passa	% Acumulada que passa (Total)
ASTM	mm	(m <sub>x</sub> ) (g)	$n_x = \frac{m_x}{m_b} \times 100$	$n'_x$	$n''_x = 100 - n'_x$	$N''_x = n''_x \left( \frac{100 - N'_{10}}{100} \right)$
20	0,850	18,21	16,1	16,1	83,9	81,9
40	0,425	13,19	11,6	27,7	72,3	70,5
60	0,250	21,07	18,6	46,3	53,7	52,4
140	0,106	16,31	14,4	60,7	39,3	38,3
200	0,075	22,83	20,2	80,9	19,1	18,6
<200	<0,75	21,61	19,1	100,0	0,0	0,0
<b>Total</b>		113,22				

## Sedimentação

Tabela 30: Sedimentação

Tempo (min)	Temperatura (°C)	Correcção da Temperatura ( $C_T$ )	Leituras do Densímetro ( $L_S$ )	$L_C = L_S + C_M -$ $-C_A + C_T$	$n_D$	$N_D$	$Z_s$	$D = \sqrt[k]{\frac{Z}{t}}$
1	25,0	0,00100	1,0110	1,0120	17,0615	16,6516	19,1475	0,0563
2	25,0	0,00100	1,0100	1,0110	15,6397	15,2639	19,1602	0,0398
5	25,0	0,00100	1,0090	1,0100	14,2179	13,8763	19,1730	0,0252
15	25,0	0,00100	1,0070	1,0080	11,3744	11,1010	19,1985	0,0145
30	25,0	0,00100	1,0060	1,0070	9,9526	9,7134	19,2112	0,0103
60	25,0	0,00100	1,0040	1,0050	7,1090	6,9381	19,2367	0,0073
250	25,0	0,00100	1,0020	1,0030	4,2654	4,1629	19,2622	0,0036
1440	25,0	0,00100	1,0010	1,0020	2,8436	2,7753	19,2750	0,0015
2880	25,0	0,00100	1,0000	1,0010	1,4218	1,3876	19,2877	0,0011

## Amostra 4

### Peneiração

Tabela 31: Peneiração

<b>Massa total da amostra (g)</b>	391,42
<b>Massa retida no n.º 10 (g)</b>	2,30
<b>% retida no peneiro n.º 10</b>	0,59

Tabela 32: Fração retida no reneiro de 2,00mm (n.º 10)

Peneiros		Massa Retida	% Retida	% Retida Acum.	% Acumulada que Passa
ASTM	mm	( $m_x$ ) (g)	$N_x = \frac{m_x}{m_t} \times 100$	$N'_x$	$N''_x = 100 - N'_x$
3"	75		0,0	0,0	100,0
2"	50		0,0	0,0	100,0
1 1/2"	37,5		0,0	0,0	100,0
1"	25		0,0	0,0	100,0
3/4"	19		0,0	0,0	100,0
3/8"	9,5		0,0	0,0	100,0
4	4,75		0,0	0,0	100,0
10	2,00	2,30	0,6	0,6	99,4
<10	<2,00	389,12	99,4		
<b>Total</b>		391,42			

Massa de solo após pré-tratamento:  $m_b = 112,70g$

Tabela 33: Fração passada no peneiro de 2,00mm (nº 10)

Peneiros		Massa Retida	% Retida	% Retida Acumulada	% Acumulada que passa	% Acumulada que passa (Total)
ASTM	mm	(m <sub>x</sub> ) (g)	$n_x = \frac{m_x}{m_b} \times 100$	$n'_x$	$n''_x = 100 - n'_x$	$N''_x = n''_x \left( \frac{100 - N'_{10}}{100} \right)$
20	0,850	7,67	6,8	6,8	93,2	92,6
40	0,425	9,10	8,1	14,9	85,1	84,6
60	0,250	18,39	16,3	31,2	68,8	68,4
140	0,106	14,81	13,1	44,3	55,7	55,3
200	0,075	19,24	17,1	61,4	38,6	38,4
<200	<0,75	43,49	38,6	100,0	0,0	0,0
<b>Total</b>		112,70				

### Sedimentação

Tabela 34: Sedimentação

Tempo (min)	Temperatura (°C)	Correcção da Temperatura ( $C_T$ )	Leituras do Densímetro ( $L_S$ )	$L_C = L_S + C_M -$ $-C_A + C_T$	$n_D$	$N_D$	$Z_s$	$D = \sqrt[3]{\frac{Z}{t}}$
1	25,0	0,00100	1,0260	1,0270	37,7260	37,5044	18,9563	0,0544
2	25,0	0,00100	1,0250	1,0260	36,3288	36,1153	18,9690	0,0385
5	25,0	0,00100	1,0220	1,0230	32,1370	31,9482	19,0073	0,0244
15	25,0	0,00100	1,0080	1,0090	12,5753	12,5015	19,1857	0,0141
30	25,0	0,00100	1,0020	1,0030	4,1918	4,1672	19,2622	0,0100
60	25,0	0,00100	1,0020	1,0030	4,1918	4,1672	19,2622	0,0071
250	25,0	0,00100	1,0010	1,0020	2,7945	2,7781	19,2750	0,0035
1440	25,0	0,00100	1,0010	1,0020	2,7945	2,7781	19,2750	0,0014
2880	25,0	0,00100	1,0000	1,0010	1,3973	1,3891	19,2877	0,0010

## Amostra 5

### Peneiração

Tabela 35: Peneiração

<b>Massa total da amostra (g)</b>	462,32
<b>Massa retida no n.º 10 (g)</b>	28,6
<b>% retida no peneiro n.º 10</b>	6,19

Tabela 36: Fração retida no reneiro de 2,00mm (n.º 10)

Peneiros		Massa Retida	% Retida	% Retida Acum.	% Acumulada que Passa
ASTM	mm	(m <sub>x</sub> ) (g)	$N_x = \frac{m_x}{m_t} \times 100$	$N'_x$	$N''_x = 100 - N'_x$
3"	75		0,0	0,0	100,0
2"	50		0,0	0,0	100,0
1 1/2"	37,5		0,0	0,0	100,0
1"	25		0,0	0,0	100,0
3/4"	19		0,0	0,0	100,0
3/8"	9,5		0,0	0,0	100,0
4	4,75	6,73	1,5	1,5	98,5
10	2,00	21,88	4,7	6,2	93,8
<10	<2,00	433,71	93,8		
<b>Total</b>		462,32			

Massa de solo após pré-tratamento:  $m_b = 113,29g$

Tabela 37: Fração passada no peneiro de 2,00mm (n° 10)

Peneiros		Massa Retida	% Retida	% Retida Acumulada	% Acumulada que passa	% Acumulada que passa (Total)
ASTM	mm	(m <sub>x</sub> ) (g)	$n_x = \frac{m_x}{m_b} \times 100$	$n'_x$	$n''_x = 100 - n'_x$	$N''_x = n''_x \left( \frac{100 - N'_{10}}{100} \right)$
20	0,850	22,29	19,7	19,7	80,3	75,4
40	0,425	13,65	12,0	31,7	68,3	64,1
60	0,250	11,50	10,2	41,9	58,1	54,5
140	0,106	16,99	15,0	56,9	43,1	40,5
200	0,075	15,78	13,9	70,8	29,2	27,4
<200	<0,75	33,08	29,2	100,0	0,0	0,0
<b>Total</b>		113,29				

## Sedimentação

Tabela 38: Sedimentação

Tempo (min)	Temperatura (°C)	Correcção da Temperatura ( $C_T$ )	Leituras do Densímetro ( $L_S$ )	$L_C = L_S + C_M -$ $-C_A + C_T$	$n_D$	$N_D$	$Z_s$	$D = \sqrt[k]{\frac{Z}{t}}$
1	25,0	0,00100	1,0140	1,0150	20,8498	19,5600	19,1092	0,0546
2	25,0	0,00100	1,0100	1,0110	15,2898	14,3440	19,1602	0,0387
5	25,0	0,00100	1,0080	1,0090	12,5099	11,7360	19,1857	0,0245
15	25,0	0,00100	1,0080	1,0090	12,5099	11,7360	19,1857	0,0141
30	25,0	0,00100	1,0070	1,0080	11,1199	10,4320	19,1985	0,0100
60	25,0	0,00100	1,0070	1,0080	11,1199	10,4320	19,1985	0,0071
250	25,0	0,00100	1,0040	1,0050	6,9499	6,5200	19,2367	0,0035
1440	25,0	0,00100	1,0010	1,0020	2,7800	2,6080	19,2750	0,0014
2880	25,0	0,00100	1,0000	1,0010	1,3900	1,3040	19,2877	0,0010

## Amostra 6

### Peneiração

Tabela 39: Peneiração

<b>Massa total da amostra (g)</b>	471,44
<b>Massa retida no n.º 10 (g)</b>	2,79
<b>% retida no peneiro n.º 10</b>	0,59

Tabela 40: Fração retida no reneiro de 2,00mm (n.º 10)

Peneiros		Massa Retida	% Retida	% Retida Acum.	% Acumulada que Passa
ASTM	mm	( $m_x$ ) (g)	$N_x = \frac{m_x}{m_t} \times 100$	$N'_x$	$N''_x = 100 - N'_x$
3"	75		0,0	0,0	100,0
2"	50		0,0	0,0	100,0
1 1/2"	37,5		0,0	0,0	100,0
1"	25		0,0	0,0	100,0
3/4"	19		0,0	0,0	100,0
3/8"	9,5		0,0	0,0	100,0
4	4,75		0,0	0,0	100,0
10	2,00	2,79	0,6	0,6	99,4
<10	<2,00	468,65	99,4		
<b>Total</b>		471,44			

Massa de solo após pré-tratamento:  $m_b = 109,96g$

Tabela 41: Fração passada no peneiro de 2,00mm (nº 10)

Peneiros		Massa Retida	% Retida	% Retida Acumulada	% Acumulada que passa	% Acumulada que passa (Total)
ASTM	mm	(m <sub>x</sub> ) (g)	$n_x = \frac{m_x}{m_b} \times 100$	$n'_x$	$n''_x = 100 - n'_x$	$N''_x = n''_x \left( \frac{100 - N'_{10}}{100} \right)$
20	0,850	9,61	8,7	8,7	91,3	90,7
40	0,425	8,59	7,8	16,6	83,4	83,0
60	0,250	10,49	9,5	26,1	73,9	73,5
140	0,106	15,69	14,3	40,4	59,6	59,3
200	0,075	13,30	12,1	52,5	47,5	47,3
<200	<0,75	52,28	47,5	100,0	0,0	0,0
<b>Total</b>		109,96				

### Sedimentação

Tabela 42: Sedimentação

Tempo (min)	Temperatura (°C)	Correcção da Temperatura ( $C_T$ )	Leituras do Densímetro ( $L_S$ )	$L_C = L_S + C_M -$ $-C_A + C_T$	$n_D$	$N_D$	$Z_s$	$D = \sqrt[3]{\frac{Z}{t}}$
1	25,0	0,00100	1,0280	1,0290	44,4371	44,1741	18,9308	0,0597
2	25,0	0,00100	1,0260	1,0270	41,3725	41,1276	18,9563	0,0422
5	25,0	0,00100	1,0250	1,0260	39,8401	39,6044	18,9690	0,0267
15	25,0	0,00100	1,0190	1,0200	30,6463	30,4649	19,0455	0,0155
30	25,0	0,00100	1,0170	1,0180	27,5816	27,4184	19,0710	0,0109
60	25,0	0,00100	1,0160	1,0170	26,0493	25,8952	19,0837	0,0077
250	25,0	0,00100	1,0100	1,0110	16,8554	16,7557	19,1602	0,0038
1440	25,0	0,00100	1,0070	1,0080	12,2585	12,1860	19,1985	0,0016
2880	25,0	0,00100	1,0060	1,0070	10,7262	10,6627	19,2112	0,0011

# Anexo 4 - Determinação dos limites de consistência

Tabela 43: Determinação do Limite de Liquidez da amostra 1

Número do recipiente	11	12	13	14
$m_1$	10,05	10,84	10,86	11,07
$m_2$	18,56	21,06	19,55	19,83
$m_3$	16,64	18,48	17,40	17,80
$m_a = m_2 - m_3$	1,92	2,58	2,15	2,03
$m_s = m_3 - m_1$	6,59	7,64	6,54	6,73
$w = \frac{m_a}{m_s} \times 100$	29,1	33,8	32,9	30,2
Número de pancadas	29	12	13	26
<b>Limite de Liquidez</b>	<b>30</b>			

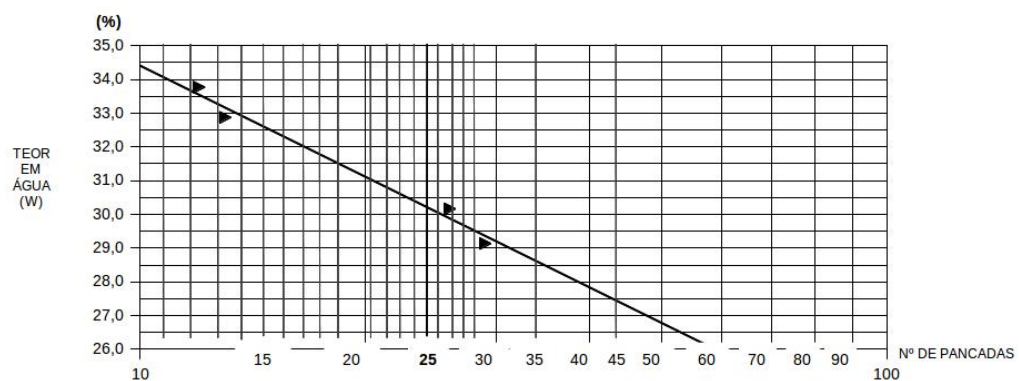


Figura 2: Gráfico para determinação do Limite de Liquidez da amostra 1

Tabela 44: Determinação do Limite de Plasticidade da amostra 1

Número do recipiente	1A	1B	1C	1D
$m_1$	24,11	20,70	11,03	23,03
$m_2$	26,39	21,77	12,09	24,28
$m_3$	25,95	21,59	11,90	24,08
$m_a = m_2 - m_3$	0,44	0,18	0,19	0,20
$m_s = m_3 - m_1$	1,84	0,89	0,87	1,05
$w = \frac{m_a}{m_s} \times 100$	23,9	20,2	21,8	19,0
<b>Limite de Plasticidade</b>	<b>21</b>			

Tabela 45: Determinação do Limite de Liquidez da amostra 2

Número do recipiente	21	22	23	24
$m_1$	21,15	8,42	8,54	10,96
$m_2$	30,28	17,97	18,84	21,82
$m_3$	28,19	15,76	15,76	18,36
$m_a = m_2 - m_3$	2,09	2,21	3,08	3,46
$m_s = m_3 - m_1$	7,04	7,34	7,22	7,40
$w = \frac{m_a}{m_s} \times 100$	29,7	30,1	42,7	46,8
<b>Número de pancadas</b>	40	31	13	11
<b>Limite de Liquidez</b>	<b>37</b>			

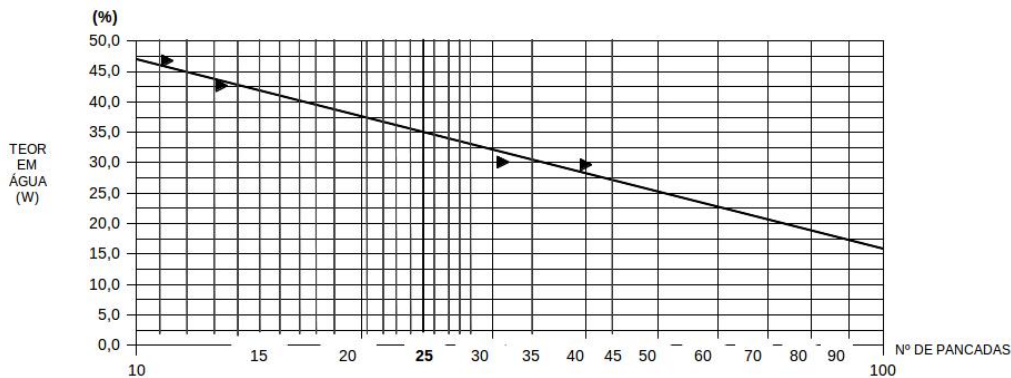


Figura 3: Gráfico para determinação do Limite de Liquidez da amostra 2

Tabela 46: Determinação do Limite de Plasticidade da amostra 2

Número do recipiente	2A	2B	2C	2D
$m_1$	9,45	20,64	18,19	20,68
$m_2$	10,60	21,06	19,38	21,84
$m_3$	10,35	20,96	19,12	21,55
$m_a = m_2 - m_3$	0,25	0,10	0,26	0,29
$m_s = m_3 - m_1$	0,90	0,32	0,93	0,87
$w = \frac{m_a}{m_s} \times 100$	27,8	31,2	28,0	33,3
<b>Limite de Plasticidade</b>	<b>30</b>			

Tabela 47: Determinação do Limite de Liquidez da amostra 3

Número do recipiente	31	32	33	34
$m_1$	4,50	4,70	4,66	9,22
$m_2$	17,53	12,53	13,45	16,18
$m_3$	14,41	10,71	11,54	14,72
$m_a = m_2 - m_3$	3,12	1,82	1,91	1,46
$m_s = m_3 - m_1$	9,91	6,01	6,88	5,50
$w = \frac{m_a}{m_s} \times 100$	31,5	30,3	27,8	26,5
Número de pancadas	10	15	27	36
<b>Limite de Liquidez</b>	<b>28</b>			

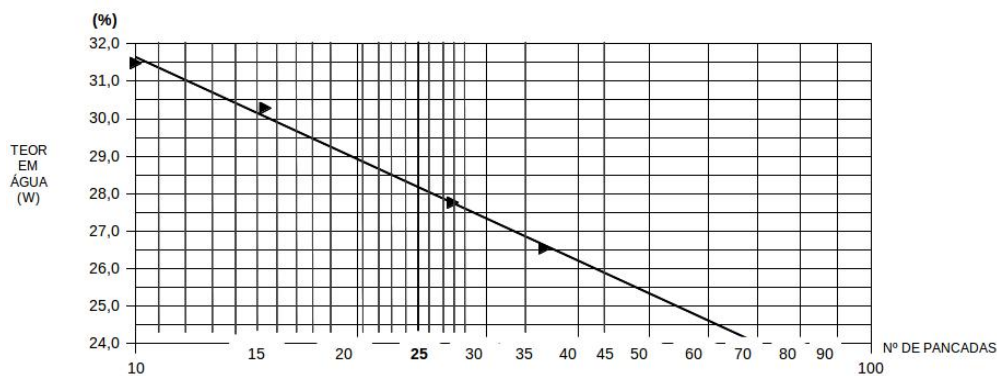


Figura 4: Gráfico para determinação do Limite de Liquidez da amostra 3

Tabela 48: Determinação do Limite de Plasticidade da amostra 3

Número do recipiente	3A	3B	3C	3D
$m_1$	4,70	4,45	4,39	4,71
$m_2$	5,57	4,94	5,27	5,49
$m_3$	5,40	4,85	5,10	5,36
$m_a = m_2 - m_3$	0,17	0,09	0,17	0,13
$m_s = m_3 - m_1$	0,70	0,40	0,71	0,65
$w = \frac{m_a}{m_s} \times 100$	24,3	22,5	23,9	20,0
<b>Limite de Plasticidade</b>	<b>23</b>			

Tabela 49: Determinação do Limite de Liquidez da amostra 4

Número do recipiente	41	42	43	44
$m_1$	4,66	14,57	4,72	4,56
$m_2$	12,19	21,61	10,10	13,00
$m_3$	10,37	19,79	8,70	10,70
$m_a = m_2 - m_3$	1,82	1,82	1,40	2,30
$m_s = m_3 - m_1$	5,71	5,22	3,98	6,14
$w = \frac{m_a}{m_s} \times 100$	31,9	34,9	35,2	37,5
Número de pancadas	34	29	23	11
<b>Limite de Liquidez</b>	<b>35</b>			

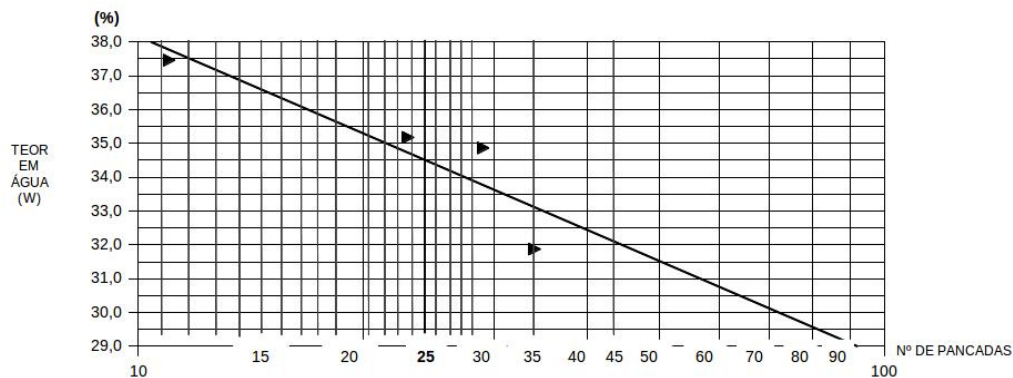


Figura 5: Gráfico para determinação do Limite de Liquidez da amostra 4

Tabela 50: Determinação do Limite de Plasticidade da amostra 4

Número do recipiente	4A	4B	4C	4D
$m_1$	8,34	14,81	9,32	12,04
$m_2$	9,05	15,31	9,82	12,97
$m_3$	8,89	15,21	9,71	12,76
$m_a = m_2 - m_3$	0,16	0,10	0,11	0,21
$m_s = m_3 - m_1$	0,55	0,40	0,39	0,72
$w = \frac{m_a}{m_s} \times 100$	29,1	25,0	28,2	29,2
<b>Limite de Plasticidade</b>	<b>28</b>			

Tabela 51: Determinação do Limite de Liquidez da amostra 5

Número do recipiente	51	52	53	54
$m_1$	4,61	4,74	10,16	4,56
$m_2$	26,10	15,43	17,99	15,87
$m_3$	21,32	13,29	16,29	13,11
$m_a = m_2 - m_3$	4,78	2,14	1,70	2,76
$m_s = m_3 - m_1$	16,71	8,55	6,13	8,55
$w = \frac{m_a}{m_s} \times 100$	28,6	25,0	27,7	32,3
Número de pancadas	19	38	25	11
<b>Limite de Liquidez</b>	<b>28</b>			

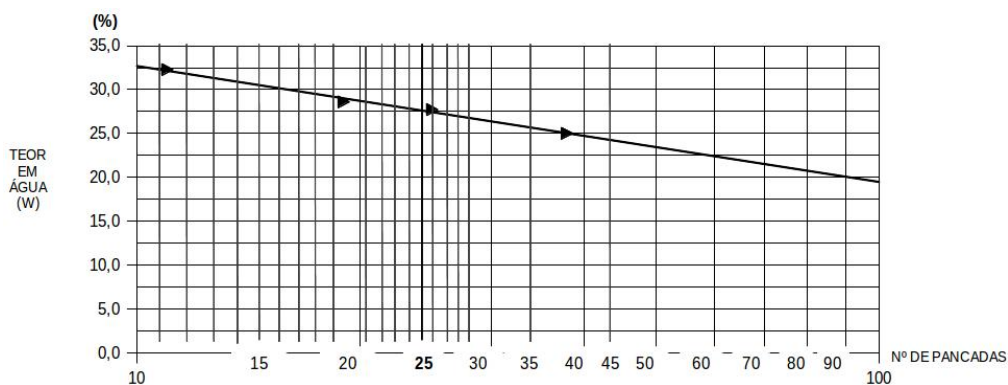


Figura 6: Gráfico para determinação do Limite de Liquidez da amostra 5

Tabela 52: Determinação do Limite de Plasticidade da amostra 5

Número do recipiente	5A	5B	5C	5D
$m_1$	8,93	8,84	8,98	10,27
$m_2$	10,08	9,67	9,55	11,11
$m_3$	9,87	9,49	9,44	10,94
$m_a = m_2 - m_3$	0,21	0,18	0,11	0,17
$m_s = m_3 - m_1$	0,94	0,65	0,46	0,67
$w = \frac{m_a}{m_s} \times 100$	22,3	27,7	23,9	25,4
<b>Limite de Plasticidade</b>	<b>25</b>			

Tabela 53: Determinação do Limite de Liquidez da amostra 6

Número do recipiente	61	62	63	64
$m_1$	4,69	4,71	10,28	4,79
$m_2$	27,28	19,13	18,33	19,61
$m_3$	22,32	15,79	16,29	14,97
$m_a = m_2 - m_3$	4,96	3,34	2,04	4,64
$m_s = m_3 - m_1$	17,63	11,08	6,01	10,18
$w = \frac{m_a}{m_s} \times 100$	28,1	30,1	33,9	45,6
<b>Número de pancadas</b>	38	31	24	13
<b>Limite de Liquidez</b>	<b>36</b>			

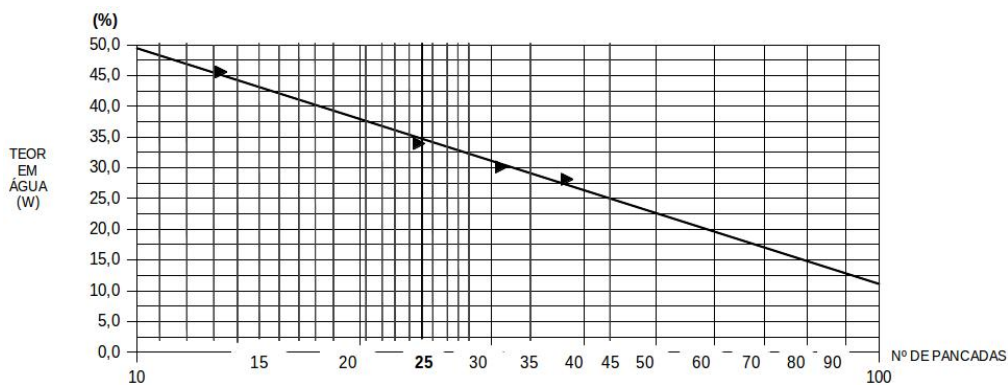


Figura 7: Gráfico para determinação do Limite de Liquidez da amostra 6

Tabela 54: Determinação do Limite de Plasticidade da amostra 6

<b>Número do recipiente</b>	<b>6A</b>	<b>6B</b>	<b>6C</b>	<b>5D</b>
$m_1$	10,38	10,41	10,68	9,29
$m_2$	12,19	12,75	11,91	10,39
$m_3$	11,81	12,21	11,66	10,18
$m_a = m_2 - m_3$	0,38	0,54	0,25	0,21
$m_s = m_3 - m_1$	1,43	1,80	0,98	0,89
$w = \frac{m_a}{m_s} \times 100$	26,6	30,0	25,5	23,6
<b>Limite de Plasticidade</b>	<b>26</b>			



## Anexo 5 - Determinação do teor em carbonatos

Tabela 55: Determinação do Teor em Carbonatos 1

	1	2	3	4	5	6
<b>Peso recipientes</b>	61,24	101,98	105,25	144,46	145,95	145,64
<b>Peso recipientes + Solo seco</b>	81,91	111,10	115,02	164,77	165,91	165,21
<b>Peso solo seco</b>	20,66	9,12	9,77	20,32	19,95	19,57
<b>Peso recipientes + Hcl + solo seco</b>	71,21	105,66	110,13	154,09	154,52	154,32
<b>Peso Hcl + solo seco</b>	9,96	3,68	4,88	9,64	8,56	8,68
<b>% carbonatos</b>	51,79	59,65	50,06	52,56	57,09	55,65

Tabela 56: Determinação do Teor em Carbonatos 2

	1A	2A	3A	4A	5A	6A
<b>Peso recipientes</b>	189,41	192,09	182,81	167,15	195,18	191,34
<b>Peso recipientes + Solo seco</b>	200,79	202,23	192,03	177,36	205,15	202,86
<b>Peso solo seco</b>	11,38	10,14	9,22	10,21	9,97	11,52
<b>Peso recipientes + Hcl + solo seco</b>	194,45	195,37	186,70	172,06	198,60	195,44
<b>Peso Hcl + solo seco</b>	5,04	3,28	3,89	4,91	3,42	4,10
<b>% carbonatos</b>	55,71	67,65	57,81	51,91	65,70	64,41



## **Anexo 6 - Difraccção de raios X**

Tabela 57: Difração de Raios X para a amostra 1

N.º	d-spacing [d]	Pos. [2 $\theta$ ]	Rel. Int. [%]	Height [cts]	Backgr.[cts]	FWHM [2 $\theta$ ]	Area [cps $\times$ 2 $\theta$ ]	Minerais
1	15,19292	5,8172	2,28	80,62	284,64	0,3936	31,3	montemorlonite?
2	3,85619	23,0648	10,86	383,59	47	0,1181	44,68	calcite
3	3,03726	29,4082	100	3533,7	37	0,1378	480,21	calcite
4	2,8427	31,4712	1,55	54,9	26	0,1574	8,53	calcite
5	2,49675	35,971	26,23	926,87	35	0,1181	107,96	calcite
6	2,28568	39,4237	25,67	907,06	32	0,1181	105,65	calcite
7	2,09396	43,1682	26,72	944,11	41	0,096	120,85	calcite
8	2,09345	43,292	16,63	587,51	42,1	0,072	56,4	calcite
9	1,92717	47,1195	6,88	243,19	32	0,096	31,13	calcite
10	1,91195	47,5174	13,03	460,33	34	0,12	73,65	calcite
11	1,87484	48,5179	18,9	667,99	32	0,072	64,13	calcite
12	1,87002	48,6509	13,13	463,96	30,95	0,096	59,39	calcite
13	1,6254	56,5774	5,8	204,85	23	0,12	32,78	calcite
14	1,60355	57,4194	13,89	490,76	28	0,12	78,52	calcite
15	1,60314	57,5915	8,06	284,82	28	0,12	45,57	calcite

Tabela 58: Difração de Raios X para a amostra 2

N.º	d-spacing [d]	Pos. [2 $\theta$ ]	Rel. Int. [%]	Height [cts]	Backgr.[cts]	FWHM [2 $\theta$ ]	Area [cps $\times$ 2 $\theta$ ]	Minerais
1	15,15634	5,8313	1,84	65,22	273,94	0,3149	20,26	montemorilonite?
2	4,04828	21,9564	0,67	23,84	55,68	0,0787	1,85	
3	3,85783	23,0549	8,94	317,32	54	0,1181	36,96	calcite
4	3,34703	26,6335	0,95	33,86	41	0,1181	3,94	quartzo
5	3,23584	27,5665	0,97	34,38	42	0,0787	2,67	anortite
6	3,21091	27,7848	2,24	79,5	43	0,059	4,63	anortite
7	3,18721	27,9956	0,83	29,32	44	0,0787	2,28	anortite
8	3,13895	28,435	0,65	23,23	45	0,2362	5,41	anortite
9	3,03821	29,3988	100	3547,75	45	0,1574	550,99	calcite
10	2,95196	30,2779	0,61	21,76	42	0,1181	2,53	calcite
11	2,84164	31,4833	2,92	103,42	35	0,0787	8,03	calcite
12	2,49636	35,9768	15,1	535,6	34	0,1181	62,39	calcite
13	2,2867	39,4054	18,68	662,78	27	0,1378	90,07	calcite
14	2,09561	43,17	19,56	694,03	30	0,0984	67,37	calcite
15	1,97941	45,8442	0,2	6,98	31	0,4723	3,25	calcite
16	1,92955	47,0991	5,93	210,21	36	0,1181	24,49	calcite
17	1,91223	47,5102	16,93	600,79	37,01	0,096	76,9	calcite
18	1,90723	47,6424	12,76	452,86	38	0,096	57,97	calcite
19	1,87513	48,5099	16,67	591,25	37	0,12	94,6	calcite
20	1,87207	48,6372	13,88	492,51	37	0,1181	57,37	calcite
21	1,81836	50,1271	0,37	13,26	29	0,072	1,27	calcite
22	1,79892	50,7519	0,37	13,11	26	0,1574	2,04	calcite
23	1,62524	56,5833	3,15	111,71	18	0,072	10,72	calcite
24	1,60383	57,4085	8,73	309,77	20	0,096	39,65	calcite
25	1,59938	57,5829	6,68	237,02	20	0,096	30,34	calcite
26	1,58465	58,1692	0,77	27,37	19,04	0,192	7,01	calcite

Tabela 59: Difração de Raios X para a amostra 3

N.º	d-spacing [d]	Pos. [2 $\theta$ ]	Rel. Int. [%]	Height [cts]	Backgr. [cts]	FWHM [2 $\theta$ ]	Area [cps $\times$ 2 $\theta$ ]	Minerais
1	15,12813	5,8422	1,08	38,33	292,39	0,3936	14,88	montmorilonite?
2	9,45174	9,3571	6,94	245,91	139	0,0787	19,1	zeolito (laumontite)
3	6,84383	12,9358	3,53	125,14	88	0,059	7,29	zeolito (laumontite)
4	4,72815	18,7682	1,79	63,26	57	0,0787	4,91	zeolito (laumontite)
5	4,49613	19,7462	0,55	19,32	58	0,2362	4,5	zeolito (laumontite)
6	4,15508	21,3854	3,81	134,9	51	0,059	7,86	zeolito (laumontite)
7	3,85743	23,0573	10,07	356,6	45	0,1181	41,54	calcite
8	3,66444	24,2896	0,87	30,92	40	0,0984	3	zeolito (laumontite)
9	3,51405	25,3461	1,53	54,23	40	0,0787	4,21	zeolito (laumontite)
10	3,41205	26,1169	0,31	10,84	40	0,1574	1,68	zeolito (laumontite)
11	3,27266	27,2503	1,27	44,85	35,99	0,0787	3,48	zeolito (laumontite)
12	3,20773	27,8129	1,44	50,86	34	0,0787	3,95	zeolito (laumontite)
13	3,15323	28,3035	1,41	50,05	34	0,1181	5,83	zeolito (laumontite)
14	3,03797	29,4011	100	3541,21	33	0,1574	549,97	zeolito (laumontite)
15	2,93862	30,4187	0,34	11,91	28,57	0,2755	3,24	calcite
16	2,87497	31,109	0,78	27,79	26	0,0984	2,7	calcite
17	2,84841	31,4065	1,51	53,53	25	0,0787	4,16	calcite
18	2,57627	34,8246	1,33	46,93	30	0,059	2,73	calcite
19	2,4969	35,9688	19,3	683,53	32	0,1181	79,62	calcite
20	2,44067	36,8268	0,74	26,28	32	0,1574	4,08	calcite
21	2,36347	38,0753	0,72	25,36	28	0,1968	4,92	calcite
22	2,28453	39,4104	23,94	847,87	26	0,12	135,66	calcite
23	2,2836	39,5292	16,34	578,65	26	0,096	74,07	calcite
24	2,21641	40,6743	0,28	9,99	24	0,384	5,11	calcite
25	2,15195	41,9492	1,07	37,77	28	0,192	9,67	calcite
26	2,09416	43,1639	22,9	810,81	31	0,096	103,78	calcite
27	2,09411	43,2778	17,29	612,1	31	0,072	58,76	calcite

Continua...

N.º	d-spacing [d]	Pos. [2 $\theta$ ]	Rel. Int. [%]	Height [cts]	Backgr.[cts]	FWHM [2 $\theta$ ]	Area [cps $\times$ 2 $\theta$ ]	Minerais
Continuação...								
28	1,98782	45,5992	0,26	9,19	27	0,576	7,06	calcite
29	1,95957	46,2944	0,5	17,87	24	0,288	6,86	calcite
30	1,92706	47,1224	7,2	255,03	24	0,12	40,8	calcite
31	1,91208	47,5142	13,46	476,72	25,21	0,096	61,02	calcite
32	1,91148	47,6553	8,78	310,8	26	0,072	29,84	calcite
33	1,87512	48,5101	18,14	642,41	25	0,096	82,23	calcite
34	1,87421	48,6636	10,28	364,17	24,32	0,096	46,61	calcite
35	1,85061	49,195	0,51	18,15	22	0,192	4,65	calcite
36	1,79816	50,7299	0,25	8,92	18	0,288	3,43	calcite
37	1,7566	52,0185	0,24	8,4	18	0,192	2,15	calcite
38	1,7063	53,6726	0,17	6,13	18	0,288	2,35	calcite
39	1,62571	56,5653	4,94	175,02	22	0,096	22,4	calcite
40	1,62508	56,7427	3,51	124,13	23	0,096	15,89	calcite
41	1,60344	57,4236	10,75	380,78	24	0,12	60,93	calcite
42	1,60382	57,5645	8,51	301,34	24	0,096	38,57	calcite
43	1,58492	58,1583	0,32	11,38	23,59	0,192	2,91	calcite
44	1,56397	59,0137	1,15	40,87	23,18	0,096	5,23	calcite
45	1,56417	59,1664	0,47	16,5	24	0,096	2,11	calcite

Tabela 60: Difração de Raios X para a amostra 4

N.º	d-spacing [d]	Pos. [2 $\theta$ ]	Rel. Int. [%]	Height [cts]	Backgr.[cts]	FWHM [2 $\theta$ ]	Area [cps $\times$ 2 $\theta$ ]	Minerais
1	4,49268	19,7616	0,54	26,55	54	0,3149	8,25	quartzo
2	4,26351	20,8353	0,61	29,97	51	0,0984	2,91	calcite
3	3,85813	23,0531	9,23	453,69	48	0,0984	44,04	quartzo
4	3,34798	26,6259	2,97	146	40,21	0,0984	14,17	calcite
5	3,03919	29,389	100	4915,04	36	0,0984	477,09	calcite
6	2,84705	31,422	2,31	113,48	30	0,059	6,61	calcite
7	2,80224	31,9377	0,19	9,16	26,61	0,1968	1,78	calcite
8	2,57071	34,9023	0,31	15,1	32	0,7872	11,72	calcite
9	2,49586	35,9534	15,68	770,8	34	0,096	98,66	calcite
10	2,49474	36,0627	8,01	393,58	34	0,072	37,78	calcite
11	2,28539	39,395	21,34	1048,9	28	0,096	134,26	calcite
12	2,28413	39,5195	10,64	522,87	28	0,048	33,46	calcite
13	2,09486	43,1487	19,63	964,67	34	0,096	123,48	calcite
14	2,09417	43,2764	10,26	504,26	34	0,048	32,27	calcite
15	2,05243	44,087	0,24	11,68	36	0,576	8,97	calcite
16	1,92783	47,1024	6,12	300,79	28	0,072	28,88	calcite
17	1,92735	47,239	3,85	189,15	28	0,072	18,16	calcite
18	1,91279	47,4954	15,61	767,15	28	0,096	98,2	calcite
19	1,91219	47,6366	8,31	408,67	28	0,072	39,23	calcite
20	1,87559	48,4971	19,29	947,86	26	0,096	121,33	calcite
21	1,87499	48,6422	9,13	448,87	25	0,072	43,09	calcite
22	1,83204	49,7273	0,15	7,57	22	0,144	1,45	quartzo
23	1,81826	50,13	0,34	16,55	23	0,072	1,59	calcite
24	1,62599	56,5549	3,94	193,52	19	0,096	24,77	calcite
25	1,62579	56,7158	2,22	109,08	20	0,072	10,47	calcite
26	1,60409	57,398	9,41	462,32	20	0,096	59,18	calcite
27	1,60388	57,5622	5,19	255,13	20	0,072	24,49	calcite
28	1,58658	58,0917	0,84	41,43	19	0,096	5,3	calcite

Tabela 61: Difração de Raios X para a amostra 5

N.º	d-spacing [d]	Pos. [2 $\theta$ ]	Rel. Int. [%]	Height [cts]	Backgr.[cts]	FWHM [2 $\theta$ ]	Area [cps $\times$ 2 $\theta$ ]	Minerais
1	15,37362	5,7488	2,83	64,06	291,06	0,3936	24,87	montmorilonite?
2	4,50439	19,7096	0,89	20,15	54	0,2362	4,7	
3	3,85532	23,07	21,53	486,5	42	0,1181	56,67	calcite
4	3,18452	28,0197	2,4	54,26	32	0,0787	4,21	
5	3,03731	29,4076	100	2259,54	31	0,1378	307,06	calcite
6	2,84278	31,4703	1,22	27,65	23	0,1574	4,29	calcite
7	2,56673	34,9581	0,79	17,93	26	0,1181	2,09	calcite
8	2,49447	35,9742	49,95	1128,57	28	0,12	180,57	calcite
9	2,49327	36,0845	29,44	665,19	28	0,048	42,57	calcite
10	2,28408	39,4184	45,88	1036,59	24	0,072	99,51	calcite
11	2,28325	39,5355	30,45	688,11	23,72	0,072	66,06	calcite
12	2,15178	41,9526	0,74	16,65	22	0,072	1,6	calcite
13	2,0938	43,1718	46,53	1051,3	27	0,096	134,57	calcite
14	2,09283	43,3056	24,68	557,74	27	0,072	53,54	calcite
15	2,02937	44,6149	0,84	19,03	27	0,576	14,62	calcite
16	1,92721	47,1183	14,07	317,9	25	0,072	30,52	calcite
17	1,92646	47,262	8,4	189,73	26	0,072	18,21	calcite
18	1,91155	47,528	14,73	332,9	26	0,096	42,61	calcite
19	1,91097	47,6688	8,65	195,52	26	0,096	25,03	calcite
20	1,87461	48,5243	24,19	546,59	24	0,12	87,45	calcite
21	1,87379	48,6751	15,6	352,52	23	0,096	45,12	calcite
22	1,83031	49,7774	0,43	9,63	20	0,288	3,7	calcite
23	1,755	52,0696	0,22	4,86	20	1,152	7,46	calcite
24	1,625	56,5925	10,7	241,76	18	0,096	30,95	calcite
25	1,62465	56,759	6,37	143,92	19	0,072	13,82	calcite
26	1,60335	57,4273	22,91	517,67	20	0,12	82,83	calcite
27	1,60268	57,6096	12,97	293,13	20	0,096	37,52	calcite

Tabela 62: Difração de Raios X para a amostra 6

N.º	d-spacing [d]	Pos. [2 $\theta$ ]	Rel. Int. [%]	Height [cts]	Backgr.[cts]	FWHM [2 $\theta$ ]	Area [cps $\times$ 2 $\theta$ ]	Minerais
1	3,85573	23,0676	8,31	364,32	42	0,1181	42,44	calcite
2	3,03585	29,4221	100	4384,93	40	0,1574	681,01	calcite
3	2,90177	30,8145	1,15	50,52	37	0,1378	6,87	calcite
4	2,84231	31,4757	2,2	96,6	33	0,1181	11,25	calcite
5	2,49341	35,99	13,53	593,07	28	0,12	94,89	calcite
6	2,49273	36,0926	8,99	394,06	28	0,072	37,83	calcite
7	2,28343	39,4302	17,87	783,72	26	0,168	175,55	calcite
8	2,28264	39,5464	12,7	557,07	26	0,072	53,48	calcite
9	2,19794	41,0314	0,44	19,42	26	0,168	4,35	
10	2,13002	42,4018	0,08	3,42	28	0,144	0,66	
11	2,09274	43,1947	16,24	712,06	32	0,12	113,93	
12	2,09239	43,3151	10,53	461,75	33	0,096	59,1	calcite
13	1,92696	47,1248	4,63	202,84	32	0,144	38,94	calcite
14	1,91139	47,5322	13,73	601,97	34	0,168	134,84	calcite
15	1,87396	48,5423	15,88	696,21	33	0,144	133,67	calcite
16	1,87369	48,678	11,74	514,62	32	0,096	65,87	calcite
17	1,62438	56,616	3,01	131,93	21	0,096	16,89	calcite
18	1,60317	57,4341	6,42	281,39	21	0,168	63,03	calcite
19	1,60266	57,6104	5,08	222,77	21	0,072	21,39	calcite
20	1,58309	58,232	0,51	22,3	19	0,288	8,56	calcite

## Anexo 7 - Ensaio de corte directo

Tabela 63: Ensaio de corte directo da amostra 1

Ensaio n.º		1	2	3
Início do Ensaio	Largura (cm)	1,98	1,98	1,98
	Altura (cm)	5,96	5,96	5,96
	Volume (cm <sup>3</sup> )	70,25	70,25	70,25
	Teor em água (%)	28,6	47,6	47,6
	Baridade seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,20	1,07	1,11
Fim do Ensaio	Teor em água (%)	50,5	53,1	53,2
Fase de Consolidação	Secção da caixa (cm <sup>2</sup> )	35,57	35,57	35,57
	Carga (kN)	0,10	0,20	0,39
	Tensão de consolidação (kPa)	27,55	55,10	110,21
	Assentamento (cm)	-0,84	-0,51	-0,24
Fase de Corte	Velocidade de Corte (mm/min)	0,8	0,8	0,8
	Tempo de Rotura (s)	540	480	330
	Força de Corte (N)	109	255	384
	Tensão de Corte na Rotura (kPa)	30,6	71,7	108,0

Tabela 64: Resultados do Ensaio de Corte Directo para a amostra 1 com carga de 1 kg

Tempo	Deformação				Força de Corte		$\tau$
	Horizontal		Vertical		div	N	
Seg.	div	mm	div	mm	div	N	kPa
0		0,01		-0,084	0,0	0,00	0,00
10		0,1		-0,085	9,0	18,80	5,29
20		0,222		-0,089	13,0	27,17	7,64
30		0,335		-0,092	15,0	31,35	8,81
40		0,447		-0,094	17,0	35,54	9,99
50		0,565		-0,097	19,0	39,72	11,17
60		0,684		-0,098	20,0	41,81	11,76
90		1,03		-0,101	24,0	50,18	14,11
120		1,364		-0,107	27,0	56,45	15,87
150		1,716		-0,114	30,0	62,73	17,64
180		2,084		-0,119	33,0	69,00	19,40
210		2,445		-0,128	37,0	77,36	21,75
240		2,824		-0,144	40,0	83,64	23,51
270		3,187		-0,154	44,0	92,00	25,86
300		3,574		-0,161	46,0	96,18	27,04
330		3,955		-0,161	49,0	102,45	28,80
360		4,334		-0,158	50,0	104,54	29,39
390		4,715		-0,151	52,0	108,72	30,57
420		5,13		-0,141	52,0	108,72	30,57
450		5,516		-0,131	52,0	108,72	30,57
480		5,96		-0,123	52,0	108,72	30,57
510		6,291		-0,119	52,0	108,72	30,57
540		6,707		-0,118	52,0	108,72	30,57
570		7,087		-0,117	51,0	106,63	29,98
600		7,906		-0,129	51,0	106,63	29,98
630		8,29		-0,137	50,0	104,54	29,39
660		8,561		-0,141	50,0	104,54	29,39
690		8,565		-0,156	59,0	123,35	34,68

Tabela 65: Resultados do Ensaio de Corte Directo para a amostra 1 com carga de 2 kg

Tempo	Deformação				Força de Corte		$\tau$
	Horizontal		Vertical		div	N	
Seg.	div	mm	div	mm	div	N	kPa
0		0,015		-0,513	0,0	0,00	0,00
10		0,066		-0,523	14	29,26	8,23
20		0,216		-0,569	24	50,18	14,11
30		0,296		-0,592	30	62,73	17,64
40		0,391		-0,617	35	73,18	20,57
50		0,513		-0,642	41	85,73	24,10
60		0,615		-0,666	45	94,09	26,45
90		0,967		-0,703	59	123,35	34,68
120		1,315		-0,722	71	148,42	41,73
150		1,666		-0,730	79	165,12	46,42
180		2,002		-0,740	86	179,74	50,53
210		2,346		-0,751	95	198,53	55,81
240		2,696		-0,758	104	217,31	61,09
270		3,035		-0,755	110	229,83	64,61
300		3,398		-0,746	115	240,26	67,55
330		3,755		-0,731	118	246,52	69,31
360		4,136		-0,716	118	246,52	69,31
390		4,515		-0,710	118	246,52	69,31
420		4,912		-0,708	119	248,60	69,89
450		5,284		-0,710	120	250,69	70,48
480		5,682		-0,711	122	254,86	71,65
510		6,055		-0,710	121	252,77	71,07
540		6,435		-0,713	121	252,77	71,07
570		6,834		-0,715	121	252,77	71,07
600		7,236		-0,717	120	250,69	70,48
630		7,615		-0,716	118	246,52	69,31
660		8,025		-0,710	115	240,26	67,55
690		8,457		-0,704	113	236,09	66,37
720		8,771		-0,709	118	246,52	69,31
750		8,781		-0,726	143	298,64	83,96

Tabela 66: Resultados do Ensaio de Corte Directo para a amostra 1 com carga de 4 kg

Tempo	Deformação				Força de Corte		$\tau$
	Horizontal		Vertical		div	N	
Seg.	div	mm	div	mm	div	N	kPa
0		0,022		-0,238	0,0	0,00	0,00
10		0,037		-0,239	30,0	0,00	0,00
20		0,071		-0,239	62,0	129,61	36,44
30		0,129		-0,247	82,0	171,39	48,18
40		0,188		-0,257	98,0	204,79	57,57
50		0,262		-0,267	110,0	229,83	64,61
60		0,381		-0,275	125,0	261,12	73,41
90		0,657		-0,284	142,0	296,56	83,38
120		1,015		-0,291	158,0	329,90	92,75
150		1,364		-0,291	168,0	350,73	98,61
180		1,746		-0,288	172,0	359,06	100,95
210		2,189		-0,284	176,0	367,39	103,29
240		2,477		-0,286	181,0	377,80	106,22
270		2,845		-0,292	183,0	381,97	107,39
300		3,213		-0,299	183,0	381,97	107,39
330		3,589		-0,307	184,0	384,05	107,97
360		3,983		-0,311	182,0	379,88	106,80
390		4,374		-0,317	181,0	377,80	106,22
420		4,759		-0,323	179,0	373,64	105,05
450		5,166		-0,326	180,0	375,72	105,63
480		5,535		-0,333	175,0	365,31	102,70
510		5,941		-0,338	177,0	369,47	103,87
540		6,343		-0,344	176,0	367,39	103,29
570		6,725		-0,351	175,0	365,31	102,70
600		7,126		-0,359	175,0	365,31	102,70
630		7,521		-0,370	175,0	365,31	102,70
660		7,712		-0,384	188,0	392,37	110,31
690		7,719		-0,397	213,0	444,39	124,94
720		7,722		-0,405	232,0	483,90	136,04

Tabela 67: Ensaio de corte directo da amostra 3

Ensaio n.º		1	2	3
Início do Ensaio	Largura (cm)	1,98	1,98	1,98
	Altura (cm)	5,96	5,96	5,96
	Volume (cm <sup>3</sup> )	70,25	70,25	70,25
	Teor em água (%)	18,7	27,9	15,2
	Baridade seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,36	1,44	1,36
Fim do Ensaio	Teor em água (%)	30,3	29,3	28,5
Fase de Consolidação	Secção da caixa (cm <sup>2</sup> )	35,57	35,57	35,57
	Carga (kN)	0,1	0,2	0,39
	Tensão de consolidação (kPa)	27,55	55,1	110,21
	Assentamento (cm)	-0,49	-0,02	-0,27
Fase de Corte	Velocidade de Corte (mm/min)	0,8	0,8	0,8
	Tempo de Rotura (s)	600	300	600
	Força de Corte (N)	79	188	251
	Tensão de Corte na Rotura (kPa)	22,3	52,9	70,5

Tabela 68: Resultados do Ensaio de Corte Directo para a amostra 3 com carga de 1 kg

Tempo	Deformação				Força de Corte		$\tau$
	Horizontal		Vertical		div	N	
Seg.	div	mm	div	mm	div	N	kPa
0		0,002		-0,493	0,0	0,00	0,00
10		0,033		-0,395	5,0	10,43	2,93
20		0,156		-0,531	10,0	20,89	5,87
30		0,222		-0,542	13,0	27,17	7,64
40		0,334		-0,568	15,0	31,35	8,81
50		0,453		-0,592	18,0	37,63	10,58
60		0,580		-0,615	19,0	39,72	11,17
90		0,965		-0,669	22,0	46,00	12,93
120		1,348		-0,713	25,0	52,27	14,70
150		1,731		-0,747	27,0	56,45	15,87
180		2,116		-0,773	28,0	58,54	16,46
210		2,507		-0,793	29,0	60,64	17,05
240		2,876		-0,809	30,0	62,73	17,64
270		3,262		-0,825	31,0	64,82	18,22
300		3,647		-0,838	31,0	64,82	18,22
330		4,036		-0,850	32,0	66,91	18,81
360		4,409		-0,860	32,0	66,91	18,81
390		4,803		-0,871	32,0	66,91	18,81
420		5,208		-0,881	33,0	69,00	19,40
450		5,593		-0,891	33,0	69,00	19,40
480		5,992		-0,903	33,0	69,00	19,40
510		6,384		-0,911	33,0	69,00	19,40
540		6,795		-0,919	33,0	69,00	19,40
570		7,181		-0,926	33,0	69,00	19,40
600		7,495		-0,937	38,0	79,45	22,34
630		7,504		-0,943	35,0	73,18	20,57
660		7,508		-0,953	33,0	69,00	19,40
690		7,508		-0,915	62,0	129,61	36,44
720		7,508		-0,833	105,0	219,40	61,68

Tabela 69: Resultados do Ensaio de Corte Directo para a amostra 3 com carga de 2 kg

Tempo	Deformação				Força de Corte		$\tau$
	Horizontal		Vertical		div	N	
Seg.	div	mm	div	mm	div	N	kPa
0		0,004		-0,020	0,0	0,00	0,00
10		0,100		-0,027	70,0	146,33	41,14
20		0,281		-0,039	80,0	167,21	47,01
30		0,368		-0,043	90,0	188,09	52,88
40		0,478		-0,048	90,0	188,09	52,88
50		0,608		-0,054	90,0	188,09	52,88
60		0,758		-0,058	90,0	188,09	52,88
90		1,144		-0,071	90,0	188,09	52,88
120		1,558		-0,086	90,0	188,09	52,88
150		1,931		-0,097	90,0	188,09	52,88
180		2,343		-0,111	90,0	188,09	52,88
210		2,747		-0,124	90,0	188,09	52,88
240		3,130		-0,135	90,0	188,09	52,88
270		3,538		-0,150	90,0	188,09	52,88
300		3,916		-0,161	90,0	188,09	52,88
330		4,328		-0,174	80,0	167,21	47,01
360		4,718		-0,187	80,0	167,21	47,01
390		5,122		-0,202	80,0	167,21	47,01
420		5,527		-0,214	80,0	167,21	47,01
450		5,918		-0,227	80,0	167,21	47,01
480		6,300		-0,239	70,0	146,33	41,14
510		6,703		-0,251	70,0	146,33	41,14
540		7,070		-0,263	70,0	146,33	41,14
570		7,081		-0,271	90,0	188,09	52,88
600		7,082		-0,257	150,0	313,23	88,06
630		7,083		-0,230	290,0	604,36	169,91
660		7,084		-0,157	440,0	914,91	257,22

Tabela 70: Resultados do Ensaio de Corte Directo para a amostra 3 com carga de 4 kg

Tempo	Deformação		Força de Corte		$\tau$		
	Horizontal		Vertical				
Seg.	div	mm	div	mm	div	N	kPa
0		0,806	-2,168		79,0	0,00	0,00
10		0,882	-2,178		79,0	0,00	0,00
20		1,053	-2,187		79,0	165,12	46,42
30		1,134	-2,199		79,0	165,12	46,42
40		1,255	-2,216		79,0	165,12	46,42
50		1,369	-2,230		79,0	165,12	46,42
60		1,605	-2,249		80,0	167,21	47,01
90		1,873	-2,267		85,0	177,65	49,95
120		2,243	-2,287		92,0	192,26	54,05
150		2,606	-2,301		96,0	200,61	56,40
180		2,967	-2,313		100,0	208,96	58,75
210		3,338	-2,321		104,0	217,31	61,09
240		3,722	-2,329		106,0	221,48	62,27
270		4,090	-2,336		109,0	227,74	64,03
300		4,434	-2,339		111,0	231,91	65,20
330		4,836	-2,343		114,0	238,17	66,96
360		5,213	-2,347		116,0	242,35	68,13
390		5,600	-2,350		117,0	244,43	68,72
420		5,977	-2,354		118,0	246,52	69,31
450		6,377	-2,358		119,0	248,60	69,89
480		6,749	-2,362		119,0	248,60	69,89
510		7,143	-2,368		120,0	250,69	70,48
540		7,529	-2,374		120,0	250,69	70,48
570		7,921	-2,379		120,0	250,69	70,48
600		8,315	-2,397		120,0	250,69	70,48
630		8,639	-2,395		95,0	198,53	55,81
660		8,649	-2,400		97,0	202,70	56,99
690		8,651	-2,401		171,0	356,98	100,36
720		8,653	-2,383		185,0	386,13	108,56

Tabela 71: Ensaio de corte directo da amostra 4

Ensaio n.º			1	2	3
Início do Ensaio	Largura	(cm)	1,98	1,98	1,98
	Altura	(cm)	5,96	5,96	5,96
	Volume	(cm <sup>3</sup> )	70,25	70,25	70,25
	Teor em água	(%)	20,7	14,9	16,9
	Baridade seca	(g/cm <sup>3</sup> )	1,52	1,44	1,49
Fim do Ensaio	Teor em água	(%)	32,4	29,8	32,8
Fase de Consolidação	Secção da caixa	(cm <sup>2</sup> )	35,57	35,57	35,57
	Carga	(kN)	0,10	0,20	0,39
	Tensão de consolidação	(kPa)	27,55	55,10	110,21
	Assentamento	(cm)	-0,19	-0,44	-0,79
Fase de Corte	Velocidade de Corte	(mm/min)	0,8	0,8	0,8
	Tempo de Rotura	(s)	330	360	720
	Força de Corte	(N)	270	337	481
	Tensão de Corte na Rotura	(kPa)	75,9	94,6	135,3

Tabela 72: Resultados do Ensaio de Corte Directo para a amostra 4 com carga de 1 kg

Tempo	Deformação				Força de Corte		$\tau$
	Horizontal		Vertical		div	N	
Seg.	div	mm	div	mm	div	N	kPa
0		0,004		-0,155	81,2	0,00	0,00
10		0,006		-0,153	81,2	169,72	47,71
20		0,097		-0,139	83,0	173,48	48,77
30		0,151		-0,138	86,2	180,16	50,65
40		0,155		-0,138	86,0	179,74	50,53
50		0,155		-0,138	86,2	180,16	50,65
60		0,165		-0,138	88,0	183,91	51,71
90		0,492		-0,059	98,0	204,79	57,57
120		0,825		-0,059	105,5	220,44	61,97
150		1,165		-0,045	111,5	232,96	65,49
180		1,526		-0,016	116,0	242,35	68,13
210		1,882		-0,015	120,0	250,69	70,48
240		2,246		-0,052	123,2	257,36	72,36
270		2,616		-0,093	126,5	264,24	74,29
300		2,998		-0,156	128,3	268,00	75,35
330		3,372		-0,222	129,2	269,87	75,87
360		3,755		-0,282	129,0	269,46	75,76
390		4,155		-0,311	126,0	263,20	74,00
420		4,560		-0,312	123,2	257,36	72,36
450		4,965		-0,311	122,0	254,86	71,65
480		5,353		-0,303	121,2	253,19	71,18
510		5,755		-0,294	120,7	252,15	70,89
540		6,152		-0,280	121,0	252,77	71,07
570		6,553		-0,268	120,0	250,69	70,48
600		6,945		-0,256	120,0	250,69	70,48
630		7,345		-0,245	120,0	250,69	70,48
660		7,733		-0,229	120,0	250,69	70,48
690		8,125		-0,216	120,0	250,69	70,48
720		8,526		-0,202	120,0	250,69	70,48
750		8,925		-0,187	120,0	250,69	70,48
780		9,322		-0,173	120,0	250,69	70,48
810		9,720		-0,158	120,0	250,69	70,48
840		9,866		-0,141	137,0	286,14	80,44
870		9,870		-0,133	162,0	338,23	95,09

Tabela 73: Resultados do Ensaio de Corte Directo para a amostra 4 com carga de 2 kg

Tempo	Deformação				Força de Corte		$\tau$
	Horizontal		Vertical		div	N	
Seg.	div	mm	div	mm	div	N	kPa
0		0,020		-0,442	81,5	0,00	0,00
10		0,024		-0,445	81,5	170,34	47,89
20		0,065		-0,448	81,7	170,76	48,01
30		0,176		-0,455	86,8	181,41	51,00
40		0,231		-0,457	87,5	182,87	51,41
50		0,220		-0,458	87,0	181,83	51,12
60		0,285		-0,458	87,0	181,83	51,12
90		0,486		-0,486	109,0	227,74	64,03
120		0,773		-0,498	125,0	261,12	73,41
150		1,116		-0,498	137,0	286,14	80,44
180		1,476		-0,484	148,8	310,73	87,36
210		1,836		-0,465	156,0	325,73	91,58
240		2,190		-0,445	161,2	336,57	94,62
270		2,545		-0,432	160,3	334,69	94,10
300		2,905		-0,424	161,3	336,78	94,68
330		3,275		-0,428	161,2	336,57	94,62
360		3,654		-0,434	161,2	336,57	94,62
390		4,036		-0,450	159,5	333,03	93,63
420		4,422		-0,468	159,3	332,61	93,51
450		4,806		-0,485	160,0	334,07	93,92
480		5,205		-0,501	159,3	332,61	93,51
510		5,604		-0,519	157,5	328,86	92,46
540		5,995		-0,538	156,8	327,40	92,05
570		6,386		-0,553	157,2	328,23	92,28
600		6,793		-0,567	155,5	324,69	91,28
630		7,184		-0,584	153,8	321,15	90,29
660		7,586		-0,598	153,8	321,15	90,29
690		7,971		-0,612	153,8	321,15	90,29
720		5,365		-0,622	154,2	321,98	90,52
750		8,776		-0,633	153,5	320,53	90,11
780		9,166		-0,643	152,9	319,28	89,76
810		9,563		-0,653	152,9	319,28	89,76
840		9,824		-0,669	161,0	336,15	94,51
870		9,831		-0,682	184,0	384,05	107,97
900		9,832		-0,680	202,0	421,51	118,50

Tabela 74: Resultados do Ensaio de Corte Directo para a amostra 4 com carga de 4 kg

Tempo	Deformação		Força de Corte		$\tau$		
	Horizontal		Vertical				
Seg.	div	mm	div	mm	div	N	kPa
0		0,106		-0,791	78,0	0,00	0,00
10		0,127		-0,792	79,0	0,00	0,00
20		0,185		-0,792	81,0	169,30	47,60
30		0,325		-0,792	81,2	169,72	47,71
40		0,456		-0,784	81,2	169,72	47,71
50		0,566		-0,768	82,0	171,39	48,18
60		0,575		-0,766	85,0	177,65	49,95
90		0,644		-0,782	88,5	184,96	52,00
120		0,825		-0,833	103,0	215,22	60,51
150		1,145		-0,898	118,0	246,52	69,31
180		1,485		-0,938	129,5	270,50	76,05
210		1,840		-0,978	139,6	291,56	81,97
240		2,166		-1,007	151,0	315,32	88,65
270		2,506		-1,026	165,2	344,90	96,97
300		2,855		-1,043	177,0	369,47	103,87
330		3,186		-1,053	187,0	390,29	109,73
360		3,546		-1,065	191,0	398,62	112,07
390		3,902		-1,077	200,8	419,01	117,80
420		4,275		-1,092	207,0	431,91	121,43
450		4,645		-1,108	212,5	443,35	124,64
480		5,013		-1,121	217,8	454,38	127,74
510		5,395		-1,129	222,2	463,53	130,32
540		5,785		-1,137	225,2	469,76	132,07
570		6,166		-1,142	227,8	475,17	133,59
600		6,555		-1,146	229,3	478,29	134,47
630		6,943		-1,150	230,2	480,16	134,99
660		7,335		-1,154	230,5	480,78	135,17
690		7,724		-1,154	230,7	481,20	135,28
720		8,123		-1,158	230,7	481,20	135,28
750		8,523		-1,164	230,2	480,16	134,99
780		8,926		-1,170	230,2	480,16	134,99
810		9,325		-1,176	230,2	480,16	134,99
840		9,725		-1,180	230,5	480,78	135,17
870		10,125		-1,184	230,2	480,16	134,99
900		10,527		-1,189	229,9	479,54	134,82
930		10,915		-1,195	239,5	499,49	140,43
960		11,015		-1,212	250,0	521,31	146,56
990		11,017		-1,221	280,0	583,61	164,08

Tabela 75: Ensaio de corte directo da amostra 6

Ensaio n.º		1	2	3
Início do Ensaio	Largura (cm)	1,98	1,98	
	Altura (cm)	5,96	5,96	5,96
	Volume (cm <sup>3</sup> )	70,25	70,25	70,25
	Teor em água (%)	58,0	67,2	59,7
	Baridade seca (g/cm <sup>3</sup> )	0,93	0,95	1,02
Fim do Ensaio	Teor em água (%)	73,7	64,8	57,9
Fase de Consolidação	Secção da caixa (cm <sup>2</sup> )	35,57	35,57	35,57
	Carga (kN)	0,10	0,20	0,39
	Tensão de consolidação (kPa)	27,55	55,10	110,21
	Assentamento (cm)	-0,38	0,00	-0,61
Fase de Corte	Velocidade de Corte (mm/min)	0,8	0,8	0,8
	Tempo de Rotura (s)	150	150	210
	Força de Corte (N)	125	202	586
	Tensão de Corte na Rotura (kPa)	35,3	56,7	164,7

Tabela 76: Resultados do Ensaio de Corte Directo para a amostra 6 com carga de 1 kg

Tempo Seg.	Deformação		Força de Corte		$\tau$ kPa
	Horizontal div	Vertical mm	div	N	
0		0,052	-0,384	12,0	0,00
10		0,036	-0,376	30,0	62,73
20		0,158	-0,372	39,0	81,55
30		0,253	-0,376	43,0	89,91
40		0,365	-0,370	46,0	96,18
50		0,481	-0,355	50,0	104,54
60		0,596	-0,349	52,0	108,72
90		0,945	-0,321	57,0	119,17
120		1,292	-0,297	60,0	125,44
150		1,656	-0,285	60,0	125,44
180		2,024	-0,284	59,0	123,35
210		2,413	-0,278	58,0	121,26
240		2,792	-0,268	57,0	119,17
270		3,171	-0,257	57,0	119,17
300		3,579	-0,246	56,0	117,08
330		3,978	-0,234	55,0	114,99
360		4,375	-0,224	55,0	114,99
390		4,760	-0,219	54,0	112,90
420		5,165	-0,216	52,0	108,72
450		5,555	-0,216	51,0	106,63
480		5,913	-0,216	50,0	104,54
510		6,351	-0,216	49,0	102,45
540		6,778	-0,217	48,0	100,36
570		7,165	-0,221	46,0	96,18
600		7,570	-0,231	45,0	94,09
630		7,630	-0,232	65,0	135,88
660		7,633	-0,216	85,0	177,65

Tabela 77: Resultados do Ensaio de Corte Directo para a amostra 6 com carga de 2 kg

Tempo Seg.	Deformação		Força de Corte		$\tau$ kPa
	Horizontal div	Vertical mm	div	N	
0	0,104	-0,004	7,6	0,00	0,00
10	0,125	-0,004	28,0	58,54	16,46
20	0,190	-0,004	39,0	81,55	22,93
30	0,281	-0,004	47,0	98,27	27,63
40	0,380	-0,004	54,0	112,90	31,74
50	0,490	-0,004	60,5	126,48	35,56
60	0,591	-0,004	67,0	140,06	39,38
90	0,936	-0,004	83,0	173,48	48,77
120	1,293	-0,004	92,0	192,26	54,05
150	1,661	-0,004	96,5	201,66	56,69
180	2,050	-0,004	92,0	192,26	54,05
210	2,245	-0,004	87,6	183,08	51,47
240	2,854	-0,004	83,0	173,48	48,77
270	3,250	-0,004	79,0	165,12	46,42
300	3,650	-0,004	77,0	160,95	45,25
330	4,050	-0,004	76,8	160,53	45,13
360	4,445	-0,004	75,0	156,77	44,07
390	4,841	-0,004	75,0	156,77	44,07
420	5,235	-0,004	75,0	156,77	44,07
450	5,638	-0,004	73,9	154,47	43,43
480	6,030	-0,004	72,0	150,50	42,31
510	6,431	-0,003	71,0	148,42	41,73
540	6,830	-0,004	70,0	146,33	41,14
570	7,226	-0,004	70,0	146,33	41,14
600	7,614	-0,004	70,0	146,33	41,14
630	7,981	-0,004	70,9	148,21	41,67
660	8,360	-0,004	71,8	150,09	42,20
690	8,422	-0,004	92,0	192,26	54,05
720	8,425	-0,004	114,0	238,17	66,96

Tabela 78: Resultados do Ensaio de Corte Directo para a amostra 6 com carga de 4 kg

Tempo	Deformação				Força de Corte		$\tau$
	Horizontal		Vertical		div	N	
Seg.	div	mm	div	mm	div	N	kPa
0		0,058		-0,611	0,0	0,00	0,00
10		0,084		-0,612	32,0	0,00	0,00
20		0,127		-0,612	63,0	131,70	37,03
30		0,167		-0,614	88,0	183,91	51,71
40		0,216		-0,615	111,0	231,91	65,20
50		0,272		-0,615	136,0	284,05	79,86
60		0,335		-0,615	158,0	329,90	92,75
90		0,531		-0,596	213,0	444,39	124,94
120		0,747		-0,567	255,0	531,70	149,48
150		1,038		-0,568	270,0	562,85	158,24
180		1,368		-0,586	279,0	581,53	163,49
210		1,731		-0,578	281,0	585,68	164,66
240		2,124		-0,560	258,0	537,93	151,23
270		2,518		-0,545	252,0	525,46	147,73
300		2,951		-0,538	230,0	479,74	134,88
330		3,354		-0,538	219,0	456,87	128,45
360		3,741		-0,540	213,0	444,39	124,94
390		4,115		-0,542	213,0	444,39	124,94
420		4,490		-0,544	213,0	444,39	124,94
450		4,888		-0,544	210,0	438,15	123,18
480		5,253		-0,547	213,2	444,81	125,05
510		5,642		-0,548	208,0	433,99	122,01
540		6,061		-0,566	197,0	411,11	115,58
570		6,445		-0,582	198,0	413,19	116,16
600		6,814		-0,600	203,0	423,59	119,09
630		7,203		-0,613	203,0	423,59	119,09
660		7,605		-0,629	196,0	409,02	114,99
690		7,984		-0,646	200,0	417,35	117,33
720		8,382		-0,603	201,0	419,43	117,92
750		8,576		-0,689	211,0	440,23	123,77