



UNIVERSIDADE DE COIMBRA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
Departamento de Ciências da Terra

**Caracterização Físico-Mecânica de Calcários**  
**Utilizados na Calçada Portuguesa**  
(Alqueidão da Serra, Porto de Mós/Alcanede e Alenquer)

Fábio João Gonzaga Rocha

MESTRADO EM ENGENHARIA GEOLÓGICA E DE MINAS

Setembro, 2016





**UNIVERSIDADE DE COIMBRA**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**Departamento de Ciências da Terra**

**Caracterização Físico-Mecânica de Calcários**  
**Utilizados na Calçada Portuguesa**  
**(Alqueidão da Serra, Porto de Mós/Alcanede e Alenquer)**

**Fábio João Gonzaga Rocha**

**MESTRADO EM ENGENHARIA GEOLÓGICA E DE MINAS**  
**Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da**  
**Universidade de Coimbra para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia**  
**Geológica e de Minas**

**Orientadores científicos**

Prof. Doutora Lídia Catarino, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de  
Coimbra

Prof. Doutor Fernando Figueiredo, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de  
Coimbra

**Setembro, 2016**

Por opção do autor, esta dissertação foi escrita segundo as regras anteriores ao novo acordo ortográfico da língua portuguesa.



## Resumo

A calçada portuguesa é um tipo de pavimento artístico que surgiu em Portugal nos meados do século XIX e que chega aos nossos dias como uma vincada tradição do nosso país, também já difundida além-fronteiras. Consiste num empedrado de cubos de calcário (pedra de calçada de vidro), estando a qualidade de uma calçada dependente não só da sua regularidade geométrica e dimensional, mas também das características intrínsecas da própria rocha, sendo a sua confecção, à excepção do desmonte mecânico do maciço calcário, um processo artesanal.

O objectivo desta dissertação centra-se no estudo de algumas pedras calcárias utilizadas na calçada portuguesa, exploradas em maciços calcários da Orla Mesocenoica Ocidental, especificamente nas regiões de Alqueidão da Serra, Porto de Mós – Alcanede e Alenquer, correspondendo aos núcleos de maior produção.

Parte deste estudo correspondeu a trabalho de campo realizado junto das explorações, no sentido de se conhecer as especificidades laborais de cada núcleo, a sua disposição geográfica e enquadramento geológico. Ao longo desta campanha procedeu-se à recolha de material rochoso representativo da produção de cada núcleo e que serviu de amostragem para toda a panóplia de trabalho laboratorial de caracterização petrográfica e físico-mecânica.

O estudo petrográfico centrou-se na análise macro e microscópica, do conteúdo mineralógico e da composição química. Conseguindo-se perceber que estamos a trabalhar com dois tipos de calcários distintos, os calcários brancos (Porto de Mós – Alcanede e Alenquer) quase “puros” formados quase exclusivamente por calcite, enquanto o calcário negro (Alqueidão da Serra) apresenta alguns sulfuretos (pirite e calcopirite) que atestam o metamorfismo de contacto de que foi alvo, comprovado pela maior abundância de S, Si e Fe.

Quanto às propriedades físico-mecânicas que constituem elemento à avaliação e previsão do desempenho em obra, nomeadamente ao nível das suas características índice (resistência, massa volúmica, porosidade, etc.), do seu comportamento quando submetidas a diferentes acções climáticas e de utilização (desgaste, gelo-degelo, cristalização de sais), verificou-se que estes calcários apresentam um desempenho condizente com pedras de melhor qualidade a aplicar na calçada portuguesa, possuindo por exemplo uma resistência à compressão uniaxial de 82, 93 e 99 MPa e uma absorção de água à pressão atmosférica de 0,57, 1,34 e 0,16 % para a pedra de Alqueidão da Serra, Porto de Mós – Alcanede e Alenquer, respectivamente. No entanto há a salientar uma certa limitação em condições rigorosas de gelividade, onde poderá ocorrer a ruptura das pedras.

**Palavras-Chave:** Calçada portuguesa, pedra de calçada, calcários, exploração, caracterização.

## ***Abstract***

The Portuguese pavement has artistic features and is used in Portugal since middle 19th century up to the present and already widespread in countries worldwide. It consists in the arrangement of limestone cubes, which their quality depends mainly from its geometrical regularity of rock cubes and of the intrinsic characteristics of the rock itself. The cubes manufacture is almost artisanal with the exception for the rock blasting of the limestone massif.

The purpose of this dissertation is focused on the study of the limestone's used in Portuguese pavement that has been exploited in limestone quarries of the Mesocenoic Western Border, specifically in areas as Alqueidão da Serra, Porto de Mós - Alcanede and Alenquer. Those regions corresponds to the major pavement production centers in Portugal

Part of this study was dedicated to fieldwork in the production centers, to determine the labor specificities of each one, and their geographical and geological framework. Posteriorly, rock samples representative of each production center was collected and used for petrographic and physic-mechanical characterization.

The petrographic study was based in macro and microscopic analysis of the existent minerals and chemical rock composition. The results shows that samples corresponds to two distinct types of limestones, the white limestone (Porto de Mós - Alcanede and Alenquer limestones) almost "pure" formed by calcite, while the black limestone (Alqueidão da Serra) presents some sulfides (pyrite and chalcopyrite) related with the contact metamorphism, highlighted by the high content of S, Fe and Si in their chemical composition.

The physic-mechanical characteristics constitute an element of evaluation and performance prediction of the pavement, particularly in terms of their indices characteristics (strength, density, porosity, etc.) and behavior when subjected to different climatic conditions (wear, freeze-thaw, and salt crystallization) and overuse. The evaluation shows that these limestones present a very good performance similar to the best quality stones used in Portuguese pavement, with an uniaxial compressive strength of 82, 93 and 99 MPa and water absorption at atmospheric pressure of 0.57, 1.34 and 0.16 % for Alqueidão da Serra, Porto de Mós - Alcanede and Alenquer stones, respectively. However, under certain severe conditions of gelativity its application must be restricted, due to its possible fracturing.

**Key-Words:** Portuguese pavement, Pavement stone, Limestone, Exploitation, Characterization.

## Agradecimentos

Terminada mais esta etapa académica, quero aqui deixar o meu reconhecimento às pessoas que contribuíram para a realização desta dissertação, nomeadamente:

À Professora Doutora Lídia Catarino por toda disponibilidade e sentido critico que revelou ao longo do trabalho;

Ao Professor Doutor Fernando Pedro Figueiredo por toda a ajuda que me facultou na realização das diversas tarefas, assim como toda a autonomia e confiança que me concedeu;

Ao Professor Doutor Fernando Pita que sempre demonstrou disponibilidade em ajudar.

Ao Sr. Tito Azevedo, ao Sr. Márcio da Silva e ao Professor Doutor Rui Teixeira do laboratório de petrologia do Departamento de Geologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro pela hospitalidade e ensinamentos aquando da realização das lâminas delgadas;

Aos Eng. João Paulo Dias e Rui Azevedo do Instituto Pedro Nunes pela disponibilidade e possibilidade de assistir à realização do ensaio de desgaste por abrasão.

Ao Sr. Carlos Maia pela realização das difracções de raios-X e da análise e disponibilização de elementos que enriqueceram este trabalho.

A todas as pessoas e empresas que bem me receberam nas muitas pedreiras que eu visitei e que disponibilizaram o material com o qual se realizou este estudo.

Quero também agradecer a todos os Professores da Universidade de Coimbra que contribuíram para a minha formação académica e que me deram o privilégio dos seus ensinamentos.

Gratulo ao Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, que foi a minha escola ao longo destes últimos anos, assim como a todos os seus professores e funcionários.

Deixo aqui um abraço a todos os colegas e amigos que fiz em Coimbra, em particular ao Válder Silva e ao Fábio Antunes que sempre me acompanharam ao longo deste percurso.

Um agradecimento especial à minha namorada, Joana Marcelo, por todo o apoio e ajuda na realização desta dissertação e também ao longo de todos estes anos.

Agradeço aos meus familiares por todo o apoio que sempre manifestaram, em especial aos meus pais, a quem eu dedico as últimas palavras do meu percurso académico em forma de gratidão por tudo o que me proporcionaram desde o meu primeiro dia.

*A quem a esta arte dedicou  
toda a sua vida, ao meu pai,  
quem melhor a defendeu!*



# Índice

<b>Resumo</b> .....	I
<b>Abstract</b> .....	II
<b>Agradecimentos</b> .....	III
<b>Índice</b> .....	V
<b>Índice de Figuras</b> .....	IX
<b>Índice de Tabelas</b> .....	XIII
<b>Índice de Gráficos</b> .....	XIV
<b>Abreviaturas, Siglas e Notações</b> .....	XVI
<b>Capítulo 1 – Introdução</b> .....	1
1.1. Objectivos .....	1
1.2. Metodologia .....	1
1.3. Organização da Dissertação .....	2
<b>Capítulo 2 – Calçada Portuguesa</b> .....	4
2.1. Origens da Calçada Portuguesa .....	4
2.2. Especificações da Pedra de Calçada.....	7
2.2.1. Cor .....	8
2.2.2. Dimensão .....	10
2.2.3. Rendimento.....	10
2.2.4. Preços.....	11
2.3. Assentamento da Calçada .....	11
2.3.1. Técnicas de Calcetamento .....	15
2.3.2. Restauro da Calçada.....	17
2.3.3. Desenhos .....	18
2.3.4. Calçadas Interiores .....	20
2.4. Qualidade da Calçada.....	20
<b>Capítulo 3 – Exploração de Calcário para Calçada</b> .....	22
3.1. Enquadramento Legislativo .....	23
3.2. Exploração de Calcário para Calçada .....	24
3.2.1. Metodologia de Exploração .....	25
3.2.2. Operações Preparatórias .....	25
3.2.3. Método de Desmonte .....	26
3.2.4. Remoção e Transporte.....	28
3.2.5. Esquadrejamento .....	29
3.2.6. Produção da Pedra de Calçada.....	31

3.2.7. Parqueamento e Expedição .....	33
3.2.8. Fluxograma do Ciclo de Produção.....	33
3.3. Impactes das Pedreiras de Calçada.....	33
3.3.1. Avaliação do Impacte Ambiental .....	35
3.3.2. Plano Ambiental e de Recuperação Paisagística .....	38
<b>Capítulo 4 – Núcleos de Explorações de Calcário para Calçada .....</b>	<b>40</b>
4.1. Enquadramento Geográfico .....	40
4.2. Enquadramento Geológico.....	40
4.3. Núcleo de Explorações de Alqueidão da Serra .....	41
4.3.1. Enquadramento Geográfico.....	42
4.3.2. Enquadramento Geológico .....	42
4.4. Núcleo de Explorações de Porto de Mós - Alcanede.....	45
4.4.1. Enquadramento Geográfico.....	45
4.4.2. Enquadramento Geológico .....	46
4.5. Núcleo de Explorações de Alenquer .....	48
4.5.1. Enquadramento Geográfico.....	49
4.5.2. Enquadramento Geológico .....	50
<b>Capítulo 5 – Caracterização e Certificação da Pedra Natural para a Calçada Portuguesa .....</b>	<b>53</b>
5.1. Norma Portuguesa NP EN 1342:2014 - Caracterização de Cubos e Paralelepípedos de Pedra Natural para Pavimentos Exteriores .....	53
5.1.1. Requisitos das Características Geométricas .....	54
5.1.2. Amostra de Referência .....	54
5.1.3. Requisitos sobre as Características da Pedra .....	55
5.1.4. Cálculo dos Valores a Declarar .....	56
5.1.5. Critérios de Aceitação .....	57
5.2. Marcação CE .....	57
5.3. Caracterização das Pedras em Estudo .....	58
5.3.1. Amostragem.....	60
5.3.2. Preparação dos Provetes .....	62
<b>Capítulo 6 – Caracterização Petrográfica .....</b>	<b>63</b>
6.1. Estudo Macroscópico.....	63
6.1.1. Calcário do Tipo A.....	63
6.1.2. Calcário do Tipo C.....	64
6.1.3. Calcário do Tipo D.....	65
6.2. Caracterização Colorimétrica .....	65
6.2.1. Metodologia Utilizada .....	67
6.2.2. Resultados Obtidos .....	68

6.3. Estudo Microscópico .....	69
6.3.1. Calcário do Tipo A.....	69
6.3.2. Calcário do Tipo C.....	70
6.3.3. Calcário do Tipo D.....	70
6.4. Caracterização Mineralógica por Difracção de Raio-X .....	71
6.4.1. Metodologia Utilizada .....	71
6.4.2. Resultados Obtidos .....	72
6.5. Determinação da Composição Química .....	72
6.5.1. Metodologia Utilizada .....	73
6.5.2. Resultados Obtidos .....	74
<b>Capítulo 7 – Caracterização Físico-Mecânica.....</b>	<b>75</b>
7.1. Determinação da Resistência à Compressão Uniaxial .....	75
7.1.1. Procedimento do Ensaio .....	76
7.1.2. Resultados Obtidos .....	77
7.2. Determinação da Resistência à Carga Pontual .....	77
7.2.1. Procedimento do Ensaio .....	80
7.2.2. Resultados Obtidos .....	82
7.3. Determinação da Dureza de Schmidt.....	84
7.3.1. Procedimento do Ensaio .....	84
7.3.2. Resultados Obtidos .....	85
7.4. Determinação da Absorção de Água à Pressão Atmosférica .....	85
7.4.1. Procedimento do Ensaio .....	86
7.4.2. Resultados Obtidos .....	86
7.5. Determinação da Massa Volúmica Real e Aparente e da Porosidade Total e Aberta.....	87
7.5.1. Procedimento do Ensaio .....	88
7.5.2. Resultados Obtidos .....	91
7.6. Determinação da Absorção da Água por Capilaridade.....	92
7.6.1. Procedimento do Ensaio .....	93
7.6.2. Resultados Obtidos .....	93
7.7. Determinação da Velocidade de Propagação do Som .....	95
7.7.1. Procedimento do Ensaio .....	97
7.7.2. Resultados Obtidos .....	98
7.8. Determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico .....	99
7.8.1. Procedimento do Ensaio .....	101
7.8.2. Resultados Obtidos .....	102
7.9. Determinação da Resistência ao Desgaste por Abrasão .....	103
7.9.1. Procedimento do Ensaio .....	104

7.9.2. Resultados Obtidos .....	105
7.10. Determinação da Resistência ao Desgaste em Meio Aquoso .....	106
7.10.1. Procedimento do Ensaio .....	107
7.10.2. Resultados Obtidos .....	108
7.11. Determinação da Resistência à Cristalização de Sais.....	108
7.11.1. Procedimento do Ensaio .....	110
7.11.2. Resultados Obtidos .....	111
7.12. Determinação da Resistência ao Gelo .....	112
7.12.1. Procedimento do Ensaio .....	114
7.12.2. Resultados Obtidos .....	115
<b>Capítulo 8 – Considerações Finais .....</b>	<b>118</b>
8.1. Trabalhos Futuros.....	120
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>121</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>128</b>

## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Troço B da “Calçadinha” em São Brás de Alportel. Fazia parte da via romana que ligava a cidade de <i>Ossonoba</i> (Faro) a <i>Pax Julia</i> (Beja) (Silva, 2002) .....	5
Figura 2.2 – Estrutura para construção de um bom pavimento em mosaico, segundo Vitruvius 30-20 a. C., (retirado de Carrasco, 2008).....	5
Figura 2.3 – Fotografia de 1842 com a Calçada Portuguesa em ziguezague no Castelo de São Jorge, (retirado de Marta, 2006). .....	7
Figura 2.4 – Pedras de calçada 10x10 cm de diferentes tipos de calcário: a) calcário vidraço; b) calcário granular.....	8
Figura 2.5 – Calçada portuguesa 5x6 (miúda) onde são usadas diferentes colorações de calcário para formar padrões decorativos, com calcário branco de Alenquer, calcário negro de Alqueidão da Serra e calcário rosa de Albufeira.....	9
Figura 2.6 – Projecto de remodelação de uma avenida em Sintra, onde será aplicado calçada nos passeios (calçada miúda) e nos estacionamento (calçada em meia-pedra), (adaptado de SMAS Sintra, 2014).....	13
Figura 2.7 – Estrutura em perfil de uma calçada portuguesa miúda (5x7). .....	13
Figura 2.8 – Calceteiros a realizarem uma calçada portuguesa com meia-pedra de calcário vidraço branco de Alenquer.....	14
Figura 2.9 – Técnicas de calcetamento. ....	16
Figura 2.10 – Exemplo de um correcto contorno e preenchimento de caixas numa calçada portuguesa. ... ..	17
Figura 2.11 – Exemplo de um pavimento em calçada onde se conjugam várias imperfeições: 1 – arranque das pedras sem que se tenha feito a respectiva reposição; 2 – é evidente que a zona inferior da fotografia já tinha sido restaurada, mas desrespeitando o padrão do assentamento original; 3 – juntas entre as pedras demasiado largas. ... ..	18
Figura 2.12 – Limpeza de calçada, onde é notório a melhoria estética depois de limpa, (retirado de Every Clean - Portugal, 2014). ....	18
Figura 2.13 – Calçada onde é notória a diferença entre uma parte que já foi limpa e a outra onde está totalmente colonizada por matéria orgânica.....	18
Figura 2.14 – Desenho em calçada do emblema da colectividade de uma aldeia em Alenquer, (Centro Popular de Recreio e Cultura do Bairro). .....	19
Figura 2.15 – Calçada portuguesa na Praça dos Restauradores em Lisboa, com desenho do padrão da autoria do pintor João Abel Manta. ....	20
Figura 3.1 – Diferentes tipologias de lavra: a) em flanco de encosta; b) em corta. ....	22
Figura 3.2 – Desmonte mecânico do maciço calcário com recurso de um <i>ripper</i> , onde se evidencia o arranque de um bloco por uma descontinuidade. ....	27
Figura 3.3 – Ciclo de desmonte com recurso a explosivos: a) Perfuração; b) Carregamento; c) Detonação; d) Arranque. ....	28
Figura 3.4 – Carregamento da matéria-prima num <i>dumper</i> , para ser transportada e colocada à disposição dos operários para esquadrejamento.....	29
Figura 3.5 – Fracturação de um bloco de calcário com recurso a martelo hidráulico, acoplado na lança de uma retroescavadora.....	30

Figura 3.6 – Técnica de corte de blocos de calcário com recurso a cunhas: a) Realização dos furos; b) Colocação da cunha; c) Percussão da cunha; d) Separação dos blocos.....	31
Figura 3.7 – Processo de “traçagem” dos blocos de calcário: a) subdivisão dos blocos de maior dimensão com uma marreta de 8 kg; b) subdivisão dos blocos mais pequenos com uma marreta de 4 kg. ....	31
Figura 3.8 – Corte de pedra de calçada: a) talho dos blocos no chão; aparelhamento da pedra na concha da mão.....	32
Figura 3.9 – Carregamento de pedra de calçada 5x7. ....	33
Figura 3.10 – Fluxograma de um possível ciclo de produção para uma pedreira de calcário para calçada.....	34
Figura 3.11 – Esquema dos tipos de intervenção na recuperação de pedreiras a céu aberto, em que só o exemplo A é compatível com a restauração, sendo os restantes conciliáveis com a reabilitação e com a reconversão (adaptado de Sousa, 1993, in Bastos & Silva, 2006). ...	39
Figura 4.1 – Enquadramento geográfico dos núcleos de explorações de calcário para calçada. ....	41
Figura 4.2 – Enquadramento dos núcleos de Alqueidão da Serra, Porto de Mós - Alcanede e Alenquer no mapa tectono-estratigráfico de Portugal, (mapa tectono-estratigráfico adaptado de Ferreira, 2000).....	41
Figura 4.3 – Enquadramento geográfico das pedreiras de calçada do Núcleo de Explorações de Alqueidão da Serra, na Folha 308 (Porto de Mós) da Carta Militar de Portugal na escala 1:25.000. Também se encontra projectada a imagem aérea correspondente ao local das pedreiras de calçada. ....	43
Figura 4.4 – Enquadramento geológico do Núcleo de Explorações de Alqueidão da Serra. Adaptado da Folha 27-A (Vila Nova de Ourém) da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50.000. ....	44
Figura 4.5 – Pedreira de pedra de calçada no Núcleo de Explorações de Porto de Mós – Alcanede onde se pode observar a estratificação sub-horizontal do maciço calcário. ....	45
Figura 4.6 – Enquadramento geográfico das pedreiras de calçada do Núcleo de Explorações de Porto de Mós - Alcanede, nas Folhas 317 (Alcobaça), 318 (Mira de Aire), 327 (Benedita) e 328 (Alcanena) da Carta Militar de Portugal na escala 1:25.000. Também se encontra projectada a imagem aérea correspondente ao local das pedreiras de calçada. ....	47
Figura 4.7 – Enquadramento geológico da maioria das pedreiras de calçada do Núcleo de Explorações de Porto de Mós – Alcanede. Adaptado das folhas 27 A - Vila Nova de Ourém (1998) e 27 C - Torres Novas (1969) da Carta Geológica de Portugal à escala de 1:50.000. ....	48
Figura 4.8 – Frentes de desmonte no maciço dos “Calcários de Ota” onde é evidente o diaclasamento desta formação, não se conseguindo identificar a continuidade de qualquer camada. ....	49
Figura 4.9 – Enquadramento geográfico das pedreiras de calçada do Núcleo de Explorações de Alenquer, nas Folhas 363 (Abrigada) e 376 (Alenquer) da Carta Militar de Portugal na escala 1:25.000.....	51
Figura 4.10 – Perfil geológico do “ <i>horst</i> ” que passa na área das pedreiras de calçada na Serra de Atouguia das Cabras, (adaptado de Leinfelder, 1994).....	52
Figura 4.11 – Enquadramento geológico das pedreiras de calçada do Núcleo de Explorações de Alenquer. Adaptado das Folhas 30 D - Alenquer e 30 B - Bombarral da Carta Geológica de Portugal à escala de 1:50.000. ....	52

Figura 6.1 – Pedra de calçada do calcário do tipo A: a) aspecto da sua superfície obtida por fendilhamento; b) pormenor da sua textura. ....	64
Figura 6.2 – Componentes aloquímicos no calcário do tipo A: a) oólitos e pisólitos; b) gastrópode; c) bivalve. ....	64
Figura 6.3 – Pedra de calçada do calcário do tipo C: a) aspecto da sua superfície obtida por fendilhamento; b) pormenor da sua textura; c) oólitos e pisólitos; d) gastrópodes. ....	65
Figura 6.4 – Pedra de calçada do calcário do tipo D: a) aspecto da sua superfície obtida por fendilhamento; b) pormenor da sua textura; c) cristais de pirite. ....	66
Figura 6.5 – Procedimento e equipamento utilizado na caracterização colorimétrica dos calcários em estudo. ....	67
Figura 6.6 – Fotomicrografias do calcário A em nicóis cruzados e ampliadas 4x: a) matriz constituída por pelóides e alguns oólitos onde se observa filonetes preenchidos por cristais de calcite (esparite); b) fragmento fóssil preenchido por calcite espática. ....	70
Figura 6.7 – Fotomicrografias do calcário C em nicóis cruzados e ampliadas 4x: a) matriz micrítica onde surge simultaneamente cimento de calcite espática; b) nódulos de cristais de calcite que também preenchem os veios. ....	70
Figura 6.8 – Fotomicrografias do calcário D em nicóis cruzados: a) matriz micrítica onde há abundancia de calcite espática e opacos que também surgem a preencher veios, notando-se ainda uma certa orientação de bandas de minerais (ampliação 4x); b) fragmento fóssil preenchido por calcite espática (ampliação 10x). ....	71
Figura 6.9 – Procedimento e equipamentos utilizados na determinação da composição química dos calcários em estudo. ....	73
Figura 7.1 – Mecanismo de fracturação típica da maioria dos provetes ensaiados: a) provete no centro dos pratos da prensa com a respectiva membrana de neoprene nas faces; b) surgimento da primeira fractura; c) desenvolvimento de múltiplas fracturas; d) provete completamente fragmentado após atingir a carga máxima; e) configuração do provete após o ensaio de RCU. ....	78
Figura 7.2 – Equipamento utilizado na realização do ensaio de resistência à carga pontual. ....	82
Figura 7.3 – Disposição dos provetes nos recipientes onde foram realizados os ensaios de absorção de água à pressão atmosférica. ....	86
Figura 7.4 – Dipositivo utilizado no ensaio de determinação da massa volúmica e porosidade: a) provetes dentro de um recipiente que estava sujeito a uma depressão de 2 kPa realizada pela bomba de vácuo; b) enchimento do recipiente com água destilada, onde se pode observar a manutenção da depressão; c) provetes totalmente imersos e já à pressão atmosférica. ....	89
Figura 7.5 – Procedimento utilizado na determinação da massa volúmica real e da porosidade total: (I) redução da granulometria dos fragmentos dos provetes no britador de maxilas; (II) moagem dos provetes no moinho de anéis; (III) crivagem do pó a uma granulometria inferior a 0,063 mm; (IV) colocação e pesagem do pó no picnómetro; (V) picnómetros sob vácuo para a retirada completa do ar; (VI) picnómetros em repouso para que o material assente e a água fique límpida para depois ser colocada de nível. ....	90
Figura 7.6 – Provetes submetidos ao ensaio de absorção de água por capilaridade. ....	93
Figura 7.7 – Desenho esquemático do movimento das partículas nas ondas longitudinais (P) e transversais (S), (adaptado de Pedrosa, 2013). ....	96
Figura 7.8 – Relação entre a tensão e a deformação para o módulo de elasticidade de Young, (adaptado de Piauilino, 2014). ....	101

Figura 7.9 – Metodologia do ensaio para determinação da velocidade de propagação das ondas S com transdutores de 250 kHz, onde também se podem observar os transdutores de 54 kHz utilizados para a determinação da velocidade de propagação das ondas P. ....	102
Figura 7.10 – Gráfico do registo da propagação das ondas ultra-sónicas, onde está marcado o momento da chegada da onda S. ....	102
Figura 7.11 – Esquema de desgaste por abrasão a dois e três corpos, (adaptado de Silveira, 2007). ....	104
Figura 7.12 – Ensaio de desgaste por abrasão: a) pormenor do contacto da roda de aço com o provete e da queda do material abrasivo; b) sulco característico deixado nos provetes. .	105
Figura 7.13 – Equipamento utilizado no ensaio de desgaste em meio húmido. ....	108
Figura 7.14 – Embebição dos provetes na solução salina onde se encontravam com um afastamento entre si de pelo menos 10 mm e 20 mm relativamente às paredes do recipiente e com o nível da solução a situar-se cerca de 8 mm acima do seu topo. Neste procedimento também se utilizou um multímetro para controlo da temperatura da solução. ....	110
Figura 7.15 – Provette onde é evidente o preenchimento das descontinuidades por cristais de sulfato de sódio. ....	112
Figura 7.16 – Calçada portuguesa 5x7 numa moradia em Toronto, Canadá: a) zona de circulação de peões onde apesar de pouco cuidada a calçada mantém a sua consistência; b) zona de passagem de veículos onde a calçada está bastante deteriorada. ....	114
Figura 7.17 – Disposição dos provetes dentro do congelador onde se procedia ao controlo da temperatura de congelação. ....	115
Figura 7.18 – Provette referência utilizado no controlo da temperatura: a) sonda de temperatura que será introduzida no pequeno orifício no centro do provete; b) orifício já selado com cimento. ....	115
Figura 7.19 – Provetes do calcário C (C <sub>4</sub> , C <sub>5</sub> e C <sub>10</sub> ) onde surgiram algumas fracturas. ....	116
Figura 7.20 – Provetes do calcário D (D <sub>7</sub> e D <sub>10</sub> ) que se partiram por grandes fracturas. ....	116
Figura 7.21 – Provetes do calcário A que durante o ensaio de RCU após os ciclos de gelo-degelo se fracturaram segundo planos de descontinuidades: a) descontinuidade preenchida por calcite espática (A <sub>5</sub> ); b) descontinuidade preenchida por óxidos de ferro (A <sub>7</sub> ). ....	117



## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Algumas colorações de calcário vidraço mais utilizadas na Calçada Portuguesa e o seu campo de aplicação, as imagens correspondem a cubos de calçada de 9x11 cm. ....	9
Tabela 2.2 – Classes dimensionais de pedra de calçada e o seu campo de aplicação. ....	10
Tabela 2.3 – Rendimento da pedra de calçada em função da dimensão. ....	11
Tabela 2.4 – Preço da pedra de calçada vidraço junto das explorações em função da cor e da classe dimensional. ....	12
Tabela 2.5 – Variação da espessura da base em função da dimensão da calçada. ....	12
Tabela 2.6 – Variação da largura das juntas em função da dimensão da pedra de calçada. ....	14
Tabela 5.1 – Características a determinar em cubos e paralelepípedos de pedra natural para pavimentos exteriores, (retirado da NP EN 1342:2014). ....	55
Tabela 5.2 – Factor quantil ( $K_s$ ) relativamente ao número de valores medidos ( $n$ ), correspondente ao quantil 5 % para um nível de confiança de 75 %, (retirado da NP EN 1342:2014). ....	57
Tabela 5.3 – Critérios de conformidade para aceitação de um lote de pedra natural, (adaptado do Anexo A da NP EN 1342:2014). ....	58
Tabela 5.4 – Valores propostos para a resistência ao desgaste de acordo com as características do tráfego, (adaptado de Henriques <i>et al.</i> , 2009). ....	61
Tabela 5.5 – Número de ciclos do ensaio gelo-degelo a que deve resistir a pedra de calçada de acordo com a altitude onde será empregue em Portugal Continental, (adaptado de Henriques <i>et al.</i> , 2009). ....	61
Tabela 5.6 – Número de ciclos do ensaio gelo-degelo propostos para pedra de calçada a exportar destinada a pavimentos exteriores em regiões afectadas pela acção do gelo, (adaptado de Henriques <i>et al.</i> , 2009). ....	61
Tabela 5.7 – Sigla, símbolo e cor correspondente ao calcário em estudo de cada núcleo de explorações de calcário para calçada. ....	62
Tabela 6.1 – Composição química dos calcários. ....	74
Tabela 7.1 – Valores do factor $K$ determinados para cada calcário e correspondentes valores de RCU sob condições de saturação ( $RCU_s$ ) calculados através da multiplicação do factor $K$ com o $I_{S(50)} saturado$ (Equação 7.4). ....	83
Tabela 8.1 – Síntese dos parâmetros físico-mecânicos determinados para os calcários em estudo. ....	119

## Índice de Gráficos

Gráfico 6.1 – Curvas espectrais dos valores médios do conjunto das medições realizadas para cada tipo de calcário. ....	68
Gráfico 6.2 – Projecção dos valores médios de $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ das amostras de cada calcário, o volume das esferas corresponde ao valor do índice $L^*$ .....	69
Gráfico 6.3 – Difractograma obtido para o calcário do tipo A. Legenda: Cal – calcite; Qtz – quartzo; Cl – clorite; Il – ilite; Lpc – lepidocrocite. ....	72
Gráfico 6.4 – Difractograma obtido para o calcário do tipo C. Legenda: Cal – calcite; Qtz – quartzo; Cl – clorite; Il – ilite; Lpc – lepidocrocite. ....	73
Gráfico 6.5 – Difractograma obtido para o calcário do tipo D. Legenda: Cal – calcite; Qtz – quartzo; Cl – clorite; Il – ilite; Lpc – lepidocrocite; Kln – caulinite; Gt – goethite; Py – pirite; Ccp – calcopirite. ....	73
Gráfico 7.1 – Gráfico do ensaio de RCU do provete $C_{18}$ , que corresponde ao modelo característico da maioria dos provetes ensaiados. ....	79
Gráfico 7.2 – Valor médio de cada calcário para a resistência à compressão uniaxial máxima ( $RCU_{max}$ ) e para o aparecimento da primeira fractura ( $RCU_{1^{af}}$ ).....	79
Gráfico 7.3 – Valor médio dos índices de resistência à carga pontual corrigidos ( $I_{S(50)}$ ) para os ensaios com provetes secos ( $I_{S(50)seco}$ ) e saturados ( $I_{S(50)saturado}$ ). ....	83
Gráfico 7.4 – Valor médio da absorção de água à pressão atmosférica dos calcários em estudo. ....	87
Gráfico 7.5 – Valor médio da porosidade aberta e total dos calcários em estudo. ....	92
Gráfico 7.6 – Valor médio da massa volúmica real e aparente dos calcários em estudo. ....	92
Gráfico 7.7 – Valor médio do índice de qualidade dos calcários em estudo.....	92
Gráfico 7.8 – Absorção de água por capilaridade para os 3 calcários em análise.....	95
Gráfico 7.9 – Valor médio da absorção de água por capilaridade dos calcários em estudo..	95
Gráfico 7.10 – Valor médio da velocidade das ondas longitudinais em condições de provetes secos, saturados e após 56 ciclos de gelo-degelo para cada calcário em estudo. ....	99
Gráfico 7.11 – Valor médio do índice de qualidade de cada um dos calcários em estudo obtido a partir do valor médio da velocidade das ondas longitudinais em provetes secos.....	99
Gráfico 7.12 – Valor médio do módulo de Young em condições de provetes secos, saturados e após 56 ciclos de gelo-degelo para cada calcário em estudo. ....	103
Gráfico 7.13 – Valor médio do coeficiente de Poisson em condições de provetes secos, saturados e após 56 ciclos de gelo-degelo para cada calcário em estudo.....	103
Gráfico 7.14 – Valor médio da perda de massa por abrasão no ensaio de desgaste para cada calcário em estudo. ....	106
Gráfico 7.15 – Valor médio da perda de volume por abrasão no ensaio de desgaste para cada calcário em estudo. ....	106
Gráfico 7.16 – Resistência de cada calcário ao desgaste em meio aquoso em função do número de rotações. ....	109
Gráfico 7.17 – Variação da massa de cada calcário em estudo após os ciclos de cristalização de sais.....	111

Gráfico 7.18 – Valor médio da RCU após 56 ciclos de gelo-degelo em termos da resistência máxima ( $RCU_g max$ ) e para o surgimento da primeira fractura ( $RCU_g 1^{af}$ ) dos calcários em estudo. .... 117

## Abreviaturas, Siglas e Notações

Apesar do significado estar referido no texto, julga-se conveniente apresentar a lista das mais importantes.

$A$  – Área

$A_b$  – Absorção de água à pressão atmosférica

$C$  – Coeficiente de absorção de água por capilaridade

CIE – Comissão Internacional de Iluminação

cm – Centímetro

$D$  – Diâmetro

$D'$  – Espessura

$D_e$  – Diâmetro equivalente

DGEG - Direcção Geral de Energia e Geologia

$E_d$  – Módulo de Young

$E_H$  – Valor máximo esperado

$E_L$  – Valor mínimo esperado

*et al.* – *et alia* (“e outros”)

$F$  – Carga de ruptura

$F'$  - Factor correctivo

g – Grama

GPa – Gigapascal

h – Hora

ha – hectare

$I_d$  – Índice de durabilidade

in – em

$IQ_p$  – Índice de qualidade da rocha (porosidade)

$IQ_v$  – Índice de qualidade da rocha (velocidade de propagação do som)

$I_s$  – Resistência à carga pontual

$I_{s(50)}$  – Resistência à carga pontual normalizada

ISRM – International Society for Rock Mechanics

$K$  – Factor de conversão

kg – Quilograma

km – Quilómetro

kN – Quilonewton

$K_s$  - Factor quantil relativamente ao número de valores medidos ( $n$ )

kV – Quilovolt  
 $L$  – Comprimento  
 $m$  – Metro  
 $m^2$  – Metro quadrado  
 $m^3$  – Metro cúbico  
 $m_1$  – Massa do picnómetro cheio com água destilada e contendo o provete moído  
 $m_2$  – Massa do picnómetro cheio de água destilada  
max. – máximo  
 $m_c$  – Massa do provete moído e seco  
 $m_d$  – Massa do provete seco  
 $m_h$  – Massa do provete imerso em água  
 $m_i$  – Massas sucessivas do provete  
 $m_s$  – Massa do provete saturado  
 $M_p$  – Massa perdida por abrasão  
mm – Milímetro  
MPa – Megapascal  
MCE – Maciço Calcário Estremenho  
 $n$  – Número de valores medidos  
nm – Nanómetro  
OPM – Óptimo Proctor Modificado  
 $P$  – Carga pontual  
 $R$  – Dureza de Schmidt  
 $RCU$  – Resistência à compressão uniaxial (seco)  
 $RCU_g$  – Resistência à compressão uniaxial (gelo-degelo)  
 $RCU_s$  – Resistência à compressão uniaxial (saturado)  
 $RCU_{max}$  – Resistência à compressão uniaxial máxima  
 $RCU_{1^a f}$  – Resistência à compressão uniaxial à primeira fractura  
s – Segundo  
 $S$  – Desvio padrão  
 $S_{ln}$  – Desvio padrão logarítmico  
s. d. – Sem data  
SRV – Valor de resistência ao escorregamento  
t – Tonelada  
 $t$  – Tempo  
 $T$  – Tempo de trânsito  
 $V$  – Velocidade

$V_p$  – Velocidade de propagação das ondas longitudinais

$V_p$  – Volume perdido por abrasão

$V_p^*$  – Velocidade de propagação das ondas longitudinais teórica para uma porosidade nula

$V_s$  – Velocidade de propagação das ondas transversais

$v$  – Coeficiente de variação

$v_d$  – Coeficiente de Poisson;

$W$  – Largura

$w$  – Teor de água

WGS 1984 - World Geodesic System 1984

$\bar{x}$  – Valor médio

$\bar{x}_{ln}$  – Média logarítmica

$x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$  – Valores medidos

$\Delta M$  – Variação da massa por cristalização de sais

$\rho$  – Porosidade total

$\rho_b$  – Massa volúmica aparente

$\rho_r$  – Massa volúmica real

$\rho_{rh}$  - Massa volúmica real da água a 20 °C

$\rho_0$  – Porosidade aberta

% – Percentagem

° – grau

°C – Graus Celsius

$\mu\text{m}$  – Micrómetro

## Capítulo 1 – Introdução

A calçada portuguesa é um pavimento empedrado cujos componentes são em pedra natural, com base em cubos de calcário assentes e dispostos no chão de forma mais ou menos uniforme.

A confecção deste pavimento envolve duas fases distintas, a primeira diz respeito à produção da pedra de calçada e a segunda consiste no assentamento das pedras (calçetamento), sendo a sua qualidade final a soma destas e às quais também devemos acrescentar as propriedades intrínsecas da própria pedra utilizada.

Sendo a pedra natural uma excelente opção para os pavimentos que conduz a um justificado reviver do tradicionalismo, leva-nos a ter este interesse pela utilização desta rocha ornamental nos mais variadíssimos espaços e do qual este trabalho é nosso testemunho.

A grande aptidão deste material e a sua versatilidade associam-se para perpetuarem por largos anos a função para que foram criadas, proporcionando pavimentos com um aspecto agradável e acolhedor, carregado do simbolismo que esta arte transmite.

A produção desta pedra para ser aplicada em pavimento constitui uma actividade tradicional no nosso país, encontrando-se em diversos locais nos maciços calcários das orlas mesocenoicas, constituindo mesmo alguns núcleos de explorações que pela especificidade da própria pedra e do seu método de produção diferenciam-se uns dos outros.

Pelo que facilmente se compreende que a execução de estudos e ensaios laboratoriais fornecerá elementos que caracterizam e qualificam tecnologicamente cada um destes tipos de pedra para a sua utilização enquanto pavimento, que também se repercutirá favoravelmente no sentido de garantir o seu desempenho em função de cada tipo de utilização.

### 1.1. Objectivos

Não é pertença deste trabalho estabelecer uma classificação entre os tipos de pedra que são aqui estudados, mas sim fornecer elementos necessários e suficientes que permitam seleccionar qual destas pedras de calçada é mais indicada em função de cada tipo de utilização e do valor artístico que se pretende do pavimento. Este propósito só é exequível a partir da certificação da pedra quanto às suas características geométricas, petrográficas e físico-mecânicas, informação esta que só é possível alcançar através de ensaios preconizados para a caracterização das matérias-primas e para o controlo dos produtos acabados.

Neste sentido definiu-se como objectivo principal deste trabalho, contribuir para um maior conhecimento das propriedades que condicionam o comportamento da pedra de calçada quando aplicada em obra, sendo que para isso adoptou-se uma série de procedimentos que permitiram realizar a sua caracterização petrográfica, mineralógica, química, física e mecânica.

### 1.2. Metodologia

Para a persecução dos nossos objectivos adoptamos uma metodologia de trabalho que nos permitiu ter o máximo rendimento com os meios disponíveis. Após a delineação do tema começou-se a fazer um levantamento dos locais onde se inseriam as pedreiras de calcário para calçada, tendo-se realizado um levantamento de campo exaustivo ao longo de todo o país, durante o qual, para além do seu enquadramento, foi executado uma amostragem representativa

## Introdução

das características da pedra produzida em cada núcleo de explorações, tendo-se desenvolvido neste trabalho a caracterização de apenas três deles (Alqueidão da Serra, Porto de Mós – Alcanede e Alenquer).

A pesquisa bibliográfica foi sendo realizada ao longo de todo o trabalho, no entanto, procurou-se logo desde o início ter um apetrecho de informação que permitisse definir o método de trabalho direccionando-o de modo a coincidir com os objectivos estabelecidos. O conhecimento adquirido nesta fase mais teórica permitiu abordar com mais segurança os problemas práticos que foram surgindo de modo a conseguir-se a sua resolução.

Para a caracterização dos calcários foi realizado um estudo petrográfico que envolveu uma descrição macroscópica, completada com a determinação dos índices colorimétricos, e microscópica, tendo sido complementado com a análise do conteúdo mineralógico e da composição química. Ao estudo destes calcários foi ainda acrescido uma série de ensaios que permitiram a sua caracterização físico-mecânica.

À excepção do ensaio de desgaste por abrasão que foi realizado no Instituto Pedro Nunes, todos os outros ensaios foram realizados com os equipamentos existentes nos laboratórios do Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Refira-se que também todo o trabalho de amostragem e de preparação dos provetes foram da autoria do autor, reduzindo-se assim a heterogeneidade na amostragem e na execução dos provetes, sendo sempre realizados segundo o mesmo princípio. Apenas a execução das lâminas delgadas não foi realizada pelo autor, mas também o seu processo de execução foi acompanhado no Laboratório de Petrografia do Departamento de Geologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

A partir destes provetes foi possível determinar tanto as propriedades índice como as propriedades mecânicas do material rochoso, sendo que para a sua realização adoptaram-se normas específicas de cada ensaio e sempre que não foi possível a sua adaptação seguiu-se as recomendações dos organismos da especialidade.

### 1.3. Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada em 8 capítulos, aos quais se segue as referências bibliográficas e os anexos onde constam os parâmetros determinados e calculados em cada ensaio.

No presente capítulo é feita uma pequena introdução geral do tema em estudo, onde também se menciona o objectivo da tese, a metodologia de trabalho e esta própria descrição da sua estrutura.

O capítulo 2 dedica-se à temática da calçada portuguesa, onde se faz uma exposição geral deste pavimento tradicional, desde a história, às especificidades da pedra e do calcetamento, acabando com uma pequena reflexão sobre a qualidade.

No capítulo 3 aborda-se a exploração e transformação da rocha em pedra de calçada, onde também se dá destaque ao enquadramento legislativo e à questão ambiental.

No capítulo 4 faz-se o enquadramento geográfico e geológico dos núcleos de explorações de calcário para calçada, realizando-se também uma pequena descrição das suas especificidades de exploração e produção.



## **Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa**

O capítulo 5 remete-se para o que deve ser a certificação da pedra de calçada e onde se abordam as razões que justificam a caracterização da pedra e que foi mote para o desenvolvimento deste trabalho.

No capítulo 6 desenvolve-se toda a caracterização petrográfica, nomeadamente o estudo macro e microscópico, a determinação dos índices colorimétricos e a análise do conteúdo mineralógico e da composição química.

No capítulo 7 desenvolve-se todo um leque de ensaios que permitiram a caracterização dos calcários, tanto ao nível das suas propriedades físicas, como mecânicas.

O capítulo 8 surge em jeito de conclusão, onde se faz uma síntese dos parâmetros determinados para cada calcário.

### Capítulo 2 – Calçada Portuguesa

A calçada portuguesa consiste num pavimento empedrado cujos componentes são de pedra natural, essencialmente calcários, assentes e dispostos no solo de forma mais ou menos homogénea (Santos, 2004), podendo ser utilizados para formar padrões decorativos pelo contraste entre as pedras de cores distintas.

A riqueza e originalidade da calçada portuguesa é, talvez, a maior contribuição do nosso país em matéria de qualidade no mobiliário dos espaços urbanos. Evidenciando grandes afinidades com o mosaico, o seu mérito está na escolha de um material à escala urbana, possibilitando a sua execução em grandes superfícies sujeitas ao tempo e ao desgaste intenso, capaz de revestir o chão de uma maneira sólida, permeável às águas e de sustentar os passantes e os veículos (Amaral & Santa-Bárbara, 2002).

Este tipo de pavimento tem-se revelado ideal para zonas de circulação de peões, em passeios, jardins, habitações e centros comerciais, mas também em ruas e praças com circulação de veículos, aliando a durabilidade à grande beleza estética (Henriques *et al.*, 2009).

Tendo um custo inicial mais elevado, economicamente a calçada portuguesa pode ser vantajosa em relação a outro tipo de pavimentos, pois, utilizando a pedra originalmente aplicada, a calçada pode ser restaurada sempre que houver necessidade de realizar trabalhos que obriguem à remoção do pavimento ou ser reconstruída sempre que ocorra abatimento do substrato.

Uma vez realizada, a calçada portuguesa é um pavimento exclusivo, não havendo duas calçadas iguais, não só porque são utilizados diversos motivos (motivos geométricos, motivos figurativos, motivos alusivos a actividades ou especificidades locais e regionais), mas também porque o seu efeito final depende de três factores: (i) das características do calcário utilizado (aspectos estéticos e funcionais); (ii) da qualidade do corte da pedra de calçada (regularidade geométrica e dimensional); (iii) e da mestria do calceteiro encarregue de fazer o assentamento.

A realização de uma calçada portuguesa envolve duas fases distintas. A primeira fase compreende a extracção da rocha para produção da pedra de calçada, que consiste na transformação da pedra em bruto em pequenos cubos com forma e dimensão mais ou menos regular. A segunda fase corresponde ao calcetamento, que consiste no assentamento das pedras no chão, utilizando as técnicas adequadas em função da utilização prevista e obedecendo aos variados padrões, primando-se pelo bom gosto artístico e pela harmonia.

“Desta cadeia de valor resulta um produto acabado chamado “Calçada Portuguesa”, na forma de um pavimento, durável, resistente, bonito e ecológico, aplicado nas ruas, praças, passeios, jardins e até em interiores de habitações” (Santos, 2004).

#### 2.1. Origens da Calçada Portuguesa

A origem da calçada portuguesa está intimamente relacionada com a herança histórica da cultura e da tecnologia de construção dos romanos, existindo em Portugal inúmeros vestígios que nos foram deixados da época do Império Romano (Henriques *et al.*, 2009), muitas destas técnicas construtivas desenvolvidas e empregues por todo o império eram originárias de povos mais antigos. Das técnicas construtivas, a arte romana de empedrar foi a que mais contribuiu para o surgimento da calçada portuguesa. Esta técnica foi utilizada, não só no revestimento das

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

vias de comunicação melhorando a sua trafegabilidade, mas também na vertente decorativa, através dos mosaicos artísticos.

Aplicando técnicas aprendidas com outros povos, como os cartagineses, fenícios e egípcios (Maré, 2011), mas principalmente com os etruscos (Mantas, 2012), a arte romana de empedrar foi empregue na pavimentação de vias de comunicação (Fig. 2.1), que numa fase incipiente tinham como propósito fins estratégico-militares, sendo um factor determinante para a romanização e desenvolvimento de redes comerciais no território que dominavam (Rodrigues, 2004), ligando o seu vasto império por pontes e caminhos, perfazendo uma rede viária principal com cerca de 87.000 km de extensão (Soutinho, 2016).



Figura 2.1 – Troço B da “Calçadinha” em São Brás de Alportel, com calcetamento lajeado. Fazia parte da via romana que ligava a cidade de *Ossonoba* (Faro) a *Pax Julia* (Beja) (Silva, 2002).

Uma outra herança que nos foi deixada pelos romanos, e talvez o maior contributo para o surgimento da calçada portuguesa tal como hoje a conhecemos, foi a sua arte de empedrar magníficos mosaicos dessa época em tesselas (Henriques *et al.*, 2009), sendo uma das expressões artísticas mais antigas e uma das contribuições mais originais do mundo romano, atingindo grande desenvolvimento e perfeição tanto em Roma como nas províncias do império (Museu Nacional de Arqueologia, 2016).

Em Portugal a época de maior incremento do mosaico romano situa-se entre o século II e IV d. C., localizando-se maioritariamente a sul do Tejo, diminuindo progressivamente para norte e interior, coincidente com o desenvolvimento da romanização e independentemente da facilidade de obtenção da matéria-prima, predominantemente calcário (Oleiro, 1986, in Marta, 2006).

Nos anos 30-20 a. C., Vitruvius, na sua obra intitulada “*De Architectura*”, descreve as técnicas de construção e os materiais ideais para se conseguir que um mosaico cumpra a sua funcionalidade de revestimento do solo (Fig. 2.2) (Carrasco, 2008), e que em certo ponto é bastante semelhante à actual técnica de construção dos pavimentos em calçada.

Em Portugal as primeiras aplicações de pedra natural no pavimento surgem apenas na época dos descobrimentos, tendo um carácter utilitário de modo a melhorar as condições de trafegabilidade das principais artérias das cidades costeiras.

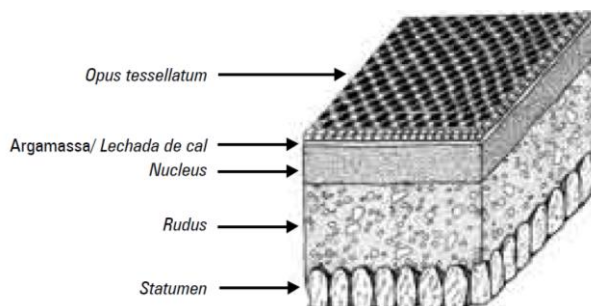


Figura 2.2 – Estrutura para construção de um bom pavimento em mosaico, segundo Vitruvius 30-20 a. C. (retirado de Carrasco, 2008).

## Calçada Portuguesa

A partir do século XV, época de crescente dinamismo das cidades, principalmente em Lisboa que representava o epicentro do próspero desenvolvimento comercial que se vivia em Portugal, a pavimentação torna-se uma imposição legislativa de modo a melhorar os pavimentos das artérias mais concorridas (Cabrera & Nunes, 1990). D. João II, impressionado com a qualidade da obra que observara na cidade do Porto, mandou que dessa mesma cantaria se comesse a pavimentar a Rua Nova da capital (Matos, 2004).

D. Manuel I, o rei sucessor, continuaria a construção da grande artéria da altura, ordenando-a em carta régia datada de 20 de Agosto de 1498, ano da chegada de Vasco da Gama à Índia, declarando ainda contribuir com a quantia de 500 cruzados d'ouro. Em 1500 aprovaria o orçamento para a pavimentação de mais ruas com pedra do Porto, granito de boa raiz nortenha “porque a outra dana-se da maneira que vedes” (Dornelas *et al.*, 2006).

Os terramotos de 1531 e 1551 viriam a dar um impulso em novas construções e seus arruamentos (Henriques *et al.*, 2009), época em que o calcetamento a calhaus, retirados das margens do rio e das praias começa a ser comum em grande parte das artérias principais, mas acima de tudo em locais privados (Matos, 2004).

É já no século XVIII que alguns tipos tradicionais de calçada transcendem da sua função meramente utilitária arvorando-se em elementos decorativos originais. Com o grande sismo de 1755, Lisboa ainda agarrada a um medievalismo arquitetónico, viria a transformar-se, com a construção de novas ruas, largas, regulares, bem pavimentadas e ladeadas de bons passeios de grandes lajes e a faixa para veículos e mueres calcetada a pedra miúda (Gorani, 1989).

Já da época pombalina e posterior existiam residências particulares que tinham no chão dos seus átrios e muitas vezes no das bordaduras viradas aos jardins, produções artísticas de contraste branco-negro, sendo as mais antigas executadas com seixos, onde abundam os motivos radiais isolados ou em triangulações e círculos concêntricos e estrelas (Matos, 2004).

A utilização de pedra para pavimentação de grandes áreas de chão, não apenas com o objectivo de revestimento, mas também como uma grande vertente decorativa, surge em Portugal nos meados do século XIX. É através do tenente-general Eusébio Cândido Furtado (1777 – 1861), que junto ao Castelo de S. Jorge do qual foi Governador de Armas, surge a primeira calçada dita portuguesa (Dornelas *et al.*, 2006). Considerado um impulsionador, não só, da calçada portuguesa como hoje a conhecemos, mas também da limpeza e asseio urbano, que aproveitando-se dos presos do Castelo, chamados de “grilhetas”, como mão-de-obra barata, transformou aquela fortaleza e os seus arredores, que eram de extrema imundice das suas ruas estreitas e tortuosas, em locais dignos de serem visitados como lugares de passeio, tendo-se empenhando na implementação de arvoredos, flores e calçada, derivando num espaço com um digno bom gosto, de tal modo que os lisboetas acorriam em romaria ao Castelo (Roc2c, 2006).

Foi em 1842 que lhe surgiu esta nova forma de emparelhar as pedras em desenhos a branco e preto que se conjugava nos pavimentos, numa visão original que ia para além do simples acasalar de pedras irregulares e facetados travados entre si (Matos, 2004). Foi principiando pela entrada do Castelo que partiria uma alameda arborizada e devidamente calcetada, preenchendo o chão e valetas como um tapete em ziguezague assente com pequenas pedras de calcário branco cortadas a espaço por linhas de pedras de basalto negro (Fig. 2.3), até, e por último, à Parada do Quartel do Batalhão de Caçadores n.º 5, como já fizera em alguns arruamentos de terra batida da fortaleza (Dornelas *et al.*, 2006). Tendo sido este pequeno ensaio existente na Rua de Santa Cruz do Castelo o que havia de ser as ondas do “Mar Largo” do Rossio (Bairrada, 1985).

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa



Figura 2.3 – Fotografia de 1842 com a Calçada Portuguesa em ziguezague no Castelo de São Jorge (retirado de Marta, 2006).

É no ano de 1846 que Eusébio Furtado, antigo governador do Castelo de S. Jorge e já comandante-geral do Real Corpo de Engenheiros, apresentaria um original projecto para a total pavimentação com o “Mar Largo” de uma magnífica praça no coração da cidade de Lisboa, em pleno Rossio (Bairrada, 1985). O sucesso deste projecto de “risco, original e vistoso” foi o ponto de partida para o pavimento artístico de outros locais, dando-se então início à transformação da Baixa de Lisboa, com a maioria das ruas a serem calcetadas com calcário e basalto (Dornelas *et al.*, 2006).

Um novo material, o calcário negro de Mem Martins, juntamente com o calcário branco que eram muito mais fáceis de manejar do que o duríssimo basalto ou granito, permitiu aos calceteiros, na palma da mão e com um pequeno martelo, aparelhar as pedras com o tamanho e as formas desejadas, possibilitando assim nascer uma calçada artística, a calçada portuguesa (Matos, 2004). Não estando estes pavimentos sujeitos aos rodados de carroças que outrora as teriam desconjugado e destruído, a utilização desta pedra era agora possível.

O agrado pelos atributos deste tipo de empedrado, aliados à sua funcionalidade, levou à sua aplicação nos espaços públicos (ruas, passeios, praças, jardins, etc.) da maioria das cidades portuguesas e nas antigas colónias, generalização esta que se dá, sobretudo, a partir do início do século XX (Henriques *et al.*, 2009).

Para além do sector público, a calçada portuguesa também passou a ser muito utilizada pelo sector privado e nos mais variadíssimos locais, sobretudo na pavimentação de áreas exteriores das moradias, mas também do seu interior, em parques de estacionamento, em centros comerciais, etc. A fama da calçada portuguesa atravessou a fronteira e são vários os exemplos da sua utilização fora do país, contando já com ampla divulgação internacional, ao ponto de Ernesto Matos, autor de diversas obras sobre a calçada portuguesa, referir “Enfim, o mundo é pequeno em relação ao universo, tal como estas pedras da calçada o são, mas estas singelas sementes minerais plenas de arte e humanidade, coloridas de preto e branco, encontram-se cheias de força, de vontade para ilustrarem o planeta à imagem da alma portuguesa” (Matos, 2012).

### 2.2. Especificações da Pedra de Calçada

Os calcários mais utilizados na produção artesanal de pedra de calçada possuem características peculiares, designando-se por calcário vidro (Fig. 2.4). Este tipo de calcário possibilita a sua fracturação por percussão, apresentando-se com uma superfície lisa e brilhante,

## Calçada Portuguesa

tanto maior, quanto mais vidro for. Para além das características visuais e texturais, estes calcários também se diferenciam pela sua baixa porosidade.

Existem outros tipos de calcário, mais granulares (Fig. 2.4), que também são utilizados na produção de pedra de calçada, mas que devido às suas características menos “nobres”, não são (ou não deveriam ser) utilizados na tradicional calçada portuguesa de vidro, limitando-se a sua aplicação a pavimentos rodoviários ou com menor exigência artística, rústicos. Quando fracturados, estes calcários apresentam uma superfície bastante rugosa e baça, sendo por vezes necessário recorrer-se a cunhas hidráulicas para a sua fracturação, tornando-se numa produção muito mais mecanizada.

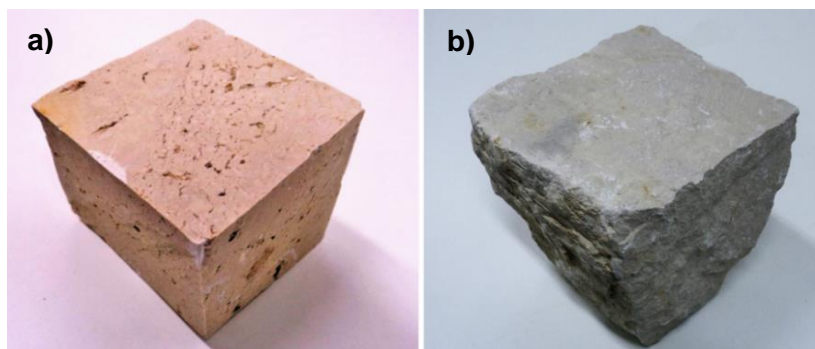


Figura 2.4 – Pedras de calçada 10x10 cm de diferentes tipos de calcário: a) calcário vidro; b) calcário granular.

### 2.2.1. Cor

A calçada portuguesa resulta do calcetamento com pedras de formato geralmente cúbico, mais ou menos regulares, que podem ser usadas para formar padrões decorativos cromáticos pelo contraste entre as pedras de diferentes cores (Fig. 2.5).

Em concórdia com a sua maior abundância, o calcário mais utilizado na calçada portuguesa é o branco, sendo a cor de eleição utilizada no calcetamento da maioria dos espaços amplos, muitas vezes funcionando como um fundo, onde as pedras de outras colorações vão desenhar padrões decorativos, como de uma tela se tratasse.

Em regiões onde existe abundância de calcários com outras colorações e com aptidão para a produção de pedra de calçada, opta-se muitas vezes pela sua utilização. Temos como exemplo muitas calçadas realizadas no Algarve, onde para além do calcário branco, originário da região Centro, também se emprega calcário daquela zona, de tonalidades mais acinzentadas.

Calcários de outras colorações, quase sempre em conjugação com o calcário branco, também são utilizados na calçada portuguesa, mas devido à sua escassez e ao seu custo manifestamente mais elevado, em muito menor quantidade, sendo sobretudo empregues para a definição de contornos, como é o caso do preto e o cinzento-escuro.

Para além das colorações já referidas, cores ainda mais raras como vermelho, castanho, amarelo, rosa, são reservados quase exclusivamente aos desenhos. Calcários destas colorações e com características apropriadas à produção de pedra de calçada existem apenas em zonas muito restritas.

Frequentemente, algum do calcário “colorido” que é utilizado nos desenhos é obtido pela selecção manual, aquando do corte da pedra, de pequenos blocos que esporadicamente surgem isolados nos maciços de calcário branco. A pequena quantidade de pedra que se consegue obter

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa






limita o emprego destas colorações apenas aos desenhos, tornando-se também difícil a obtenção de um lote destas pedras com um tom homogéneo.

Ainda de referir que em consequência das variações verticais e laterais entre os diferentes extratos dos maciços e que se reflectem nas características dos calcários, também poderão originar variações na sua tonalidade. Na Tabela 2.1 podem-se observar algumas das tonalidades de calcário vidraço mais utilizados na calçada portuguesa, assim como o seu campo de aplicação.



Figura 2.5 – Calçada portuguesa 5x6 (miúda) onde são usadas diferentes colorações de calcário para formar padrões decorativos, com calcário branco de Alenquer, calcário negro de Alqueidão da Serra e calcário rosa de Albufeira.

Tabela 2.1 – Algumas colorações de calcário vidraço mais utilizadas na Calçada Portuguesa e o seu campo de aplicação, as imagens correspondem a cubos de calçada de 9x11 cm.

Cor	Campo de Aplicação				Calcário Vidraço
	Espaços Amplos		Contornos	Desenhos	
	Pedonais	Rodoviários			
Branco	++	+	-	+	
Preto	-	--	++	+	
Cinzento-escuro	-	-	++	+	
Cinzento-claro	-	++	+	+	
Rosa	--	--	-	++	

**Legenda:** (++) Muito utilizado; (+) Utilizado; (-) Pouco utilizado; (- -) Não utilizado.

## Calçada Portuguesa

### 2.2.2. Dimensão

Na calçada portuguesa está padronizado a utilização de determinados lotes dimensionais de pedra, dependente do tipo de pavimento que se pretende realizar e ao fim a que se destina (Tabela 2.2). Quanto maior for a dimensão da pedra com que se realiza a calçada, maior será a sua robustez, tanto em termos estruturais do pavimento em si como também da resistência mecânica de cada pedra que o constitui. A escolha adequada da dimensão da pedra a utilizar na calçada diminui a probabilidade de ocorrer problemas que possam danificar o pavimento, tais como, o abatimento da calçada e a movimentação e rotura das pedras, destruindo o arranjo inicial da técnica de assentamento aplicada.

Assim sendo, quando se pretende pavimentar um espaço que se destina à circulação de veículos é normalmente utilizado pedra de maior dimensão, conferindo uma elevada resistência ao pavimento. Neste tipo de calçadas utiliza-se pedras com dimensão compreendida entre 9 e 11 cm, normalmente designada de meia-pedra ou, com menor frequência, a pedra grossa que possui dimensões entre 12 e 13 cm.

Já quando o pavimento se destina ao tráfego pedonal, como as calçadas existentes nos passeios públicos, jardins, etc., em que está sujeito a um menor esforço mecânico, é utilizada pedra de menor dimensão, normalmente compreendida entre 5 e 7 cm, denominada de pedra miúda. Sendo esta a dimensão de pedra que tem maior aplicabilidade na calçada portuguesa.

A designada pedra miudinha, cuja dimensão varia entre 4 e 5 cm, é habitualmente utilizada na realização de calçadas mais artísticas, não só em espaços exteriores, mas também em muitas das que são empregues no interior de habitações e nos desenhos feitos em calçada, onde o pormenor é um factor determinante. De referir que para além destas dimensões já padronizadas existem outros lotes que também podem ser produzidas, normalmente por encomenda.

Tabela 2.2 – Classes dimensionais de pedra de calçada e o seu campo de aplicação.

Designação	Dimensão (cm)	Pavimento		
		Rodoviário	Pedonal	Artístico
Pedra grossa	12 x 13	++	--	--
Meia-pedra	9 x 11	++	-	--
Pedra miúda	5 x 7	-	++	+
Pedra miudinha	4 x 5	--	+	++

### 2.2.3. Rendimento

Na calçada portuguesa o rendimento de cada classe dimensional é expresso em termos de m<sup>2</sup> de pavimento construído em função de cada m<sup>3</sup> de pedra de calçada. Estando sempre este rendimento dependente da qualidade do corte da pedra e da qualidade do calcetamento.

Na realização de uma calçada quanto maior for a dimensão da pedra utilizada menor será o rendimento atingido, resumindo-se na Tabela 2.3 o rendimento para cada classe dimensional.

De referir que cada m<sup>3</sup> de pedra de calçada pesa cerca de 1.370 Kg, sofrendo alguma oscilação dependendo da época do ano em que se esteja, devido à absorção de água, mais ou menos significativa, em função do tipo de calcário. A diferença de densidades entre os vários tipos de calcários também leva a alguma oscilação em torno deste peso de referência, assim como em função da classe dimensional da pedra em questão.



## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

Tabela 2.3 – Rendimento da pedra de calçada em função da dimensão.

Designação	Dimensão (cm)	Rendimento	
		m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	m <sup>2</sup> /t
Pedra grossa	12 x 13	7 - 8	5 - 6
Meia-pedra	9 x 11	8 - 9	6 - 7
Pedra miúda	5 x 7	12 - 13	9 - 10
Pedra miudinha	4 x 5	16 - 17	12 - 13

### 2.2.4. Preços

Tendo como referência os preços consultados junto das explorações (Tabela 2.4), existem grandes variações nos valores da pedra de calçada praticados, estando estes dependentes de muitas variáveis, tais como:

- Qualidade intrínseca do calcário – características como o brilho, a textura, a porosidade, entre outras, influenciam directamente o valor da pedra de calçada, sendo este tanto maior quanto mais vidraço for o calcário;
- Classe dimensional - para dimensões de pedra (5x7 e 9x11) em que o rendimento da produção não sofre grandes alterações, os preços são relativamente semelhantes. Já para dimensões mais pequenas (4x5) em que a produção pode sofrer diminuições da ordem dos 50 % ou mais ou para classes mais avultadas (12x13) em que há um grande desperdício de pedra para a sua produção, os preços aumentam significativamente;
- Tonalidade - o preço da pedra de calçada aumenta substancialmente com a escassez do calcário com uma determinada coloração, fazendo com que haja grande discrepância de valor entre a calçada branca e as restantes cores;
- Qualidade do corte – reveladora da competência de cada operário, a qualidade do corte está directamente relacionada com a regularidade geométrica e dimensional com que o artífice efectua as pedras de calçada. Tratando-se de um trabalho manual, a quantidade será inversamente proporcional à qualidade de produção, fazendo com que a melhor qualidade do corte beneficie de um maior valor da pedra produzida;
- Rendimento de produção – na calçada portuguesa são utilizados diferentes tipos de calcários, possuindo cada um deles características peculiares (dureza, descontinuidades, rugosidade, etc.) que acarretam maiores ou menores dificuldades no corte da pedra de calçada e que se vai repercutir na capacidade de produção da mesma, obrigando a que haja um “ajuste” do preço em função do rendimento.

De referir que este intervalo de valores aqui apresentados poderá não ser suficiente para abranger a variação dos preços que há de zona para zona e até mesmo insuficiente para abarcar o valor de determinadas pedras de superior qualidade. No entanto, também poderão existir outras pedras de muito fraca qualidade que fiquem abaixo destes preços.

### 2.3. Assentamento da Calçada

O assentamento da calçada é um processo moroso e artesanal, tendo de se ter em conta alguns detalhes construtivos para garantir o seu bom desempenho, já que muitas delas, se destinam a suportar cargas consideráveis. Simultaneamente, haverá que respeitar os pormenores e

## Calçada Portuguesa

especificações definidos em projecto no que se refere a cotas, dimensão da pedra a aplicar, geometria do pavimento, técnica de aplicação, etc. (Fig. 2.6), devendo ser realizada por pessoal experiente e conhecedor das melhores práticas.

Tabela 2.4 – Preço da pedra de calçada vidro junto das explorações em função da cor e da classe dimensional.

Cor	Preço (€/m <sup>3</sup> )			
	4x5	5x7	9x11	12x13
Branca	120 - 150	50 - 70	50 - 70	50 - 80
Preta	180 - 200	140 - 160	200 - 250	250 - 280
Cinzeno-escuro	150 - 170	90 - 110	90 - 110	110 - 130
Cinzeno-clara	140 - 160	70 - 80	60 - 70	60 - 70
Rosa	180 - 200	160 - 180	160 - 180	180 - 200

Assim, e para que não haja problemas estruturais de modo a evitar-se a deformação do pavimento e o conseqüente arranque das pedras, a execução de uma calçada deverá obedecer às seguintes fases:

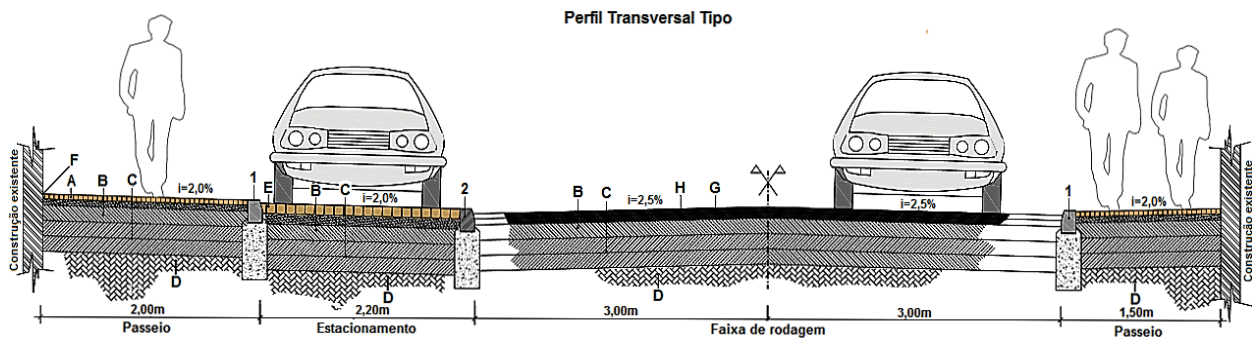
1. **Sub-base** - geralmente a primeira fase consiste na compactação do piso onde vai ser realizada a calçada, caso este não apresente a coesão necessária ou não tiver a profundidade requerida para a colocação da pedra, deverá ser escavado uma “caixa” que, após o solo ter sido compactado, será cheia com *tout-venant*, sendo este também bem compactado. A sub-base poderá ser constituída por mais do que uma camada e de espessura variável, dependendo do fim a que se destina (tráfego de peões e/ou veículos). Caso o substracto seja de muito fraca consistência, também será de boa prática incluir, entre o solo e a sub-base, uma camada de brita grosseira ou cascalho, que para além de aumentar a capacidade portante, também terá funções drenantes. Uma má compactação da sub-base origina a cedência do pavimento, sobretudo se este for atravessado por veículos, levando à sua deslocação e conseqüente desintegração da calçada;
2. **Guia** – a guia é a estrutura que delimita a área do pavimento em calçada, desempenhando também a função de cofragem do pavimento de modo a não ocorrer a desintegração das pedras. Normalmente a guia é formada por uma pedra de lancil, sendo também prática usual fazer-se a guia com pedra de calçada com uma dimensão maior do que aquela que constitui o pavimento. Quando a calçada é aplicada junto a um muro ou qualquer outra estrutura, a construção da guia deixa de ser necessária (Fig. 2.6).
3. **Base** – para a obtenção de uma boa base deverá ser distribuída uma camada de areão (pó de pedra ou idêntico material de igual granulometria) com 4 a 15 cm de espessura, em função da dimensão da pedra que vai ser aplicada (Tabela 2.5). Caso se pretenda melhorar a resistência da camada de base, é recomendável a adição de cimento ao material que a constitui.

Tabela 2.5 – Variação da espessura da base em função da dimensão da calçada.

Dimensão da Pedra de Calçada (cm)	Espessura da Base (cm)
4 x 5	4 - 7
5 x 7	7 - 10
9 x 11	10 - 15

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

4. **Drenagem** – nos pavimentos exteriores deverá prever-se sistemas de drenagem adequados, valetas centrais à superfície do pavimento ou valetas laterais ligadas às redes de água pluviais existentes, de modo a impedir a acumulação de água à superfície ou no interior da estrutura do pavimento, provocando a sua deformação (Pinto, 2006). De modo a possibilitar o escoamento das águas pluviais, as pedras devem ficar ao mesmo nível e o pavimento ser plano, respeitando uma inclinação de 1 a 2 % (Dornelas *et al.*, 2006). Podendo também comportar um certo abaulamento, mas regra geral, com uma altura máxima nunca superior a 2 % da largura do pavimento (Henriques *et al.*, 2009), para isso e tendo já em atenção a inclinação final do pavimento, marcam-se os pontos que servirão de guia ao empedrado;



### Legenda:

A – Calçada miúda (5x7) em calcário branco sobre camada de areão e cimento ao traço 1:6 com 10 cm de espessura;  
B – Camada de base em *tout-venant* com 15 cm de espessura após compactação;  
C – Camada de sub-base em *tout-venant* com 30 cm de espessura após compactação;  
D – Solos locais compactados com um grau de compactação  $\geq 0,95$  OPM;  
E – Calçada em meia-pedra (9x11) de calcário branco sobre camada de pó de pedra e cimento ao traço 1:6 com 10 cm de espessura;

F – Passeio encostado a muro dispensa a aplicação de lancil;  
G – Camada de regularização em macadame betuminoso com 10 cm de espessura;  
H – Camada de desgaste em betão betuminoso 60/70 com 5 cm de espessura.  
1 – Lancil de calcário (22x15x12) assente sobre fundação de betão C16/20, com vista de 2 a 3 cm;  
2 – Lancil de calcário (22x15x12) assente sobre fundação de betão simples C16/20.

Figura 2.6 – Projecto de remodelação de uma avenida em Sintra, onde será aplicado calçada nos passeios (calçada miúda) e nos estacionamento (calçada em meia-pedra), (adaptado de SMAS Sintra, 2014).

5. **Assentamento** - o assentamento consiste no preenchimento do chão com pedras acasaladas e travadas entre si, efectuado por técnicos denominados calceteiros os quais assentam as pedras sobre a camada de material granular fino com o auxílio de um pequeno martelo (martelo de bico ou de passeio) (Fig. 2.7).

Apesar de actualmente a pedra de calçada ser realizada nas pedreiras de acordo com as encomendas, deverá sempre existir um trabalho de adaptação e acabamento das pedras que é feito manualmente durante a sua colocação. As pedras devem ser colocadas ligeiramente acima da cota pretendida para que com o seu conseqüente rebaixamento, devido à compactação, fiquem no nível inicialmente estabelecido.

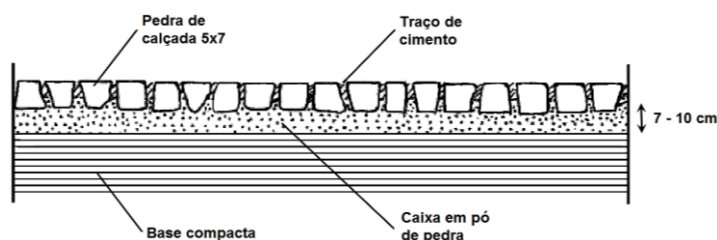


Figura 2.7 – Estrutura em perfil de uma calçada portuguesa miúda (5x7).

## Calçada Portuguesa

A técnica de trabalho é simples na sua teoria, requerendo, no entanto, uma prática exímia de operação, tanto no emalhetar das pedras como no corte das pedras na concha da mão, dito “aparelhar da pedra” para lhe conseguir as faces de ajustamento. Tal como alguém referiu “É de miúdo e de “gaiato do cascalho”, antes de se ter a assinatura no vidroço negro e branco, que se adapta a mão para receber a pedra, que tantos começaram com os pais e tios, a debutar no martelo de bico e a aprender a conhecer o ponto de fractura do vidroço, bem como a adquirir a posição do corpo” (Bairrada, 1985) (Fig. 2.8). Pois toda a gente assenta pedra, mas meter bico com bico e no final bater tudo certinho resultando numa calçada “desempenada” quase como se fosse feita em esquadria é que reflecte a arte de um bom mestre calceteiro.



Figura 2.8 – Calceteiros a realizarem uma Calçada Portuguesa com meia-pedra de calcário vidroço branco de Alenquer.

6. **Juntas** – entre as pedras, as juntas devem apresentar uma abertura mínima de 0,5 cm de modo a diminuir o risco de oscilação do piso, mas também não deverão ser demasiado largas, o que provoca um caminhar desagradável e facilita o arranque das pedras. Devendo estas serem uniformes e nas medidas padrão, estando estas medidas dependentes da dimensão da pedra utilizada (Tabela 2.6).

Para o preenchimento das juntas, a calçada será coberta com uma camada de pó de pedra ou areia (com ou sem cimento) e varrida com vassouras ou rodos de forma a garantir o preenchimento das juntas. Caso se utilize cimento, o “traço” deverá ser composto por  $\frac{3}{4}$  de areia para  $\frac{1}{4}$  de cimento. Nesta fase poder-se-á proceder a um aperto geral da calçada, o que fará que seja necessário o espalhamento de nova camada de material de preenchimento.

Após o preenchimento e independentemente do tipo de material utilizado, a calçada será regada de modo a melhorar a sua infiltração e preencher completamente as juntas. As juntas também poderão ser preenchidas com uma aguada de cimento (goma de cimento), sobretudo em calçadas aplicadas em interiores e que serão polidas (Henriques *et al.*, 2009). Para além de evitar problemas estruturais, o bom acondicionamento das juntas também evita a germinação de ervas como muitas vezes se vêem crescer nas calçadas, provocando um aspecto descuidado e a desintegração das pedras pelo engrossar das raízes;

Tabela 2.6 – Variação da largura das juntas em função da dimensão da pedra de calçada.

Dimensão da Pedra de Calçada (cm)	Abertura das Juntas da Calçada (cm)
4 x 5	0,5
5 x 7	0,5 - 1
9 x 11	0,5 - 1,5

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

7. Compactação – depois de preenchidas as juntas e de regada, a calçada é “batida” com o maço ou com uma placa vibratória de modo a apertar e nivelar o empedrado até atingir a “nega”, altura em que as pedras ficam niveladas com o lancil do passeio ou à cota pretendida. Sendo mais comum existir apenas a compactação final e já após a calçada ter sido regada, também poderá existir um primeiro aperto aquando do espalhamento do material de preenchimento, ainda em seco, de forma a forçar a infiltração do material;
8. Limpeza – sobre a calçada é espalhada areia fina, para que, recorrendo a vassouras e rodos, se proceda à escovagem e remoçam de sujidade e detritos gerados durante a execução. Esta limpeza também pode ser complementada pela passagem à esponja de toda a calçada, de modo a remover toda a sujidade, principalmente o cimento, quando utilizado no preenchimento das juntas. A calçada final deve ser cuidadosamente limpa para que o seu aspecto não fique prejudicado pela adesão das sujidades, actualmente já existem equipamentos capazes de realizar esta limpeza.

### 2.3.1. Técnicas de Calcetamento

Dependendo da finalidade do trabalho e dos motivos a incluir, a pedra de calçada pode ser assente de diversas formas, em que é o polígono da face do piso, o tamanho e o acasalamento das pedras que definem os diversos tipos de calcetamento artístico (Fig. 2.9). Os principais são:

- a) Calcetamento “puxado ao quadrado” ou “calçada portuguesa” – quando a pedra de dimensão regular e formato quadrado é assente de forma a que os vértices opostos formem uma perpendicular ao lancil. Neste caso o arranque do empedrado é feito por um “bico” ou “canto”, designação dada à pedra em forma de triângulo que resulta do corte de um cubo pela diagonal de uma das suas faces. Actualmente é a técnica que melhor expressa a evolução da arte e do rigor que a inicial calçada-mosaico teve até aos nossos dias.
- b) Calcetamento “à fiada” – quando os cubos são colocados com um dos lados paralelos à linha do lancil, formando fileiras bem definidas na calçada. Tendo alguma aplicação no calcetamento de espaços amplos, é sobretudo utilizado em faixas na definição de contornos, sendo também muito utilizado na combinação do calcário com o granito em passadeiras para peões (Henriques *et al.*, 2009) ou em marcação de parques de estacionamento;
- c) Calcetamento “a malhete” – quando as pedras depois de aparelhadas formam pentágonos irregulares e são colocadas acasalando as suas arestas, no caso de o vértice da pedra partir do meio da aresta adjacente é designado “malhete rasgado”. Este empedrado é feito com pedras de tamanho irregular assentes livremente de forma a acasalarem (Bairrada, 1985), sendo que hoje em dia esta técnica é muito pouco utilizada;
- d) Calcetamento “sextavado” – é designado assim quando a face das pedras do empedrado formam hexágonos regulares, em que os seus vértices e arestas coincidem com as adjacentes (Dornelas *et al.*, 2006). Esta técnica de execução exigente, mas de belo efeito, é sobretudo aplicada em alguns trabalhos artísticos e decorativos;
- e) Calcetamento “em leque” – técnica muito aplicada nos países do norte da Europa, mas que também é utilizada no nosso país, ainda que pouco frequente. Para além das pedras com formato cúbico também requer uma percentagem destas com formato trapezoidal e oblongo, produzidas pelo calceteiro no momento de aplicação (Henriques *et al.*, 2009);

## Calçada Portuguesa

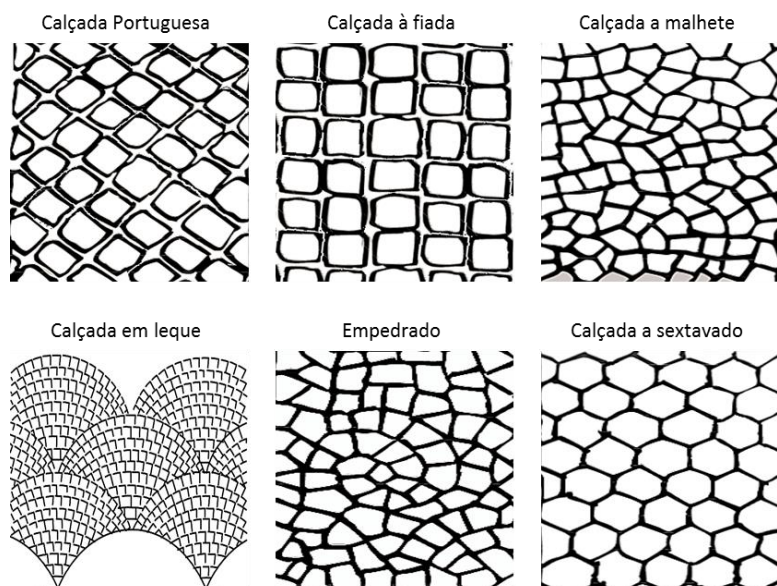


Figura 2.9 – Técnicas de calcetamento (adaptado de Henriques *et al.*, 2009, e Dornelas *et al.*, 2006).

- f) Calcetamento “empedrado” ou “calçada à portuguesa” ou ainda “calçada mosaico” – quando a calçada é realizada com pedras miúdas de formato irregular (quadrados, triângulos, pentágonos, etc.) de tamanho variável, mas sempre miudinho, assentes à sorte, mas de modo a bem acasalarem (Dornelas *et al.*, 2006). Actualmente esta técnica é utilizada com pedra de dimensões mais regulares e de faces mais quadradas (Henriques *et al.*, 2009), principalmente as pavimentações de grandes áreas e sem grande exigência artística são realizadas segundo esta técnica.

Independentemente da técnica de calcetamento utilizada, mas com maior impacto naquelas com maior exigência no rigor geométrico, deve-se ter um cuidado especial para o calcetamento de determinadas estruturas. Onde é bastante recorrente ver-se uma má aplicação da calçada portuguesa e que lhe confere um aspecto descuidado é em redor de tampas e caixas ou em cercaduras, onde muitas vezes não se faz um correcto contorno das estruturas sendo a calçada aplicada em contínuo e sempre da mesma forma até lhes encostar, fazendo com que muitas pedras junto a estas estruturas tenham que ser aparelhadas em formas irregulares.

Ainda a esta parte é recorrente as próprias caixas serem também elas calcetadas, mas muitas vezes esse processo também se realiza de forma defeituosa, em que o seu enchimento é feito com um formato desigual daquele que é o padrão geral da calçada ou ainda e também bastante habitual é quando se observa que um determinado alinhamento ou contorno que vai sendo seguido na calçada é interrompido quando passa por estas estruturas. Sendo muitos os maus exemplos existentes, representa-se na Figura 2.10 um exemplo da boa prática para o calcetamento destas estruturas.

Um outro predicado de grande relevo num pavimento em calçada diz respeito à forma de garantir uma boa comodidade para quem nela caminha, para a qual deve-se certificar que as juntas entre as pedras tenham a abertura adequada e que estejam sempre bem preenchidas, devendo-se também assegurar que as pedras assentes fiquem todas ao mesmo nível formando um pavimento totalmente plano. Garantindo-se estes requisitos, muitas vezes que actualmente se levantam contra a “desconfortável” calçada portuguesa, e muitas vezes com razão, deixaram de ter motivo de existir.



Figura 2.10 – Exemplo de um correcto contorno e preenchimento de caixas numa calçada portuguesa.

Não menos importante é o caso dos passeios junto a passeadeiras para peões e em acessibilidades para diminuídos motores, em que será de realizar uma rampa de cerca 1,5 m segundo a transversal do passeio e caso a largura deste seja inferior a calçada deve ser toda rebaixada (Henriques *et al.*, 2009). Também a realização das passeadeiras compreende muitas vezes a utilização da calçada num contraste branco-negro, mas que se deverá restringir a escolha aos calcários mais vidraços e lisos que não se sujам tão facilmente como os calcários granulares/macios, principalmente o branco, de modo a evitar-se que a sujidade diminua a visibilidade da passeadeira e que desta forma também diminuirá a segurança dos peões.

### 2.3.2. Restauro da Calçada

Uma das grandes vantagens da calçada em relação a outros pavimentos, é a possibilidade de ser restaurada em parte ou totalmente quando por qualquer motivo existe a necessidade de ser removida ou ocorre a sua deformação.

Muitas vezes, para a realização do restauro é recorrente a utilização da pedra original que foi retirada, mas caso esta não possa ser recuperada, deve-se restringir a escolha de uma pedra que mais se aproxime com a já existente no local, tanto nas características dimensionais como na cor. Para além do tipo de pedra, a reposição também deverá obedecer ao padrão já existente e com igual qualidade de aplicação, sob pena de se verificar o mau aspecto visual que se observa em muitos restauro, que ainda assim serão melhores do que a falta dele como tantas vezes ocorre (Fig. 2.11).

Em determinados locais e devido ao intenso pisotear, principalmente nas grandes cidades, é comum observar-se calçadas encardidas e sem brilho resultando num mau aspecto visual, pelo que se deverá recorrer com alguma regularidade à sua lavagem. É uma tarefa simples, mas que terá um elevado impacto na melhoria estética da calçada e reciprocamente de toda a envolvente (Fig. 2.12).

Para além da sujidade provocada pela utilização diária, e principalmente nos calcários com maior porosidade, é frequente surgir o aparecimento de matéria orgânica (líquenes, fungos, musgos) criando agregados de micro-organismos (biofilme). Estas substâncias aparecem sobretudo devido à existência de elevados índices de humidade relativa. Sendo de difícil remoção, principalmente o mórdio que similarmente são os mais frequentes, as suas manchas provocam um efeito visual bastante desagradável (Prodystone, 2015). No entanto, e apesar de difícil, a sua remoção será benéfica, devolvendo à calçada a sua cintilância inicial (Fig. 2.13), pois a negligência ou inexistência de limpeza e de manutenção conduzida pelo desleixo é um passo muito curto para tornar um espaço anteriormente apetecido, num espaço a evitar.

## Calçada Portuguesa



Figura 2.11 – Exemplo de um pavimento em calçada onde se conjugam várias imperfeições: 1 – arranque das pedras sem que se tenha feito a respectiva reposição; 2 – é evidente que a zona inferior da fotografia já tinha sido restaurada, mas desrespeitando o padrão do assentamento original; 3 – juntas entre as pedras demasiado largas.



Figura 2.12 – Limpeza de calçada, onde é notório a melhoria estética depois de limpa (retirado de Every Clean – Portugal, 2014).



Figura 2.13 – Calçada onde é notória a diferença entre uma parte que já foi limpa e a outra onde está totalmente colonizada por matéria orgânica.

### 2.3.3. Desenhos

A calçada portuguesa tem ainda uma forte conotação simbólica, ligada à própria história do país, em que os padrões e motivos representam épocas e acontecimentos dos diferentes locais onde estão inseridos (Pimenta, 2008). Muitos dos desenhos em calçada são comuns em todo o país, uma vez que se relacionam com os períodos estilísticos dominantes. No entanto, coexistem com estes, desenhos que traduzem simbologias locais (Fig. 2.14), ligadas à economia, mitos e tradições (Cabrera & Nunes, 1990).

Por exemplo, em zonas junto ao mar é recorrente observar-se motivos alusivos à pesca e à flora e fauna marinha. Já na cidade do Porto encontramos desenhos representativos da actividade agrícola, como os carros de bois e o vinho do porto. Contudo é em Lisboa onde podemos presenciar os mais diversificados padrões que recriam signos representativos de épocas mitificadas, principalmente a dos descobrimentos, como esferas armilares, naus e caravelas, âncoras, rosa-dos-ventos, ondas do mar, cruces, etc. (Marta, 2006).

É também nos desenhos comerciais que a calçada encontra grande aplicação, funcionando como um carimbo de grandes proporções, no desenho de letras, siglas e logotipos, tanto em pavimentos exteriores como interiores, demonstrando as capacidades da calçada portuguesa



## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

como meio de comunicação visual (Henriques *et al.*, 2009). Enfim, em quase toda a parte podemos observar motivos desenhados com as pedras de calçada, expressando a identidade dum dada região e das suas gentes.



Figura 2.14 – Desenho em calçada do emblema da colectividade de uma aldeia em Alenquer, (Centro Popular de Recreio e Cultura do Bairro).

Durante muito tempo os desenhos eram criados por amadores com perícia, pelo que é a partir dos anos 50 de século XX que alguns artistas plásticos foram convidados a fazer desenhos para a calçada. Nas últimas décadas surgiram alguns arquitectos ou desenhadores vocacionados para esta temática, sendo responsáveis por muitos dos desenhos que encontramos nos pavimentos (Cabrera & Nunes, 1990).

Depois de uma fase artesanal dos desenhos em calçada foram criados moldes que permitem reproduzir repetidamente os desenhos, através da marcação em locais pré-estabelecidos. Após a concepção do desenho é elaborado um molde que irá servir de “cofragem” ao trabalho dos calceteiros, inicialmente os moldes eram construídos em madeira, mas actualmente também já são confeccionados em metal e PVC., reproduzindo desenhos à escala real (Henriques *et al.*, 2009).

Na construção da calçada com motivos geométricos ou figurativos, o molde é fixado com cavilhas sobre a base delimitando as zonas de preenchimento. Depois de colocada a pedra de base, geralmente vidro branco, em todo o perímetro exterior, é retirado o molde e preenchido o seu lugar com pedra de cor diferente (Dornelas *et al.*, 2006).

Em desenhos mais complexos (Fig. 2.15) e/ou de grandes dimensões a retirada do molde é feita por partes, em que as zonas vazias vão sendo preenchidas com pedras da coloração pré-estabelecida.

Por vezes os calceteiros deixam pequenas marcas, que não são mais do que assinaturas, com que identificam e personalizam os seus desenhos, assinalando a sua presença. Funcionando também como demonstração de orgulho pessoal e dedicação à arte de calcetar (Henriques *et al.*, 2009), sendo o seu cunho pessoal sempre igual em todos os trabalhos.

Estas assinaturas não passam de pequenas peças de calcário feitas com duas ou três pedras, executadas com alguma paciência e dedicação por parte dos seus autores. Observando-se por vezes em estrelas de vários feitios, em cruz de cristo, em flor, em frutos, ou num qualquer pormenor (Matos, 2004), que sem um pouco de atenção são muitas vezes imperceptíveis.

## Calçada Portuguesa



Figura 2.15 – Calçada portuguesa na Praça dos Restauradores em Lisboa, com desenho do padrão da autoria do pintor João Abel Manta.

### 2.3.4. Calçadas Interiores

No interior de habitações, e nas últimas décadas a esta parte, temos vindo a assistir ao crescimento das aplicações da calçada portuguesa no segmento alto ou de luxo, onde se exige por um lado, a qualidade da pedra, e por outro, a perfeição do calcetamento, que conciliado com a harmonia estética dos espaços e uma cuidada projecção arquitectónica dos motivos a desenvolver no pavimento, resultam em obras únicas e de elevada beleza.

Os aspectos ligados ao posterior tratamento do empedrado, através de afagamento e impermeabilização do calcário, configuram soluções técnicas que introduzem elevado valor acrescentado a este tipo de pavimentos (Santos, 2004).

Este é um mercado que poderá trazer grande vitalidade para o sector da calçada portuguesa, com elevada margem de expansão, tanto a nível nacional como além fronteiras. Nunca descurando o importante papel que arquitectos conceituados e sensíveis para esta temática poderão desempenhar para a sua difusão.

### 2.4. A Qualidade da Calçada

É sabido que existem diferentes qualidades de calçada, mas em muitas situações, por falta de conhecimento ou mesmo por desleixo, utilizam-se tipos de calçada inadequados a determinado tipo de obra. Sendo frequente verem-se obras que foram realizadas com uma calçada de menor qualidade, aplicada com pouco rigor, transmitindo uma má imagem das reais capacidades de um pavimento em calçada portuguesa.

Sendo na qualidade do produto onde está o factor chave desta arte, até que chegue ao consumidor o conceito de qualidade assenta em três vertentes bem distintas:

1 – Qualidade intrínseca do calcário, é uma vertente completamente alheia à intervenção do explorador dependendo só da opção de escolha da pedreira e daquilo que são as variações petrográficas do maciço, pelo que se deve ter sempre presente qual o tipo de calcário que melhor se adequa a determinada aplicação;

2 – Qualidade do corte da pedra, factor fundamental nas condições de competitividade entre explorações e é onde está muitas vezes subjugada a diferença de preços entre os exploradores. É uma condição que depende da experiência do artífice, sendo a motivação, o gosto pela arte e, como em qualquer actividade nos nossos dias, a remuneração, factores decisivos para o bom desempenho desta profissão;

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

3 – Qualidade do calcetamento, funciona como a face visível do que é a qualidade do produto como um todo e está dependente da mestria do calceteiro. Pois se há calceteiros que executam bons pavimentos com pedra de má qualidade, também há aqueles que mesmo com pedra de boa qualidade a assentam de uma forma defeituosa.

Deixa-se aqui a reflexão, “será que estamos a contribuir para a competitividade, quando temos uma boa qualidade da pedra, assente no solo numa forma deficiente. Será que estamos a contribuir para a competitividade quando fornecemos pedra de baixa qualidade a um bom profissional de calcetamento?” (Santos, 2004). Temos assim a trilogia ideal de qualidade, que representa a chave do sucesso e da imagem da calçada portuguesa.

Nas últimas décadas tem-se assistido à realização de calçadas que em nada dignificam a arte da calçada portuguesa, sendo encarada como mais uma, entre tantas outras, forma de pavimentação, “espalhando-se” autenticamente a pedra pelo chão.

Numa realidade que me é mais próxima, na exploração e transformação da pedra de calçada nas pedreiras, tem-se verificado que uma grande parte dos produtores não tem tido qualquer preocupação com a qualidade do produto que produz, apostando quase sempre na quantidade em deterioramento da qualidade. Este facto pode ser explicado, não justificado, pela grande procura que a calçada tem tido nestas últimas décadas, acompanhando a construção desmedida a que se tinha vindo a assistir no nosso país, onde os prazos para a conclusão das obras são sempre curtos e sendo a calçada um dos últimos elementos a ser construído, como será de esperar a pressa é inimiga da perfeição.

Para fazer face ao calcetamento dos novos espaços criados a um ritmo muitas vezes insuportável pela mão-de-obra existente neste sector, são realizadas calçadas de muito má qualidade, não só devido à fraca qualidade geométrica, e às vezes também petrográfica, da pedra de calçada que é transformada nas pedreiras, mas igualmente ao nível do calcetamento que muitas vezes é feito por calceteiros que não tem a mestria necessária para a realização destes pavimentos.

Principalmente nas obras públicas, em que o único factor de adjudicação é o mais baixo preço, ignorando-se a qualidade, a maioria dos concursos públicos são ganhos por quem fornece pedra mais barata e conseqüentemente de pior qualidade, onde a aplicação sendo também a de menor custo é feita sem o indispensável rigor técnico.

Para se evitarem erros como este é necessário que as entidades públicas tenham em consideração a qualidade da calçada e da sua aplicação, exigindo que se utilize o tipo de pedra mais indicado e que sejam seguidas as melhores práticas de execução de calçada portuguesa. Objectivo este que só será conseguido com a formação dos fiscais de obra na temática da construção deste pavimento.

Não se tendo a noção do verdadeiro valor artístico da calçada portuguesa que, como qualquer arte, só tem beleza se for bem executada, tem sido empregue como um meio de pavimentação dos mais diversos espaços, mas que na sua maioria submetendo-a aos baixos custos e à rapidez de execução em detrimento da arte de bem calcetar.

Entendendo-se todo o simbolismo e nobreza a que a calçada portuguesa está associada levamos a partilhar da opinião de Pimenta (2008) “é necessário ponderar bem em que situações se deve recorrer a este tipo de pavimentação uma vez que tal carácter poderá perder-se quando utilizado de uma forma desregrada e banalizante. Será que não se está a cair no erro de tentar nobilitar qualquer espaço público, “à força”, através do uso desta tipologia de pavimento acabando por se desconsiderar a tão tradicional Calçada Portuguesa?”. Este sector tem de apostar na qualidade!

### Capítulo 3 – Exploração de Calcário para Calçada

A extracção de qualquer pedra natural é realizada em locais denominados de pedreiras, tendo a actividade extractiva peculiaridades inalteráveis, tais como: (i) a localização rígida, estando as empresas exploradoras condicionadas à limitação do recurso geológico; (ii) são recursos não renováveis à escala humana, pelo que há uma atenção especial no sentido da sua preservação e bom aproveitamento, evitando-se assim, a lavra ambiciosa, que a médio longo prazo compromete a viabilidade de continuar a exploração, pondo em risco a actividade extractiva e comprometendo a exploração de um recurso não renovável (Figueiredo, 2007); (iii) cada jazida é única, dadas as suas características geológicas, geotécnicas, geométricas, entre outras; (iv) são necessários investimentos avultados sempre que se explora um recurso geológico.

As pedreiras de pedra natural podem ser caracterizadas quanto à sua forma, à localização geomorfológica e ao método de desmonte (Guerreiro, 2000). Relativamente à forma e à localização geomorfológica, o tipo de exploração de calcário para calçada é classificado como sendo a céu aberto, podendo ser: (i) em flanco de encosta (Fig. 3.1a), quando a lavra começa a partir de um nível na encosta de um monte ou montanha e evolui para níveis superiores ou inferiores, formando degraus que vão avançando de cima para baixo aproveitando a topografia do terreno e tornando a exploração estável do ponto de vista geotécnico; (ii) em corta (abaixo da superfície) (Fig. 3.1b), quando a lavra começa a partir da superfície do terreno e é descendente (Figueiredo, 2007), formando uma espécie de pirâmide invertida.

Na generalidade das pedreiras de calçada, predominam as explorações em flanco de encosta, podendo por vezes iniciar-se a lavra em flanco de encosta, e posteriormente, quando as bancadas laterais não têm a qualidade pretendida ou tendo-se atingido os limites da pedreira, a exploração pode passar a corta, atingindo níveis mais profundos para extrair o calcário de boa qualidade.

As pedreiras de calcário para calçada são classificadas como pequenas explorações, dirigidas por empresas também de reduzida dimensão e em que a grande maioria é do tipo familiar, possuindo em média 3 ou 4 trabalhadores. É uma actividade assente no conhecimento transmitido de geração em geração, dedicando-se exclusivamente à produção de calçada.

Apesar de actualmente já serem utilizados meios mecânicos que auxiliam o desmonte e o transporte das matérias, este tipo de actividade é, ainda, muito artesanal, em que toda a fase de produção da pedra de calçada se concentra no esforço de cada operário, auxiliados por ferramentas manuais, como marretas, alavancas, forquilhas, martelos, entre outras.

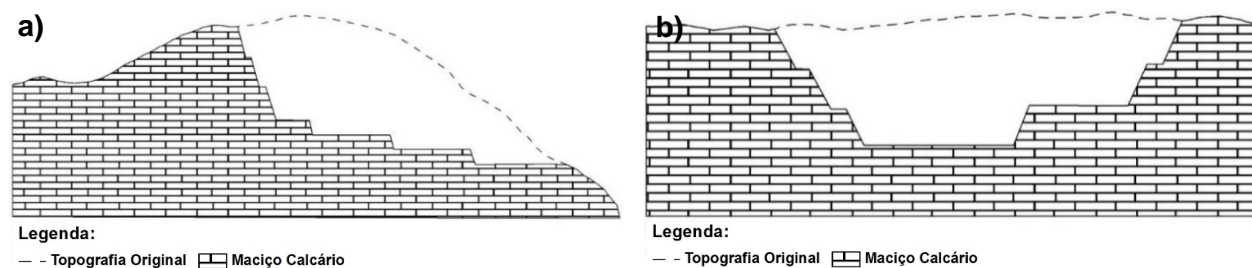


Figura 3.1 – Diferentes tipologias de lavra: a) em flanco de encosta; b) em corta.

Devido ao facto de se tratar de um trabalho duro, em que o rendimento auferido é em função da produção, levando a que seja quase realizado de “sol a sol”, e em condições climáticas muitas vezes difíceis, aliado à inalterabilidade dos preços ou mesmo à sua redução, tem-se assistido a

## **Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa**

um acentuado decréscimo de pessoal neste sector. Partilhando-se assim a ideia da necessária formação profissional e valorização dos trabalhadores que executam este tipo de actividade, já que neles reside, em grande parte, a capacidade de preservação deste património, que é a tradicional calçada portuguesa. Tal como referido no Projecto de Lei n.º 189/IX (2002), seria benéfico a aplicação no sector das normas que regulam a actividade artesanal, do artesão e da unidade produtiva artesanal, designadamente do disposto no Decreto-Lei n.º 41/2001, de 9 de Fevereiro, alterado pelo Decreto-Lei n.º 110/2002, de 16 de Abril, assim como o exposto no Decreto-Lei n.º 121/2015, de 30 de junho que cria o Sistema Nacional de Qualificação e Certificação de Produções Artesanais Tradicionais, e no Decreto-Lei n.º 122/2015, de 30 de junho, que concebe o Programa de Promoção das Artes e Ofícios e define um conjunto de modalidades de apoio no âmbito das atividades artesanais.

Aquele mesmo projecto-lei (189/IX) tinha por objectivo promover, controlar, certificar e fiscalizar a qualidade, origem, genuinidade e situação legal da exploração e produção, o qual se fosse implementado, daria um grande contributo para a continuidade desta arte, indo ao encontro da defesa e valorização da calçada portuguesa, enquanto manifestação tradicional de interesse nacional e internacional.

### **3.1. Enquadramento Legislativo**

Para as pedreiras de calcário para calçada, as condições técnicas de exploração, de recuperação paisagística e de manutenção da qualidade ambiental, estão consignados no Decreto-Lei n.º 270/2001, de 6 de Outubro, com as alterações introduzidas pelo Decreto-Lei n.º 340/2007, de 12 de Outubro, que estabelece o regime de revelação e aproveitamento de massas minerais e, igualmente, cumpridas as condições de aproveitamento deste recurso geológico, consignadas no Decreto-Lei n.º 90/90, de 16 de Março, que determina o regime geral de revelação e aproveitamento dos recursos geológicos.

Para efeitos do Decreto-Lei n.º 340/2007, de 12 de Outubro, as pedreiras são classificadas de 1 a 4, por ordem decrescente do impacte que provocam, estando as pedreiras de calçada, juntamente com as de laje, enquadradas na classe 4. Contudo, excedendo estas pedreiras qualquer um dos limites definidos no n.º 4 do artigo 10.º - A do referido diploma, e que envolvem uma área de 5 ha, uma profundidade de escavação de 10 m, uma produção anual de 150.000 t, um número de 15 trabalhadores e uma utilização anual de 2000 kg em explosivos, passam a classe 2.

Não sendo acessível para as pedreiras de calçada ultrapassar a maioria destes limites, no entanto, exceder a fronteira dos 10 m de profundidade de escavação é facilmente alcançável por qualquer exploração deste tipo, sobretudo para as pedreiras em flanco de encosta, passando uma pedreira de calçada, de classe 4, a classe 2. Segundo conversa com alguns exploradores, com as alterações que esta mudança de classe acarreta, torna a rentabilidade destas explorações bastante limitada e com grandes dificuldades, para estas pequenas empresas, em cumprir as exigências requeridas para uma pedreira nesta classe. Pois, com isto, uma pedreira de calçada, onde trabalham 2 ou 3 colaboradores de forma bastante artesanal, também terá de cumprir todas as formalidades exigidas pela legislação às pedreiras de grande dimensão.

Para a exploração de uma pedreira, em qualquer uma das classes, terá de ser realizado um Plano de Pedreira a ser entregue aquando do pedido para obtenção do licenciamento de exploração e que será alvo de avaliação por parte das entidades competentes. O Plano de

## Exploração de Calcário para Calçada

Pedreira é um documento técnico constituído pelo Plano de Lavra e pelo Plano Ambiental e de Recuperação Paisagística (PARP).

O Plano de Lavra consiste num documento técnico contendo a descrição do método de exploração: desmonte, sistema de extracção e transporte, sistema de abastecimento em materiais, energia e água, dos sistemas de segurança, sinalização e de esgotos. O PARP é um documento técnico constituído pelas medidas ambientais, pela recuperação paisagística e pela proposta de solução para o encerramento da pedreira (Decreto-Lei n.º 340/2007).

De acordo com o anexo VI do Decreto-Lei n.º 340/2007, dependendo da classe da pedreira em questão, o Plano de Pedreira também será mais ou menos complexo, pelo que a classificação de uma pedreira de calçada, em classe 2 ou 4, também terá repercussões consideráveis na complexidade e nos custos do plano a elaborar.

Segundo confissão de alguns exploradores, quando se atribui às pedreiras de calçada diferentes classes, esta classificação afectará, não só, a diferenciação do valor dos encargos a ter com explorações que laboram de forma similar, mas também, é um factor relevante que contará para uma concorrência desleal, dando às pedreiras de classe 4 possibilidade de praticarem preços mais reduzidos. Um factor que ainda será mais relevante para esta concorrência desleal, é a exploração ilegal, onde não houve, nem há, por parte dos seus proprietários, qualquer tipo de encargos com as pedreiras em questão. Pelo que deve haver por parte das entidades competentes um maior cuidado para estas questões.

Por todos estes factores, compartilha-se aqui a opinião de muitos empresários deste sector, que defendem um regime especial de licenciamento, de pesquisa e de exploração que tenha em conta a sua especificidade, sem prejuízo das normas de segurança, saúde e protecção do ambiente, com um maior controlo da situação legal das explorações.

### 3.2. Exploração de Calcário para Calçada

Para as explorações a céu aberto são exigidas dois tipos de operações, nomeadamente, as operações auxiliares e as operações unitárias (Moura *et al.*, 2007). As operações auxiliares são, essencialmente, drenagem e esgotos, fornecimento de energia (eléctrica e combustível), rede de ar comprimido, fornecimento de água, entre outros, estruturas estas que, devido à reduzida dimensão e rentabilidade atingida neste tipo de pedreiras, dificilmente se observam ou se justificariam implantar.

Já nas operações unitárias e previamente à fase de exploração, existe a necessidade, por vezes, de averiguar a viabilidade económica do depósito, recorrendo-se a actividades de pesquisa, tais como, o reconhecimento geológico de superfície, levantamentos geofísicos, realização de sondagens mecânicas, abertura de sanjas ou valas e colheita de amostras, para ensaios laboratoriais ou semi-industriais (Moura *et al.*, 2007). Este estudo abrange um conjunto de soluções técnicas e económicas para o desenvolvimento do projecto mineiro, que inclui avaliações detalhadas dos factores modificadores aplicáveis, juntamente com quaisquer outros factores operacionais e com uma análise financeira detalhada, permitindo demonstrar que, no momento da apresentação do estudo, a extracção é razoavelmente justificada (Rodrigues, 2013).

No caso das pedreiras de calçada não se atinge um grau de reconhecimento tão pormenorizado quanto o alcançado noutros projectos mineiros de maior dimensão e rentabilidade, contudo, e certamente utilizando técnicas mais expeditas, será sempre necessário a realização de um

## **Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa**

estudo que demonstre a viabilidade em explorar uma determinada massa mineral, tanto em termos técnicos, como económicos.

### **3.2.1. Metodologia de Exploração**

A metodologia de exploração preconizada para estas pedreiras visa racionalizar o aproveitamento do recurso mineral em termos técnicos e económicos e, simultaneamente, minimizar os impactes causados.

Tendo áreas e profundidades médias reduzidas, a metodologia de exploração destas pedreiras é desenvolvida de acordo com as especificidades do produto que se pretende, a calçada, em função de várias características, desde a cor, a dimensão e do tipo de aplicação, exigindo a presença de várias frentes de desmonte em simultâneo, de modo a conseguir satisfazer a procura.

Normalmente as frentes são abertas em várias zonas da área da pedreira, tendo cada uma a finalidade de extrair um calcário específico para um determinado tipo de calçada, mais esbranquiçada, mais escura, mais “vidraça”, etc., sendo gerida em função do mercado. Pelo que assim se percebe que nestas pedreiras não é possível estabelecer um faseamento cronológico preciso para a configuração final em cada zona, correspondente à libertação dessa zona para recuperação paisagística. Apesar disso, e sem poder atribuir total certeza sobre os avanços a realizar, é possível delinear um faseamento orientativo assente em diferentes fases (VISA Consultores, 2011).

Sendo extremamente importante seguir de forma ordenada todas as fases de exploração, bem como o plano de pedreira, a fim de não se correr o risco da exploração funcionar de modo pouco racional, perdendo-se, em parte, as vantagens técnicas e económicas a que um projecto bem elaborado conduz (Figueiredo, 2007).

Para atingir os seus fins, uma exploração mineira recorre a um certo número de operações cíclicas, umas mais fundamentais que outras, mas todas elas importantes quando se pretende otimizar um processo produtivo (Couto, 1990).

Em cada núcleo de exploração existem especificidades devido às diferenças nas características dos calcários e dos maciços em questão, mas que por vezes até podem ocorrer mesmo de pedreira para pedreira, onde existem particularidades diferenciadoras causadas por distintas estruturas geológicas onde estas se inserem, à desigual morfologia da superfície do terreno e às diferentes condições em que são exploradas. Mesmo assim tenta-se fazer uma caracterização generalizada das várias operações da metodologia de exploração das pedreiras de calcário para calçada, que passa pelas fases de preparação, desmonte, remoção e transporte, transformação, parqueamento e expedição.

### **3.2.2. Operações Preparatórias**

As acções de desmonte de um maciço rochoso são precedidas por um conjunto de operações preparatórias da lavra que visam garantir os parâmetros de segurança, economia, bom aproveitamento do recurso mineral e protecção ambiental.

## Exploração de Calcário para Calçada

As operações preparatórias das frentes são constituídas pelas actividades que permitem o acesso do pessoal e dos equipamentos às zonas a explorar, permitindo o bom desenrolar dos trabalhos e as apropriadas condições de segurança (VISA Consultores, 2003).

A preparação e traçagem têm como objectivo preparar a massa mineral para ser explorada de uma forma economicamente sustentável, consistindo, numa primeira análise, em colocar a descoberto a rocha explorável e delimitar a área de corta à superfície, criando as faces livres para o avanço da exploração (Moura *et al.*, 2007).

Essas actividades englobam a remoção das terras de cobertura (decapagem) e/ou do coberto vegetal (desmatação) sobre a rocha que se pretende desmontar, delimitando simultaneamente a área da corta.

Sendo uma operação geralmente classificada de subsidiária nas explorações a céu aberto, no entanto e quando a espessura do estéril de cobertura é elevado, pode constituir uma operação de elevado custo, estando também hoje, a reconversão dos terrenos de cobertura, reconhecida como uma operação de relevante importância, em concomitância com os impactes ambientais (Couto, 1990).

Nas áreas onde for necessário a remoção da terra viva superficial (solo fértil), esta deverá ser devidamente acondicionada em pargas, a distâncias convenientes das frentes de desmonte, de modo a não serem afectadas pela actividade extractiva (principalmente por poeiras) e sem prejudicar o bom desenvolvimento dos trabalhos (VISA Consultores, 2011).

### 3.2.3. Método de Desmonte

Após as operações de preparação e traçagem, a pedreira encontra-se em condições de iniciar a exploração nas faces livres da massa rochosa, deixada a descoberto pela remoção da cobertura.

Contrariamente ao que ocorria há algumas décadas atrás nas pedreiras de calçada, onde se procedia ao desmonte do maciço calcário com recurso a alavancas, encontrando-se frequentemente as pessoas, auxiliadas por cordas, penduradas durante horas nas barreiras a desmontar, a realização destes trabalhos por processos manuais não são, nos nossos dias, de considerar.

Desde longe que se sentiu a necessidade de eliminar estes trabalhos, pelo facto de serem penosos ou porque se sentiu a carência de os realizar em tempos mais curtos. Daí, a sua substituição por processos mecânicos, que esteve dependente, necessariamente, da evolução destes (Couto, 1990).

A escolha dos procedimentos de desmonte e dos equipamentos a utilizar está dependente do tipo de maciço em que se está a operar, sendo necessário conhecer a maior ou menor dificuldade que os blocos oferecem ao seu destaque do maciço rochoso. Usualmente e de forma preferencial, nas pedreiras de calçada, procede-se ao desmonte mecânico do maciço calcário (Fig. 3.2), para tal, recorre-se a escavadoras giratórias ou a retroescavadoras, munidas com *ripper* que, aproveitando as descontinuidades existentes no maciço, permitem o arranque dos blocos e a conseqüente desagregação do maciço.

Só nos casos em que o maciço rochoso se encontre muito coeso, não sendo possível o seu desmonte mecânico, é que se opta pela utilização de explosivos. No entanto, a utilização de explosivos é bastante racionada, utilizando-se apenas a quantidade necessária para provocar



## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

algum deslocamento do maciço rochoso, de modo a levar à abertura das suas descontinuidades e conseqüente alívio da sua resistência, permitindo o seu posterior desmonte, mecanicamente.



Figura 3.2 – Desmonte mecânico do maciço calcário com recurso de um *ripper*, onde se evidencia o arranque de um bloco por uma descontinuidade.

A restrição, nas pedreiras de calçada, pela utilização da menor quantidade possível de explosivos, prende-se com a necessidade de não se levar à criação de microfissuração nos blocos de calcário, de forma a não se alterar as propriedades destas rochas, permitindo a sua posterior transformação. Caso contrário, haveria perda de matéria-prima, diminuindo a taxa de recuperação da pedreira e gerando maior volume de rejeitos, que já por si são bastante elevados, atingindo, em média, cerca de 70 a 80 % do volume de maciço desmontado, que inclui a terra e o calcário inapto para calçada.

Nestas pedreiras, quando se recorre à utilização de explosivos, não é habitual realizar qualquer tipo de cálculos para o dimensionamento das pegas de fogo, sendo um procedimento que se baseia na experiência, conhecimento e intuição do explorador em relação às características da frente do maciço em questão. As pegas de fogo são compostas por um número reduzido de furos, havendo casos em que se procede à execução de um único furo, de modo a “bater” um local exacto do maciço que se encontre mais resistente. A execução de pegas de fogo de pequena dimensão também se prende com o facto desta actividade ainda ser bastante artesanal, levando a um ritmo de consumo de matéria-prima bastante lento, não havendo, por isso, a necessidade de grandes volumes de rocha desmontada.

Ainda é comum, na perfuração para colocação do explosivo, a utilização dos martelos pneumáticos manuais, o que acarreta um elevado tempo e esforço despendido nesta actividade. Ainda para mais, e devido ao diâmetro limitado dos furos realizados com estes equipamentos, é necessária a realização de caldeira de modo a possibilitar a introdução da quantidade de explosivo pretendido. Hoje em dia já existem algumas pedreiras que possuem ou recorrem ao aluguer de equipamentos de perfuração mais mecanizados (perfuradoras), permitindo um

## Exploração de Calcário para Calçada

processo mais célere e uma maior quantidade de explosivo aplicado em cada furo, normalmente granulados ou emulsões encartuchadas (Fig. 3.3).

Quando se pretende desmontar bancadas de pequena espessura com utilização de explosivos, é comum o emprego de pólvora negra em furos de pequeno diâmetro, pois é um explosivo deflagrante, ou seja, gera ondas de choque com menor energia, não levando à fragmentação excessiva dos blocos de calcário e, conseqüentemente, reduzindo-se a perda de matéria-prima. A pólvora negra possui, portanto, uma acção de cisalhamento e de empuxo, desmontando o material em volumes pré-determinados, sendo a sua ignição normalmente feita através de contacto por chama, com recurso a rastilho. Por vezes a pólvora pode ser substituída por emulsões encartuchadas de pequeno diâmetro, em papel parafinado ou em manga de plástico, sobretudo quando existe a presença de água.

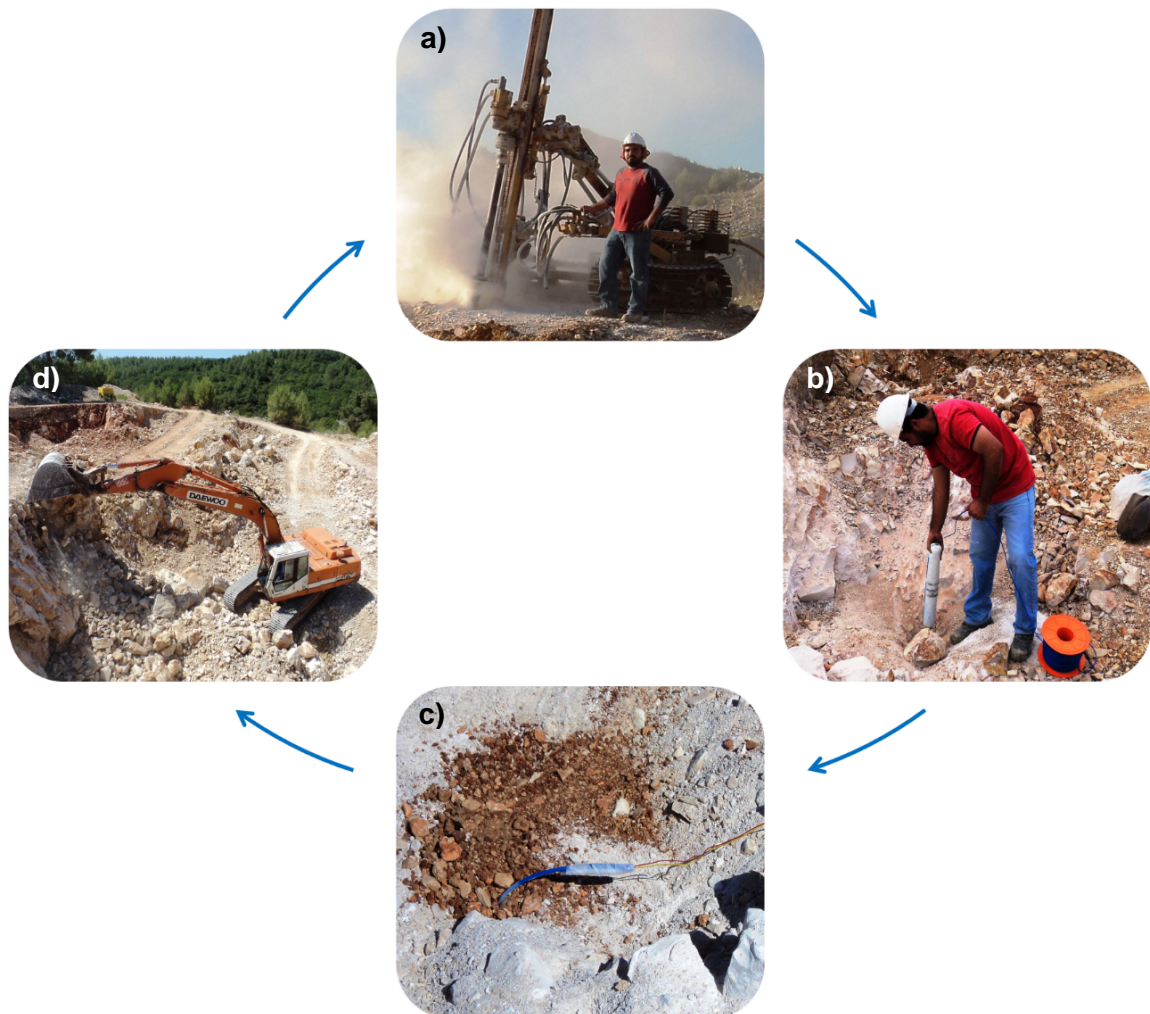


Figura 3.3 – Ciclo de desmonte com recurso a explosivos: a) Perfuração; b) Carregamento; c) Detonação; d) Arranque.

### 3.2.4. Remoção e Transporte

Posteriormente à desagregação do maciço, o esquadrejamento dos blocos é muitas vezes realizado junto à frente de desmonte, sendo depois, a pedra já talhada, transportada para os pavilhões de corte. Mas, em algumas pedreiras, é também prática recorrente o carregamento

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

(Fig. 3.4) e transporte da rocha desmontada para locais onde, posteriormente, será esquadrejada. Durante o carregamento, e sempre que possível, é realizada uma pré-selecção dos blocos, de maior dimensão, que não possuem aptidão para serem transformados em calçada, sendo removidos e encaminhados para a escombreira ou, nos casos onde haja a disponibilidade de equipamentos de britagem, para os montes de calcário com aptidão para agregados, para serem posteriormente transformados.



Figura 3.4 – Carregamento da matéria-prima num *dumper*, para ser transportada e colocada à disposição dos operários para esquadrejamento.

Para separar os blocos de calcário dos fragmentos de menor dimensão e da terra, de modo a estes estarem mais libertos permitindo a sua melhor trabalhabilidade, é utilizada uma técnica de separação bastante simples, em que o material desmontado é descarregado numa vertente onde vai ocorrer uma classificação por equivalência (estratificação por gravidade), em que a diferença de peso entre os blocos leva a uma acumulação diferencial de energia cinética para cada um deles. Assim, a terra e os fragmentos de rocha mais pequenos (menor massa) acumulam-se na parte proximal da vertente e os blocos de maior dimensão (maior massa) na sua zona mais distal.

Quando se conclui o total esquadrejamento e aproveitamento dos blocos de calcário com aptidão para serem transformados em calçada, procede-se à limpeza do local. A pedra que não é aproveitada, por não ser adequada ou por não ter a dimensão exigível para o posterior corte em calçada, é carregada e transportada, juntamente com a terra, para a escombreira (depósito de desperdícios).

Como já referido anteriormente, caso haja a disponibilidade de uma unidade de britagem, a pedra que não é aproveitada para a calçada e que seria depositada na escombreira, poderá ter outro aproveitamento, podendo ser utilizada para a produção de agregados. Aquando do processo de limpeza, pode-se fazer logo o seu encaminhamento para a britagem, ou então é colocada em pilha temporária para futuramente ser expedida. Assim, só a terra será depositada na escombreira, reduzindo-se consideravelmente, o volume desta.

### 3.2.5. Esquadrejamento

O esquadrejamento consiste na subdivisão dos blocos de modo a torná-los com um dimensionamento e forma adequada a serem trabalhados na fase seguinte, da concepção da pedra de calçada propriamente dita.

Nas visitas realizadas aos diversos núcleos de pedreiras de calcário para calçada pôde-se observar que os blocos de maior dimensão são fracturados segundo dois métodos, estando estes

## Exploração de Calcário para Calçada

dependentes, não só, das características do calcário em questão, mas também, do que são as técnicas tradicionalmente usuais em determinada região.

Um destes métodos de quebra de blocos de calcário compreende a utilização de um martelo hidráulico acoplado na lança de uma retroescavadora (Fig. 3.5). Este processo consiste na percussão de um guilho, preferencialmente de ponteira em cunha, accionado por um sistema hidráulico contra a superfície do bloco. Não sendo uma técnica muito precisa, em que pode ocorrer uma fracturação irregular e até originar microfissuração nos blocos subdivididos, torna-se um processo muito mais económico e rápido que o método seguinte.



Figura 3.5 – Fracturação de um bloco de calcário com recurso a martelo hidráulico, acoplado na lança de uma retroescavadora.

Um outro procedimento consiste na realização de um ou mais furos com um martelo pneumático até cerca de 15 a 20 cm para o interior do bloco. Nestes furos será introduzido manualmente um sistema de cunhas metálicas, sendo este dispositivo composto pela própria cunha, que é introduzida entre duas chapas metálicas de secção longitudinal em ângulo, as contra-cunhas, destinadas a facilitar a percussão da cunha para o interior do bloco e a transmitir a tensão exercida por esta aos bordos do furo. A cunha é colocada paralelamente à direcção por onde se pretende que o bloco abra e será batida, com o auxílio de uma marreta, até à fracturação deste (Fig. 3.6).

Depois dos blocos de calcário de grande dimensão, caso hajam, já se encontrarem divididos, toda a pedra é então “traçada”, nome que se dá ao processo de subdividir os blocos em blocos mais pequenos (Fig. 3.7), conferindo-lhes uma superfície lisa e uma dimensão apropriada a serem talhados à medida desejada da pedra de calçada a produzir. Esta dimensão também é a adequada a um bom rendimento, minimizando-se o desperdício. É um processo totalmente manual, recorrendo-se à percussão com marretas de 4 a 10 kg para esquadreamento dos blocos, sendo uma das actividades do ciclo produtivo que exige maior esforço físico.

Após o esquadreamento dos blocos em unidades mais ou menos rectangulares, estas vão sendo carregados manualmente para os baldes de retroescavadoras ou de pás-carregadoras, para depois serem transportados para o respectivo lugar de cada operário nos pavilhões de corte.

De referir que nesta fase nem toda a pedra é “traçada”, os pequenos blocos e sempre que se consiga aferir que são de boa qualidade, são logo carregados para dentro dos baldes, sem que seja necessário abri-lhes qualquer superfície. Ou então, apenas lhes é retirado uma pequena lasca, incutindo-lhes uma superfície lisa de modo a facilitar a sua trabalhabilidade na etapa seguinte.

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa



Figura 3.6 – Técnica de corte de blocos de calcário com recurso a cunhas: a) Realização dos furos; b) Colocação da cunha; c) Percussão da cunha; d) Separação dos blocos.



Figura 3.7 – Processo de “traçagem” dos blocos de calcário: a) subdivisão dos blocos de maior dimensão com uma marreta de 8 kg; b) subdivisão dos blocos mais pequenos com uma marreta de 4 kg.

### 3.2.6. Produção da Pedra de Calçada

Em determinada altura a pedra deixou de ser enviada em bruto (“traçada”) para o local da obra, onde eram os próprios calceteiros que procediam ao seu corte, passando a ser previamente talhada na pedreira, com o formato pretendido pelo comprador.

## Exploração de Calcário para Calçada

Na fase da concepção da pedra de calçada procede-se ao “corte” dos blocos anteriormente “traçados”, sendo estes talhados com o auxílio de uma pequena marreta, em pedras de calçada aproximadamente cúbicas e com a dimensão pretendida, prontas para calcetamento.

Este processo consiste na percussão, com uma aresta da marreta, sobre a superfície da pedra, provocando a fractura da mesma. Geralmente, basta uma única pancada para que a pedra abra segundo a direcção pré-definida, no entanto, esta abertura nem sempre se faz por ângulos rectos, como é pretendido. Dependendo do tipo de calcário, esta fracturação poderá fugir, mais ou menos, da esquadria idealizada, facto que se prende pela maior dificuldade de “corte” do calcário mais vidro.

Os blocos de maior dimensão são talhados no chão, podendo as tiras que deles resultam serem partidas também no chão ou puxadas para mão, dependendo da configuração da própria pedra a partir e da táctica de corte de cada trabalhador (Fig. 3.8). Caso seja necessário, cada pedra é aparelhada individualmente na concha da mão, por vezes protegida com uma luva de borracha.



Figura 3.8 – Corte de pedra de calçada: a) talho dos blocos no chão; b) aparelhamento da pedra na concha da mão.

Do ciclo de produção, a concepção da pedra de calçada é a etapa mais prolongada, desempenhada horas a fio em posição sentada, onde é comum utilizar-se uma almofada de modo a dar mais algum conforto.

Tal como em qualquer outra actividade que esteja dependente do cunho pessoal do indivíduo que a realiza, e esta não é excepção, a qualidade da pedra de calçada está subordinada à técnica e ao rigor com que cada colaborador desempenha esta arte.

Durante esta fase, o artesão produz uma determinada classe dimensional de pedra de calçada, tendo apenas lugar a produção desse lote em específico. No entanto, e para diminuir o desperdício de matéria-prima, poder-se-á recuperar alguns fragmentos de calcário que surjam com um dimensionamento mais adequado a outra classe dimensional.

Em média, a quantidade de pedra de calçada que uma pessoa consegue produzir diariamente, está entre 1 e 2 m<sup>3</sup>, dependendo sempre da destreza de cada trabalhador e da qualidade da matéria-prima com que se está a trabalhar. Em determinadas explorações, este número até poderá ser maior, mas certamente repercutirá consequências na qualidade da pedra de calçada produzida.

Nesta etapa do ciclo produtivo, também tem lugar a produção de uma significativa quantidade de resíduos, que comportam os fragmentos de rocha resultantes do aparelhamento das pedras

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

de calçada, e que no meio são designados de cascalho. Este desperdício é colocado em pilha, de onde poderá ser vendido tal qual ou seguir para beneficiação (produção de agregados). Chegado o fim do ciclo produtivo, do volume de maciço desmontado, esta actividade apresenta apenas uma percentagem de recuperação na ordem dos 20 a 30 %, pelo que se torna essencial o reaproveitamento do restante calcário para outros fins, de modo a minimizar-se o efeito de tais valores.

### 3.2.7. Parqueamento e Expedição

Enquanto aguarda para ser vendida, a pedra de calçada é armazenada em estaleiros dentro da área da pedreira. De modo a reduzir os custos e o tempo do seu transporte para a pilha de armazenamento, esta, deverá situar-se o mais perto possível dos pavilhões de corte, sendo posteriormente expedida em camiões.

A calçada tem sido vendida a granel, medindo-se previamente a quantidade de pedra a carregar, ou então, cubizando-se a caixa do camião a encher com pá mecânica, equipamento, que facilitou o método muito mais demorado e duro de há algumas décadas atrás, em que o carregamento da pedra, do chão para cima dos camiões, era feito com forquilhas. Sendo ainda comum a ida de pessoal acima do camião para o endireitar da carga (Fig. 3.9).



Figura 3.9 – Carregamento de pedra de calçada 5x7.

### 3.2.8. Fluxograma do Ciclo de Produção

Assim, as operações principais, anteriormente descritas, que compõem o ciclo de produção utilizado para a exploração de calcário para calçada poderão ser resumidas e encadeadas pelo fluxograma da Figura 3.10.

## 3.3. Impactes das Pedreiras de Calçada

A compatibilização entre a actividade extractiva e a protecção ambiental constitui uma das metas fundamentais das políticas administrativas e sociais dos nossos dias. Esta indústria, como

## Exploração de Calcário para Calçada

muitas outras, interfere a um grande nível com a qualidade dos meios físicos e ecológicos envolventes, sendo natural que existam conflitos de interesses entre os seus promotores e a comunidade. No entanto, esta actividade sempre se revelou de grande importância para a economia dos países onde existem recursos geológicos exploráveis (Moura *et al.*, 2007), dos quais o nosso não é excepção.

A implantação de uma pedreira numa determinada área implica, invariavelmente, alterações mais ou menos significativas no seu meio ambiente. A deterioração do ecossistema existente resulta aliás, directamente da normal exploração da pedreira e está associada às várias alterações introduzidas nas diversas componentes ambientais e socioeconómicas.

Cabe aos estudos de impacte ambiental identificar e avaliar os efeitos ambientais resultantes da implementação de uma pedreira de calçada e dos projectos complementares, considerando-se como impacte todas as modificações significativas, em relação à previsível evolução da situação actual, que decoram directa ou indirectamente da sua execução.

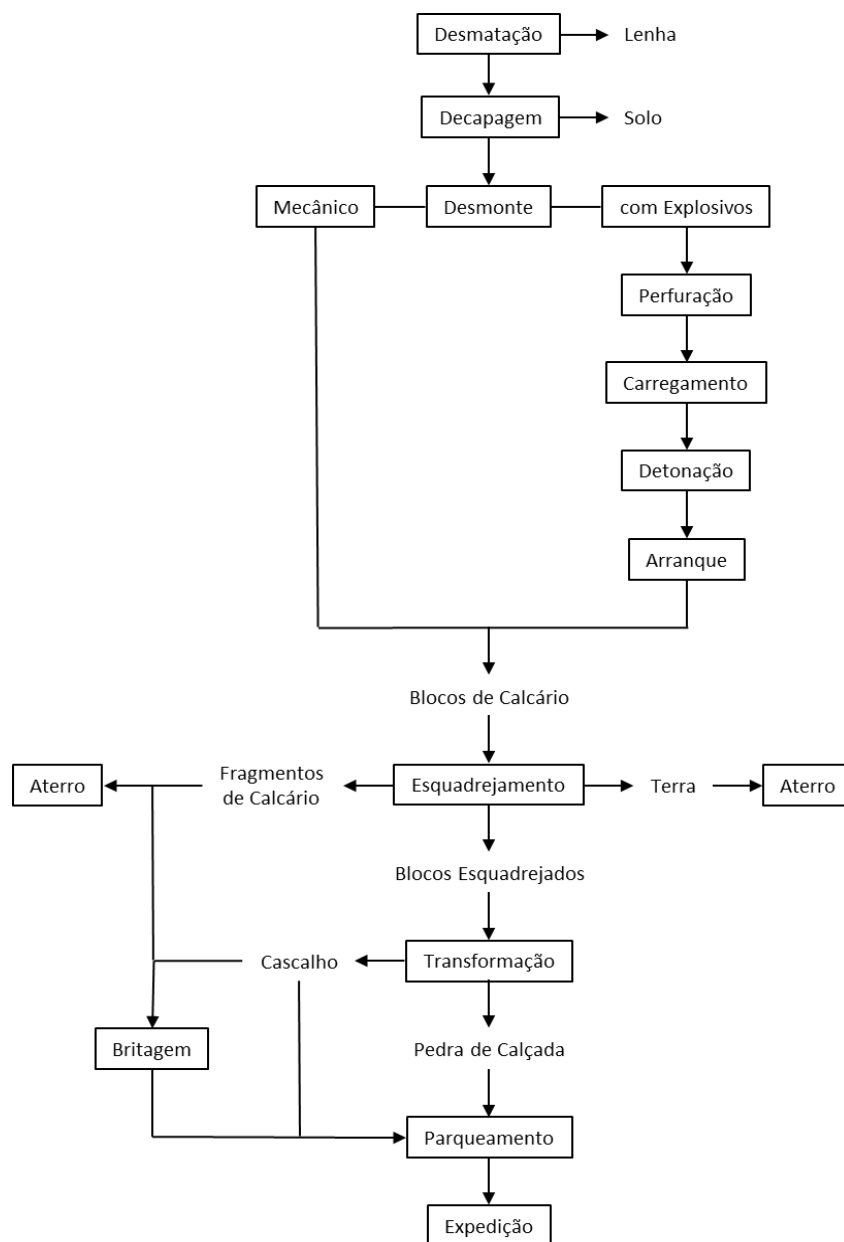


Figura 3.10 – Fluxograma de um possível ciclo de produção para uma pedreira de calcário para calçada.



## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

À semelhança de qualquer outra actividade extractiva, as pedreiras de calçada também causam impactes negativos sobre o ambiente, mas devido a tratar-se de uma actividade bastante artesanal, em que algumas das etapas, que ocupam grande parte do tempo do ciclo produtivo, são realizadas manualmente com recurso a simples ferramentas, esta é uma actividade em que, comparada com a grande maioria da indústria extractiva, muitos dos impactes causados são de menor magnitude.

### 3.3.1. Avaliação do Impacte Ambiental

A actual legislação obriga a que haja, por parte das entidades exploradoras, uma crescente preocupação com as questões ambientais, aspecto que está bem patente nos decretos que legislam esta actividade. Nos termos do ponto 1 do artigo 1º do Decreto-Lei n.º 151-B/2013 de 31 de Outubro, alterado pelos Decretos-Lei n.º 47/2014 de 24 de Março e 179/2015, de 27 de Agosto, o presente decreto-lei estabelece o regime jurídico da Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) dos projectos públicos e privados susceptíveis de produzirem efeitos significativos no ambiente, transpondo para a ordem jurídica interna a Directiva n.º 2011/92/EU, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 13 de Dezembro de 2011.

A avaliação de impacte ambiental corresponde a um instrumento de carácter preventivo da política do ambiente, sustentado na realização de estudos e consultas, que comportam a participação pública e a análise de possíveis alternativas, tendo por objectivo a recolha de informação, identificação e previsão dos efeitos ambientais de determinados projectos, assim como a identificação e propostas de medidas que evitem, minimizem ou compensem esses efeitos, tendo em vista uma decisão sobre a viabilidade da execução de tais projectos e respectiva pós-avaliação (Decreto-Lei n.º 151-B/2013).

Certos das alterações provocadas por qualquer projecto da indústria extractiva na área onde se inserem, podemos assim avaliar e descrever os impactes mais relevantes que uma pedreira de calçada poderá provocar em cada um dos descritores ambientais, sendo estes:

Clima – não se prevê que a exploração de uma pedreira de calçada venha a gerar impactes negativos sobre a generalidade das variáveis climatológicas. Ainda assim, mesmo que pouco significativos, podemos referir alguns impactes negativos resultantes destas explorações:

- Alteração do regime de escoamento de micro-escala das massas de ar;
- Redução da evapotranspiração, devido à remoção do coberto vegetal;
- Alteração da humidade relativa do ar, devido a alteração da topografia e do regime hidrológico local.

Ao nível das alterações climáticas, o impacte resultante das emissões de gases com efeito de estufa, resultará dos consumos de combustíveis nos equipamentos móveis;

Geologia e geomorfologia – nestes descritores, os impactes prendem-se com os processos erosivos, a destruição das formações geológicas e do relevo ou modelado cársico e a instabilidade e subsidência do maciço calcário;

Recursos hídricos superficiais – os principais impactes relacionar-se-ão com a eventual alteração do regime de escoamento e com o incremento da carga sólida transportada;

Recursos hídricos subterrâneos - do que respeita aos aspectos quantitativos, estas explorações poderão ter impacte nos seguintes parâmetros:

- Alteração da taxa de infiltração, que devido à retirada do solo de cobertura na fase preparatória da exploração irá contribuir para o aumento da taxa de infiltração na zona da

## Exploração de Calcário para Calçada

escavação, pelo que poderá ser um impacte positivo. Já nas áreas de deposição deste mesmo solo, poderá provocar uma ligeira redução da taxa de infiltração. No entanto este impacte é de magnitude muito reduzida, tendo em conta a área bastante diminuta destas mesmas pedreiras;

- Alteração da permeabilidade do maciço, que durante a fase de exploração, pela utilização de explosivos, poderá provocar um incremento da permeabilidade secundária, pelo aumento da fracturação do maciço calcário. Este é um impacte positivo, mas que pela reduzida frequência e limitado alcance geométrico de cada pega de fogo, será pouco significativo.

Qualidade das águas superficiais – dependendo da envolvente de cada pedreira em termos de densidade da rede hidrográfica, a qualidade da água superficial poderá ser mais ou menos afectada por esta actividade extractiva, devido a:

- Arrastamento dos sólidos para as linhas de água devido à desmatagem das áreas de intervenção e/ou incorrecto acondicionamento dos materiais desmontados;
- Deposição, por via húmida e seca, de poeiras originadas nas frentes de desmonte e pela circulação de maquinaria no interior da pedreira;
- Derrame accidental de óleos, lubrificantes e combustíveis utilizados nas máquinas e veículos, afectos ao desmonte e ao transporte.

Qualidade das águas subterrâneas – a vulnerabilidade das águas subterrâneas está dependente da permeabilidade intrínseca deste tipo de formação geológica associada à fracturação/carssificação do maciço e da profundidade do nível freático, existindo assim, uma vulnerabilidade crescente com o aumento da profundidade de escavação.

Os impactes negativos passíveis de ocorrer na fase de exploração estão relacionados com:

- Derrames accidentais de óleos, lubrificantes e combustíveis, utilizados nas máquinas e veículos afectos ao desmonte e ao transporte. Impacte que ao ocorrer será muito significativo;
- Infiltração de partículas sólidas de granulometria micrométrica, resultantes da exploração, pelas fracturas e/ou falhas aflorantes.
- Manipulação de substâncias explosivas utilizadas no desmonte do maciço.

Qualidade do ar – o principal poluente atmosférico são as partículas em suspensão, geradas no desmonte do maciço calcário, nas etapas de carga e descarga do material desmontado e pela circulação da maquinaria nos acessos não pavimentados;

Ambiente sonoro – o ruído mais significativo gerado nesta actividade ocorrerá apenas durante alguns intervalos do ciclo produtivo, aquando da utilização dos equipamentos motorizados e do rebentamento de pegadas de fogo. Na grande maioria do tempo de laboração, o ruído gerado terá pouca relevância, uma vez que se resume ao bater das pequenas marretas nos blocos de calcário;

Vibrações - as vibrações geradas neste tipo de actividade estão exclusivamente relacionadas com a utilização de explosivos, o que devido à pequena quantidade de explosivos utilizada em cada pega de fogo, de modo a não fragmentar os blocos de calcário, e apenas em zonas do maciço que se encontrem mais coerentes, leva a que as vibrações induzidas no maciço sejam pouco significativas;

Flora e vegetação – os impactes serão essencialmente resultantes da desmatagem e decapagem, actividades que promovem a destruição da vegetação. Esta eliminação é inevitável em toda a área de extracção, sendo os impactes sobre este descritor agravados pela remoção da camada de solo fértil, aumento dos declives, aumento da erosão e a eliminação do banco de sementes do solo, criando dificuldades à regeneração natural das espécies vegetais. A emissão

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

de poeiras e de gases provenientes das actividades da pedreira, também provocaram alterações do coberto vegetal na zona envolvente às pedreiras. Os impactes para este factor ambiental resumem-se a:

- Destruição total da vegetação da área a explorar;
- Aumento da pressão antrópica, pela criação de resíduos e perturbação;
- Eventual contaminação do solo na área a explorar, devido ao derrame accidental de produtos poluentes;
- Eventual danificação e morte de espécies arbóreas na vegetação circundante por descuido de manipulação de máquinas;
- Antropização do coberto vegetal na área envolvente à exploração;
- Emissão e deposição de poluentes atmosféricos e poeiras na vegetação circundante.

Fauna e biótopos – o impacte da exploração de uma pedreira sobre a fauna, levam à sua perturbação e mortalidade, pela conseqüente destruição dos habitats existentes. Não só a perda de habitats, como também o incremento da presença humana, o impacte visual, o ruído e as poeiras, levam ao afastamento das espécies faunísticas;

Solos – a intensidade e a natureza dos impactes gerados pela alteração do uso do solo, dependem das suas potencialidades intrínsecas, ou seja, quanto maiores forem as potencialidades de uso agrícola ou florestal de um determinado solo, mais significativas serão os impactes pela alteração profunda do seu uso. Estes impactes também serão sentidos ao nível das suas características físico-químicas e biológicas, em que o processo de decapagem e armazenamento destruíram toda a sua organização, ao nível das camadas, estrutura e textura, podendo alterar irreversivelmente os solos.

Paisagem – a actividade extractiva origina impactes visuais de magnitude elevada devido a:

- Destruição do coberto vegetal existente;
- Remoção e armazenamento do solo de cobertura;
- Formação de nova topografia resultante das escavações;
- Implementação de zonas de armazenamento dos produtos finais e de escombreciras.

Estas alterações morfológicas constituirão impactes visuais tanto mais significativos quanto maior for a sensibilidade visual das áreas onde ocorrem;

Socioeconómicos – uma das conseqüências associadas à exploração de uma pedreira é o seu impacte na vida das populações locais e nos seus valores naturais, culturais e económicos. Do ponto de vista socioeconómico, a actividade extractiva representa um factor de desenvolvimento, quer pelo aproveitamento dos recursos minerais existentes, quer pelas indústrias que sustenta a jusante e montante, sendo neste domínio, um pólo de dinamização económica, gerador de emprego directo e indirecto. Os impactes negativos prendem-se com os problemas de carácter ambiental, sobretudo, nos descritores de ruído, qualidade do ar e paisagem, incidindo de forma negativa na qualidade de vida das populações.

Contudo, não é demais realçar que, apesar das pedreiras de calçada provocarem alguns dos impactes ambientais descritos anteriormente, pela sua pequena dimensão e forma bastante artesanal de produção, não são, nem em número nem em gravidade, como os provocados por explorações de maior dimensão.

Ainda assim, quando susceptíveis de provocar impactes significativos no ambiente, os projectos com vista à exploração de uma pedreira de calçada, poderão estar sujeitos a AIA. No âmbito deste procedimento, será realizado um Estudo de Impacte Ambiental (EIA), que tem a função de identificar, prever e prevenir as alterações ambientais produzidas por esta actividade, devendo este funcionar interactivamente com o Plano de Lavra e com o PARP.

### 3.3.2. Plano Ambiental e de Recuperação Paisagística

Tendo em conta o longo período de exploração previsto para uma pedreira, será necessário realizar a sua integração paisagística em simultâneo com o avanço da lavra. De facto, não basta satisfazer as exigências ambientais gerais associadas a este tipo de exploração, é também importante minimizar localmente os inconvenientes originados pela laboração da pedreira à medida que estes surgem.

Tal como para as restantes pedreiras, as de calçada também se vêem na obrigatoriedade de proporem um Plano Ambiental e de Recuperação Paisagística (PARP) e de darem cumprimento a todos os trabalhos e operações consagrados por este, que dizem respeito às actividades a implementar na pedreira de forma a garantir que, após o seu encerramento, toda a área intervencionada pela actividade se encontra devidamente integrada na paisagem envolvente.

Com implementação do PARP pretende-se uma resolução técnica dos problemas levantados pela concretização desta actividade e, ao mesmo tempo, minimizar as consequências decorrentes da sua laboração e encerramento, procurando-se, não só, que a intervenção conduza a uma menor degradação do sistema natural, mas também providenciar a sua evolução, através da escolha de soluções que restabeleçam o equilíbrio da paisagem intervencionada (VISA Consultores, 2011).

Um PARP pretende garantir que, quer durante a sua exploração, quer após o seu encerramento, as áreas intervencionadas por uma pedreira se encontrem integradas na paisagem envolvente, sendo que o seu principal objectivo, é efectuar de forma integrada (em articulação com as diversas actividades da pedreira) e faseada no tempo, a recuperação e integração paisagística da pedreira (VISA Consultores, 2003). As soluções encontradas deverão desenvolver-se, essencialmente, no sentido de recuperar a área afectada, atenuar a artificialidade associada às suas actividades de desactivação e melhorar o seu aspecto estético e ecológico, permitindo a sua compatibilização com os usos potenciais da área, estando presente um conjunto de objectivos de ordem estética, funcional e económica, bem como um conjunto de condicionantes que a seguir se identificam (VISA Consultores, 2011):

- Compatibilizar a recuperação paisagística com as operações de lavra e aterro;
- Recuperar a área afectada pela actividade extractiva, minimizando os impactes paisagísticos decorrentes da exploração da pedreira;
- Valorizar a área do ponto de vista biofísico, através do seu enriquecimento florístico;
- Garantir o restabelecimento da vegetação autóctone, utilizando espécies da flora local, excepto nos casos em que haja vegetação mais adequada aos objectivos pretendidos, desde que adaptada às condições edafo-climáticas existentes;
- Atenuar a presença da pedreira e das infra-estruturas associadas na paisagem envolvente, através da implementação imediata de cortinas arbóreas nas áreas de maior visibilidade para o exterior, que funcionarão também como barreiras acústicas e de retenção de poeiras;
- Assegurar o baixo custo de manutenção da vegetação estabelecida, garantindo a permanência de uma paisagem equilibrada.

As formas de recuperação de pedreiras a céu aberto são ilimitadas, dependendo do projectista, do promotor, da função e dos objectivos definidos para cada espaço, das condicionantes do local, dos materiais disponíveis e do capital que se pretende investir (Bastos & Silva, 2006).

Em função do grau de intervenção realizada na pós-exploração, os diferentes modelos de recuperação podem ser agrupados em três tipos principais (Sousa, 2012):

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

**Restauração** – tem por objectivo restaurar o estado original da zona afectada pela pedra. Após o final das actividades extractivas, serão removidas as causas directas da degradação ambiental, e desenvolvem-se acções para a reposição da situação preexistente;

**Reabilitação** – pressupõe uma recuperação das funções e processos naturais dentro do contexto da perturbação, produzindo um ecossistema alternativo compatível com a envolvente. É a solução mais frequente em pedreiras, assente na revegetação e florestação das áreas afectadas, tentando aproximar a zona perturbada o mais possível da situação ideal. Sendo esta opção, na maioria dos casos, a mais fácil e a que reúne maior consenso por parte das entidades licenciadoras;

**Reconversão** – visa a utilização do espaço afectado para outros usos, distintos dos originais, sem a preocupação de reposição do ecossistema autóctone, não sendo por isso obrigatório a revegetação da área. Há diversos exemplos de antigas pedreiras que se tornam úteis para o bem-estar da população, ao serem reconvertidas em espaços lúdicos.

Para o tratamento dos vazios (depressões) resultantes da exploração existem diferentes tipos de intervenção (Fig. 3.11) que deverão, na medida do possível, maximizar a instalação do coberto vegetal, em que o seu enchimento será uma das primeiras e principais acções a realizar.

Devido à sua pequena dimensão e reduzida profundidade de escavação, características da generalidade das pedreiras de calçada, a recuperação destas explorações é bastante rápida e com um baixo grau de complexidade, sendo possível restabelecer a topografia original, tanto quanto possível, recorrendo-se à grande quantidade de material que é depositado na escombreira, ou, em situações que seja mais vantajoso do ponto de vista socioeconómico, poder-se-á optar pela utilização do espaço para outro fim.

Dê-se por exemplo a recuperação de várias explorações de calçada branca no planalto da Serra de Santo António, em que a retoma das áreas exploradas tem sido francamente bem-sucedida, até porque os fragmentos de calcário presentes no material de entulho, utilizado para o enchimento das depressões, adquire facilmente uma pátina acinzentada que faz com que não se diferencie do aspecto nem da tonalidade envolvente, favorecendo uma rápida proliferação da flora tradicional (Henriques *et al.*, 2009).

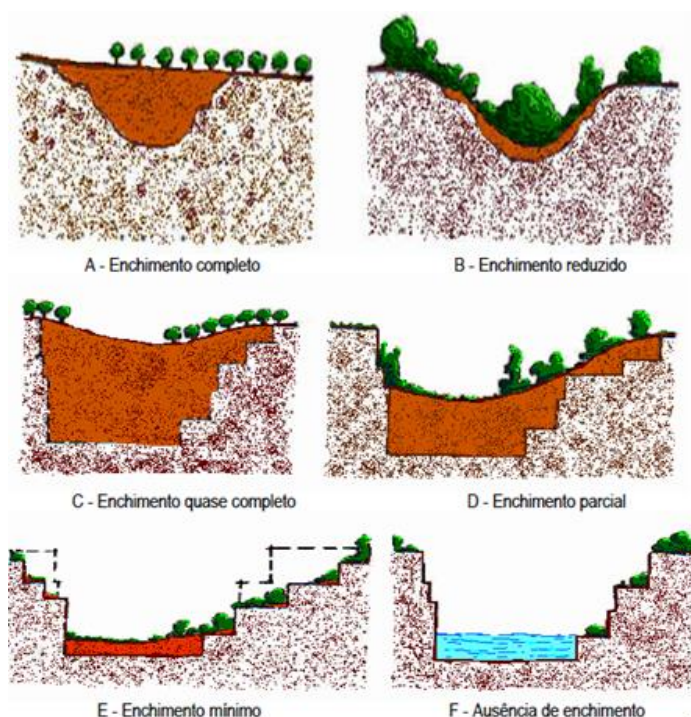


Figura 3.11 – Esquema dos tipos de intervenção na recuperação de pedreiras a céu aberto, só o exemplo A é compatível com a restauração, sendo os restantes conciliáveis com a reabilitação e com a reconversão (adaptado de Sousa, 1993, in Bastos & Silva, 2006).

### Capítulo 4 – Núcleos de Explorações de Calcário para Calçada

No território nacional existem vários núcleos de explorações de calcário para calçada, estando geograficamente distribuídos pela zona centro oeste e sul do país. Sendo a disponibilidade deste recurso geológico, de resto como toda a actividade mineira, um factor determinante para esta localização.

Nesta dissertação foi realizado um levantamento, no território nacional, dos diferentes núcleos onde se procede à exploração de calcário para calçada. Para tal, recorreu-se à pesquisa na página da *web* da Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG, 2016) das pedreiras de calcário para calçada em actividade. No entanto, e tendo-se observado neste sítio bastantes incongruências com a realidade, optou-se também por procurar em diversas zonas do país pedreiras onde se desenvolve este tipo de exploração.

Para a definição de cada núcleo aqui referido ponderou-se não só o seu isolamento geográfico em relação às restantes zonas, mas também a singularidade das características do maciço calcário onde ocorrem. Alguns destes núcleos integram dezenas de pedreiras em áreas bastante extensas, enquanto outros correspondem a um pequeno número de explorações ou mesmo a uma única pedreira, não deixando, no entanto, de serem considerados como um núcleo de exploração, representando zonas isoladas e suficientemente distintas das restantes e onde surge a extracção de calcários com características únicas, diferenciando-se de todos os outros.

#### 4.1. Enquadramento Geográfico

Do levantamento realizado foi possível individualizar oito núcleos formais de explorações de calcário para calçada (Fig.4.1), pelo que ao percorrermos o país de Norte para Sul foram distinguidos os núcleos de Cantanhede, Zambujal, Cumeeira, Alqueidão da Serra, Porto de Mós - Alcanede, Alenquer, Albufeira e São Brás de Alportel.

Uma vez que muitas das pedreiras de calçada não se encontram licenciadas, existindo mesmo núcleos sem qualquer pedreira legalizada, torna o levantamento aqui realizado algo complexo e falível. Sendo, por este facto, quase impossível determinar com exactidão a totalidade dos núcleos onde se procede à extracção de calcário para calçada, assim como o número de pedreiras que neles laboram. Portanto, admite-se a hipótese de existir zonas onde também se procede esta actividade e que não estão aqui referenciadas.

#### 4.2. Enquadramento Geológico

Todos os núcleos aqui referidos inserem-se nas Orlas sedimentares Mesocenozóicas Ocidental e Meridional (ou Algarvia), que se formaram a partir do Pérmico nas margens continentais a oeste e a sul da Península Ibérica. Estando relacionados com os fenómenos tectónicos distensivos que deram lugar à abertura do Oceano Atlântico.

Nestas orlas incluem-se os Períodos Triássico, Jurássico e Cretácico da Era Mesozóica, durante a qual teve lugar a formação de espessas bancadas de calcários, com maior relevância no Jurássico (Moura *et al.*, 2007).

Neste trabalho serão apenas abordados os núcleos de Alqueidão da Serra, Porto de Mós - Alcanede e de Alenquer, estando ambos inseridos na Orla Ocidental (Fig. 4.2). A eleição destes

# Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

três núcleos deveu-se ao facto de ser destas zonas de onde saem as maiores quantidades de pedra aplicadas na tradicional calçada portuguesa de vidro.

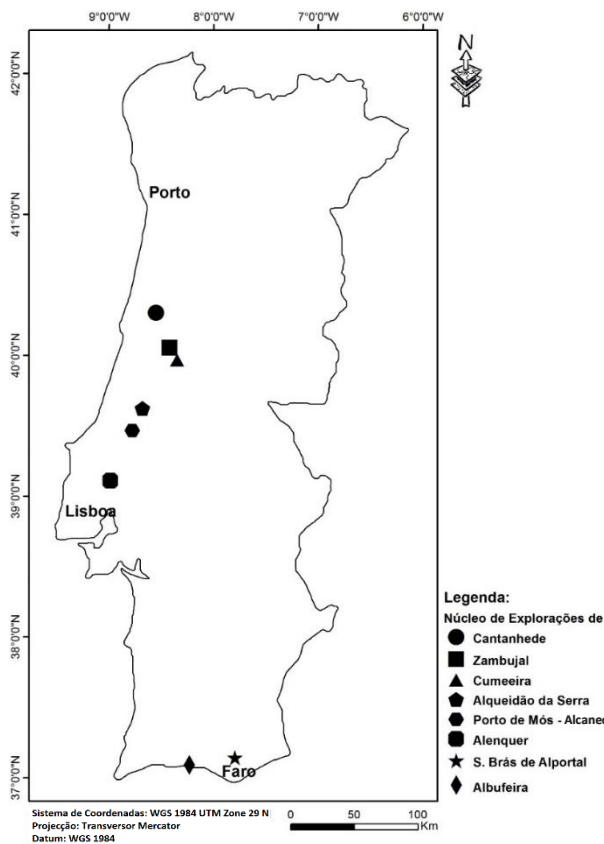


Figura 4.1 – Enquadramento geográfico dos núcleos de explorações de calcário para calçada.

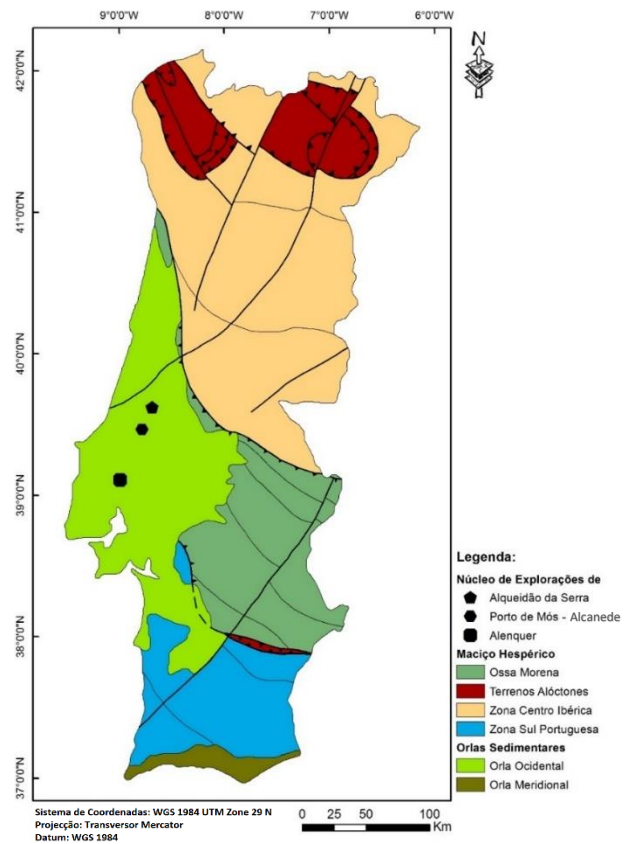


Figura 4.2 – Enquadramento dos núcleos de Alqueidão da Serra, Porto de Mós - Alcanede e Alenquer no mapa tectono-estratigráfico de Portugal (mapa tectono-estratigráfico adaptado de Ferreira, 2000).

## 4.3. Núcleo de Explorações de Alqueidão da Serra

No núcleo de Alqueidão da Serra procede-se à exploração de um calcário com características muito peculiares, o calcário negro. À medida que se avança no maciço calcário em direcção à intrusão diapírica existente nesta zona, a coloração do calcário varia do cinzento-claro (pedra russa) ao negro, passando pelo cinzento-escuro.

Daqui extrai-se a totalidade do calcário negro que é utilizado na calçada portuguesa. Com características que facilitam a sua trabalhabilidade, esta pedra veio substituir o basalto, de corte mais difícil, que era inicialmente empregue neste tipo de pavimento.

Pelo que se observou na visita realizada às explorações de Alqueidão da Serra, trata-se de pedreiras de pequena dimensão onde laboram um reduzido número de pessoas, havendo pedreiras em que o proprietário da exploração é o único funcionário.

Actualmente, nesta zona e devido ao declínio que se tem vivido no sector da calçada portuguesa, não deverão existir mais de 10 pedreiras em actividade, ainda assim um número superior ao registado no sítio da Web da DGEG.

## Núcleos de Explorações de Calcário para Calçada

As pedreiras que aqui se encontram utilizam maioritariamente o método de desmonte em flanco de encosta, recorrendo sobretudo a meios mecânicos para a extração do calcário. A utilização de explosivos apenas é empregue quando estritamente necessário para a desagregação do maciço calcário, sendo a sua posterior transformação realizada manualmente.

Com o auxílio de pequenas marretas todos os calcários de diferentes colorações aqui existentes podem ser transformados em diversas dimensões de pedra de calçada, sendo que o seu preço vai aumentando das tonalidades mais claras para as mais escuras. Esta diferença justifica-se não só pela maior dificuldade de corte do calcário negro, mas também pela escassez de reservas deste tipo de calcário.

### 4.3.1. Enquadramento Geográfico

Muitas das pedreiras que constituem este núcleo surgem em Alqueidão da Serra, pertença do concelho de Porto de Mós, no distrito de Leiria, tratando-se de uma freguesia com cerca de 21 km<sup>2</sup> (Junta de Freguesia de Alqueidão da Serra, 2016). Parte deste núcleo abrange ainda uma freguesia vizinha a esta, Reguengo do Fetal, com 28 km<sup>2</sup>, já no concelho da Batalha (Junta de Freguesia de Reguengo do Fetal, s. d.). Estas freguesias situam-se no sopé da Serra de Aire e Candeeiros, a cerca de 280 m de altitude, em pleno Maciço Calcário Estremenho (Junta de Freguesia de Alqueidão da Serra, 2016). Esta área encontra-se abrangida na Folha 308 (Porto de Mós) da Carta Militar de Portugal na escala 1:25.000 (Fig. 4.3).

Não ocupando áreas muito significativas, as pedreiras de calçada localizam-se algo dispersas nas imediações das povoações.

### 4.3.2. Enquadramento Geológico

No que respeita ao seu enquadramento geológico, o Núcleo de Explorações de Alqueidão da Serra encontra-se abrangido pela Folha 27 A (Vila Nova de Ourém) da Carta Geológica de Portugal à escala de 1:50.000 (Fig. 4.4).

Os calcários onde estão inseridas as pedreiras de calçada pertencem às unidades de Cabaços e Montejunto (J<sup>3</sup><sub>CM</sub>). Estas unidades não apresentam um limite litológico cartografável, mas uma passagem progressiva de fácies límnicas a fácies marinhas (Zbyszewski *et al.*, 2000).

Com uma espessura máxima de 80 m (Carvalho *et al.*, 2011), as fácies dominantes das Camadas de Cabaços (J<sup>3</sup><sub>c</sub>) são representadas por litologias mais ou menos carbonatadas (Zbyszewski *et al.*, 2000). A sua base é constituída por calcários conglomeráticos e margas amareladas com concreções ferruginosas, a que se seguem calcários micríticos, mais ou menos argilosos e mais ou menos bioclásticos e pelóidicos. As bancadas possuem espessuras centimétricas a decimétricas, que raramente ultrapassam 0,5 m. Ocasionalmente ocorrem sequências mais ou menos espessas com as bancadas a evidenciar um carácter laminitico. Estas rochas apresentam-se com umas cores amareladas-ferruginosas e cinzentas (Carvalho *et al.*, 2011).

Com base num corte geológico na região de Torres Vedras rico em amonóides, Choffat datou esta unidade como pertencente ao Oxfordiano médio. Em 1961, C. Ruget-Perrot reviu esta fauna e confirmou a datação proposta por Choffat, sendo hoje aceite pela maioria dos autores (Zbyszewski *et al.*, 2000).



## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

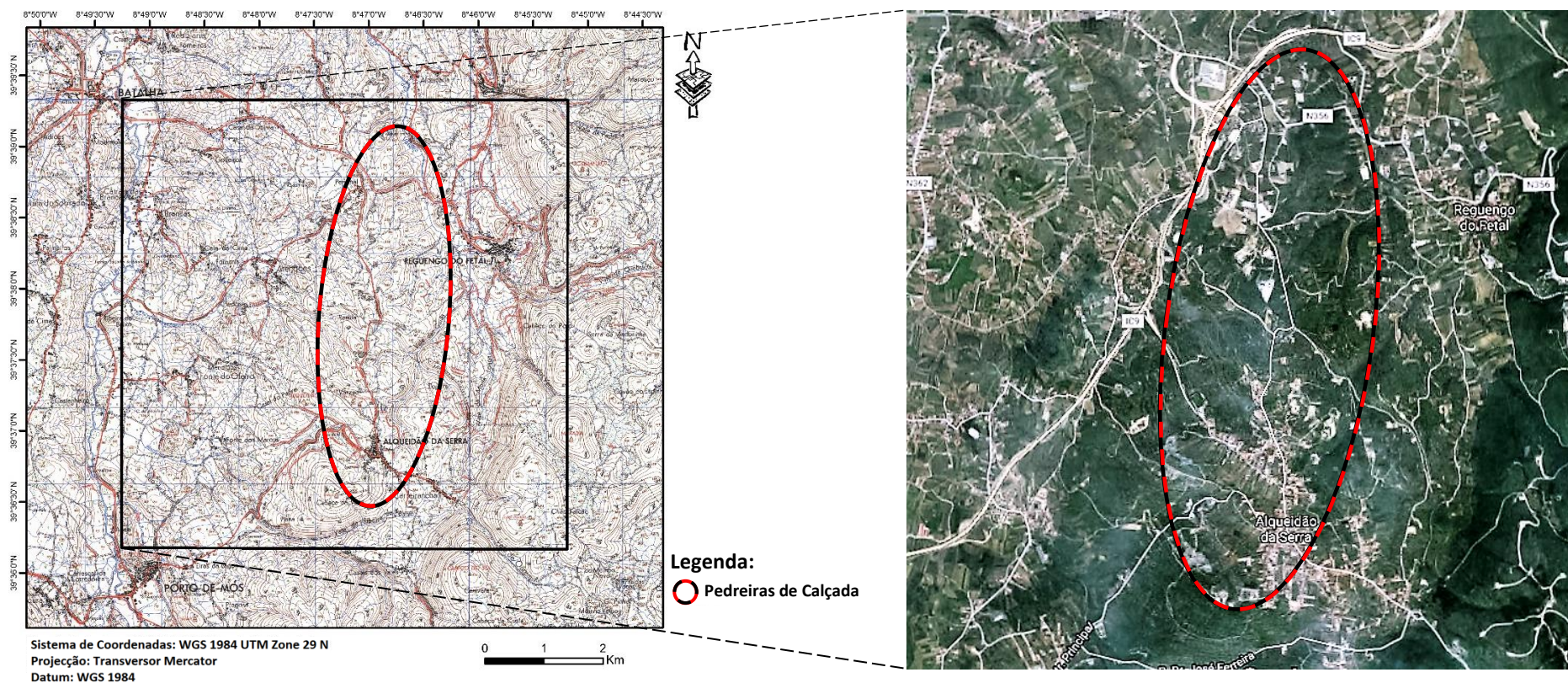


Figura 4.3 – Enquadramento geográfico das pedreiras de calçada do Núcleo de Explorações de Alqueidão da Serra, na Folha 308 (Porto de Mós) da Carta Militar de Portugal na escala 1:25.000. Também se encontra projectada a imagem aérea correspondente ao local das pedreiras de calçada.

## Núcleos de Explorações de Calcário para Calçada

A sobrepor a unidade anterior sem discordância aparente, surge as Camadas de Montejunto ( $J^3_M$ ) (Zbyszewski *et al.*, 2000). Ocupando largas extensões de afloramentos do Maciço Calcário Estremenho, esta unidade é constituída por calcários micríticos de cores cinzentas, mais ou menos oolíticos, pelóidicos e bioclásticos, com calcários argilosos a surgir no seu topo (Carvalho *et al.*, 2011).

Apresentando bancadas com espessuras muito variadas, desde alguns centímetros até aos 2 m, predominam, no entanto, os termos decimétricos. Assim como a espessura das bancadas, a sua possança total também é muito variável, desde 320 m na Depressão de Alcobça, a 600 m e 700 m nas depressões de Alqueidão e Reguengo de Fetal, respectivamente, tendo sido a sua deposição controlada por subsidência tectónica (Carvalho *et al.*, 2011). Também com recurso a uma fauna rica em amonoides, esta unidade, definida por Choffat em 1893 na serra homónima, é datada do Oxfordiano superior (Zbyszewski *et al.*, 2000).

As características ímpares dos calcários que surgem junto a Alqueidão da Serra, resultam de um processo de metamorfismo de contacto proveniente da intrusão de um corpo de natureza dolerítica em rocha carbonatada (Velho & Moura, 2012), que cortam o maciço calcário correspondente ao planalto da Serra de Santo António. Pelo que a conjugação do seu significativo teor carbonoso com este fenómeno térmico, que acentuou a incarbonização, resultou na cor azul-escura a negro adquirida por este calcário.

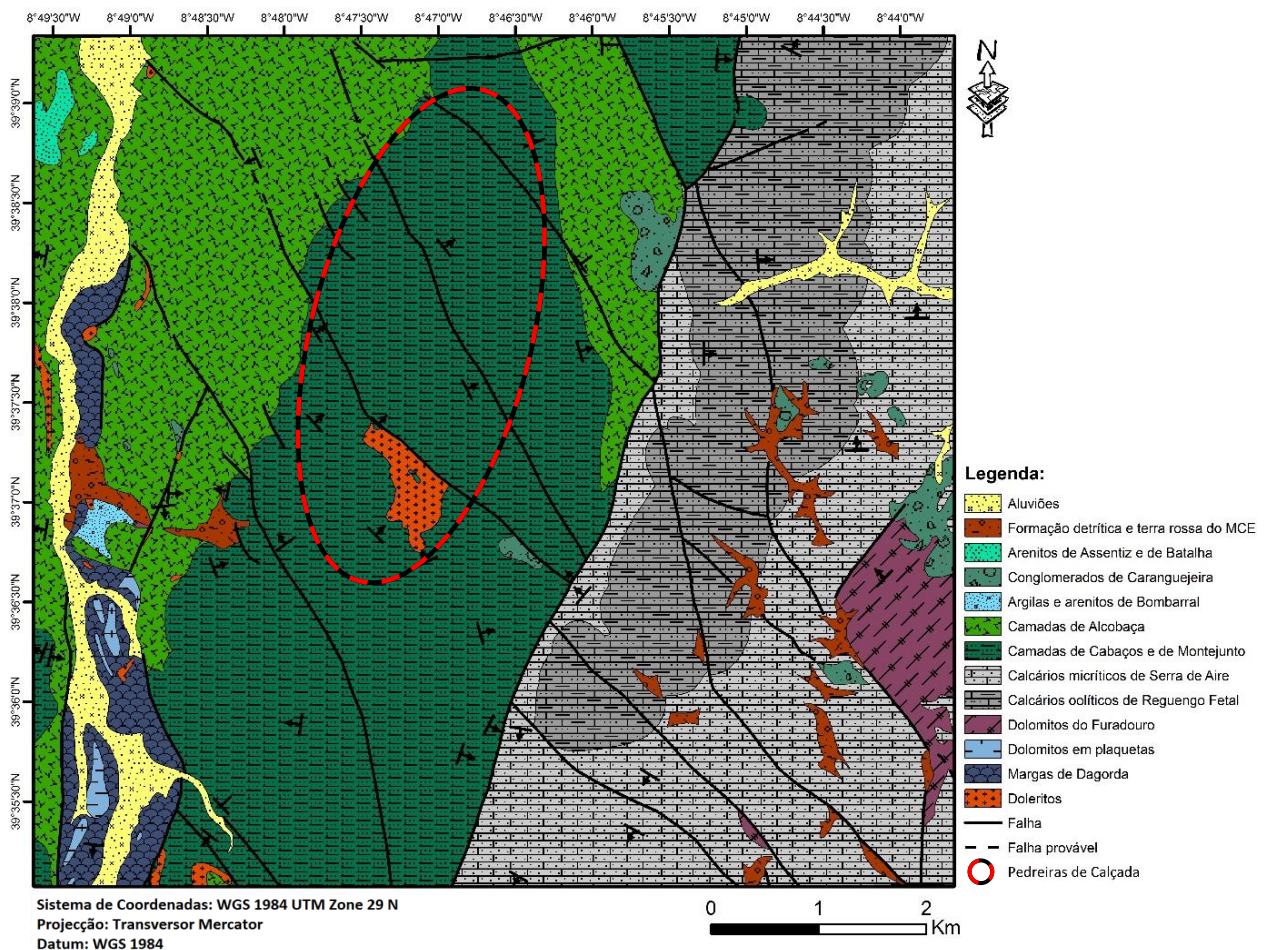


Figura 4.4 – Enquadramento geológico do Núcleo de Explorações de Alqueidão da Serra. Adaptado da Folha 27-A (Vila Nova de Ourém) da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50.000.

### 4.4. Núcleo de Explorações de Porto de Mós – Alcanede

O Núcleo de Explorações de Porto de Mós – Alcanede é a zona do país de onde mais se extrai calcário para calçada, em que a cor dominante é o branco. Caracterizado por pedreiras de pequena dimensão e com poucos trabalhadores, cujo número varia de 1 a 10 por exploração, mas onde normalmente apenas existem 2 ou 3, já chegou a contar com mais de 200 pedreiras em actividade. Em conversa com diversas pessoas do sector, este número certamente ter-se-á reduzido para menos de metade.

Nesta zona as explorações encontram-se implantadas sobretudo em flanco de encosta suave que em geral não atingem grande profundidade de escavação, raramente ultrapassando os 10 metros.

O maciço calcário nesta zona é caracterizado por uma estruturação bem definida pelos estratos horizontais a sub-horizontais de grande continuidade (Fig. 4.5). Este arranjo ordenado do maciço possibilita a que a lavra aqui empregue seja bastante selectiva, pois só interessa o calcário com características que se adequam à sua transformação em calçada, o qual ocorre em bancadas pouco espessas e em geral pouco inclinadas que fazem parte das camadas sub-aflorantes ao longo de alguns quilómetros (Henriques *et al.*, 2009). Esta estruturação do maciço também se torna benéfica para o seu desmonte mecânico, recorrendo-se com menos frequência à utilização de explosivos.



Figura 4.5 – Pedreira de pedra de calçada no Núcleo de Explorações de Porto de Mós – Alcanede, onde se pode observar a estratificação sub-horizontal do maciço calcário.

A maioria da pedra de calçada que aqui se produz é feita manualmente, utilizando, sobretudo, o calcário mais vidraço. Para calcários mais granulares, alguns exploradores já adquiriram máquinas de corte mecânico (cunhas hidráulicas), resultando num produto de manifestamente menor qualidade, sobretudo devido às piores propriedades físicas destes calcários. Em ambos os métodos são produzidos qualquer uma das dimensões de pedra utilizadas na calçada portuguesa.

#### 4.4.1. Enquadramento Geográfico

Este núcleo constitui uma ampla área que se estende desde o concelho de Porto de Mós, no distrito de Leiria, abrangendo as freguesias de Mendiga, Arrimal e São Bento, com aproximadamente 20, 19 e 9 km<sup>2</sup>, respectivamente (Junta de Freguesia de São Bento, 2016 e

## Núcleos de Explorações de Calcário para Calçada

União das Freguesias de Arrimal e Mendiga, 2016), até à freguesia de Alcanede, com cerca de 109 km<sup>2</sup> (Câmara Municipal de Santarém, 2016), no concelho e distrito de Santarém. Inserindo-se nas Serras de Aire e Candeeiros, surge integralmente no Maciço Calcário Estremenho.

Esta área encontra-se abrangida pelas folhas 317 (Alcobaça), 318 (Mira de Aire), 327 (Benedita) e 328 (Alcanena) da Carta Militar de Portugal na escala 1:25.000 (Fig. 4.6).

### 4.4.2. Enquadramento Geológico

A zona onde se inserem as pedreiras de calçada do núcleo de Porto de Mós – Alcanede, encontra-se abrangida pelas Folhas 27 A (Vila Nova de Ourém) e 27 C (Torres Novas) da Carta Geológica de Portugal à escala de 1:50.000.

Esta zona corresponde na sua quase totalidade a formações calcárias jurássicas do Dogger (Fig. 4.7). Nesta região, a série do Dogger é de natureza carbonatada e está representada por todos os seus andares, Aaleniano, Bajociano, Batoniano e Caloviano. A grande maioria das pedreiras de calçada inserem-se nas formações calcárias batonianas.

Os calcários aqui aflorantes podem ser individualizados segundo duas formações propostas por Azerêdo (2007) na definição litostratigráfica do Batoniano nesta zona, a Formação de Serra de Aire e a Formação de Santo António-Candeeiros, constituída pelos Membros de Codaçal, Pé da Pedreira e Moleanos.

A unidade Calcários Micríticos de Serra de Aire (J<sup>2</sup><sub>SA</sub>), ou segundo Azerêdo (2007), Formação de Serra de Aire, representa nesta zona a grande parte da área aflorante do Dogger, ocupando grande extensão das zonas mais soerguidas do Maciço Calcário Estremenho (Carvalho *et al.*, 2011). Constituída por calcários micríticos compactos ricos em foraminíferos bentónicos (Zbyszewski *et al.*, 2006), com maior ou menor abundância de finas vesículas de calcite, apresentam elevado grau de pureza donde os tons bastante claros que ostentam (Carvalho *et al.*, 2011).

A base desta formação é litologicamente definida pela passagem, de níveis dolomíticos maciços (topo da unidade subjacente) a calcários micríticos e dolomicríticos, compactos ou laminares (laminitos microbianos), com presença variável de oncóides, nódulos algais e fenestrae (Manuppella *et al.*, 1985; Azerêdo, 1993, 1999; in Zbyszewski *et al.*, 2000).

A Formação de Serra de Aire abrange todo o Batoniano, apresentando na sua globalidade uma espessura máxima entre 350 a 400 m, interdigitando com outros depósitos, constituídos por calcários oolíticos, bioclásticos e calciclásticos, em geral pertencentes à Formação de Santo António e Candeeiros. Representada por calcários lagunares e perimariais formados em áreas protegidas ante-barreiras, esta Formação é caracterizada por diferentes litofácies predominantemente micríticas que sucedem praticamente ao longo de toda a unidade, ocorrendo com diferentes graus de abundância e com modos sequenciais diversos (Azerêdo, 2007).

A Formação de Santo António-Candeeiros é constituída por uma espessa sucessão de calcários com mais de 500 m. Consistem em calcários oolíticos e bioclásticos com estratificação oblíqua de vários tipos, calcários intra/lito/bioclásticos maciços ou gradados, calcários intrapelóidicos, biostromas de coraliários e algas (Azerêdo, 2007).

Azerêdo (2007) agrupa esta formação em três membros litostratigráficos formais (Kullberg *et al.*, 2013), nomeadamente: O Membro de Codaçal e o Membro de Pé da Pedreira, que correspondem a fácies carbonatadas típicas de rampa interna geradoras de calcários de alta energia num contexto de paleoambiente de ilha-barreira, e ainda, o Membro de Moleanos (Inês, 2010).

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

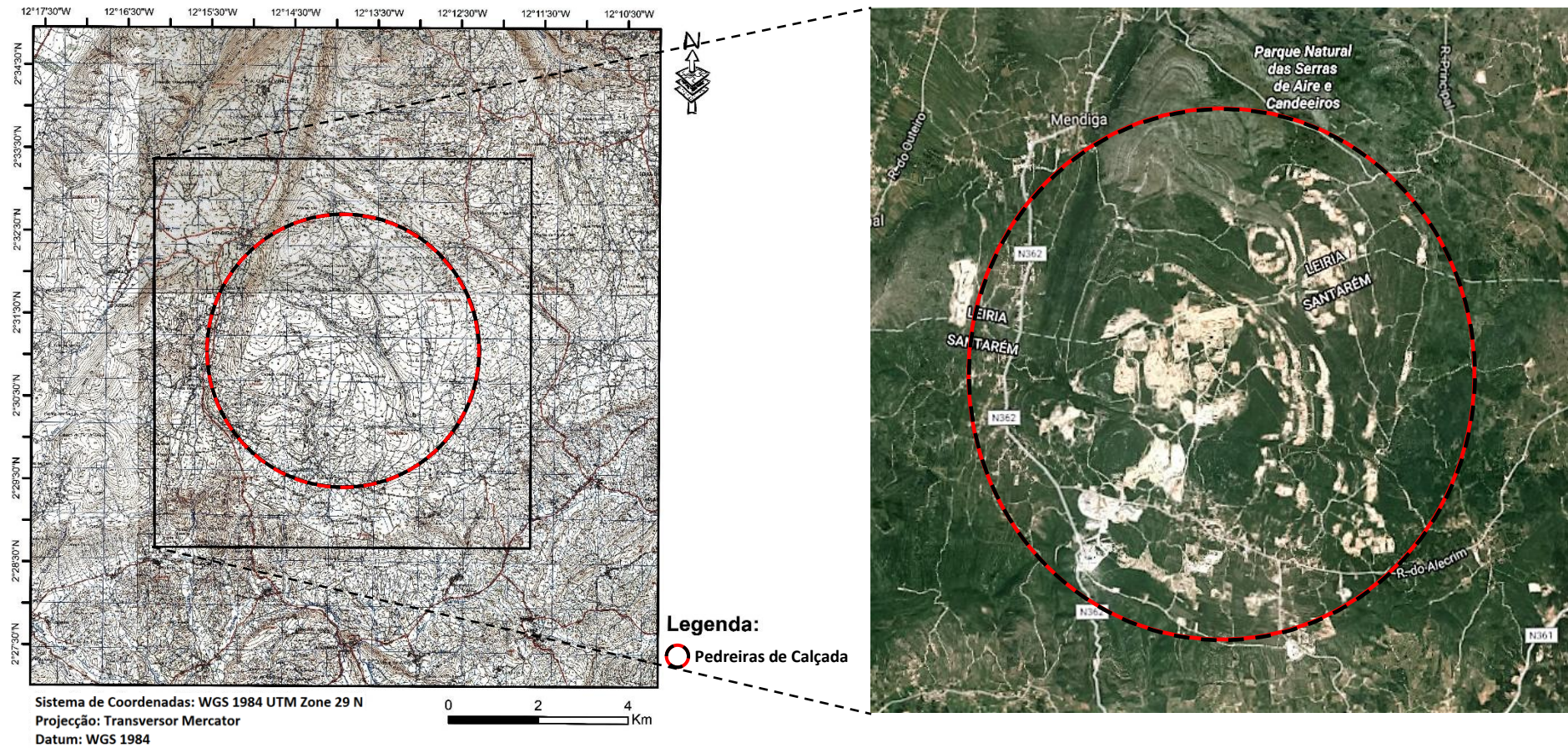


Figura 4.6 – Enquadramento geográfico das pedreiras de calçada do Núcleo de Explorações de Porto de Mós - Alcanede, nas Folhas 317 (Alcobaça), 318 (Mira de Aire), 327 (Benedita) e 328 (Alcanena) da Carta Militar de Portugal na escala 1:25.000. Também se encontra projectada a imagem aérea correspondente ao local das pedreiras de calçada.

## Núcleos de Explorações de Calcário para Calçada

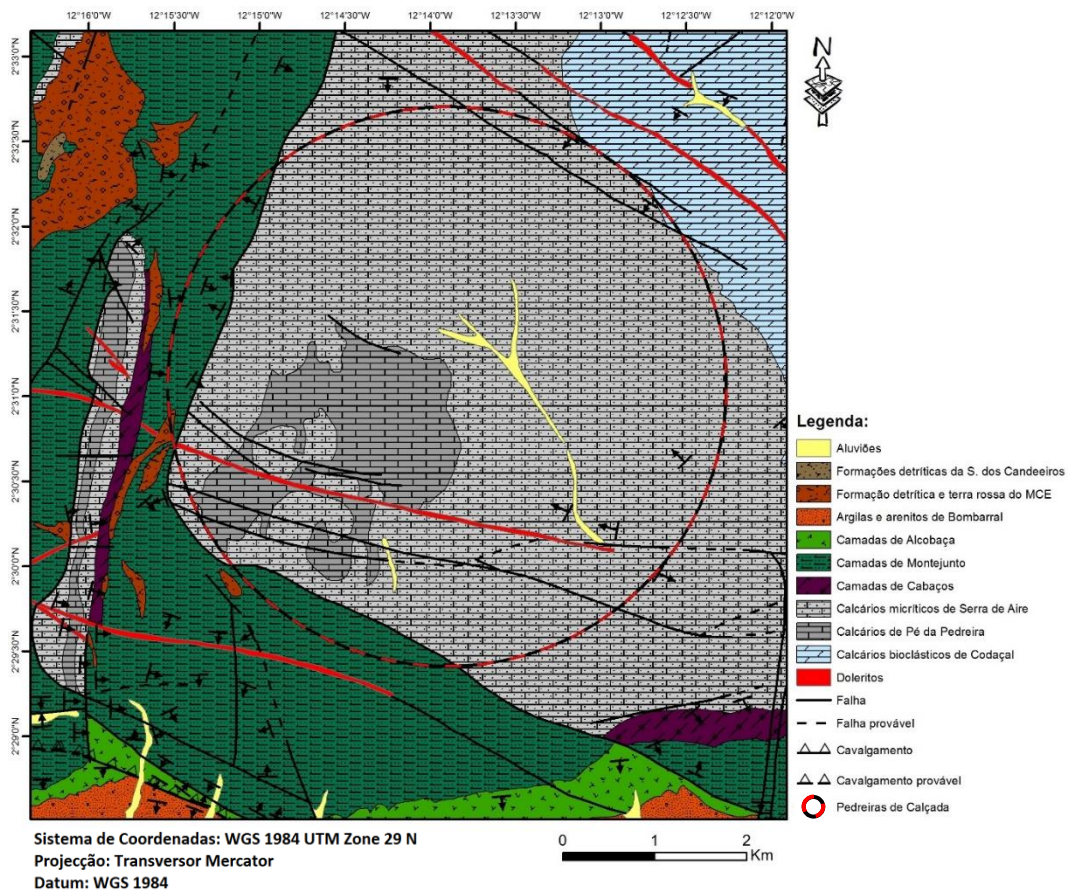


Figura 4.7 – Enquadramento geológico da maioria das pedreiras de calçada do Nucleo de Explorações de Porto de Mós – Alcanede. Adaptado das folhas 27 A - Vila Nova de Ourém (1998) e 27 C - Torres Novas (1969) da Carta Geológica de Portugal à escala de 1:50.000.

Desta Formação surge na área das pedreiras o Membro de Pé da Pedreira, que abrange, em Manuppella *et al.* (2000), as unidades de Calcários de Pé da Pedreira ( $J^2_{pp}$ ), Calcário oolíticos de Reguengo do Fetal ( $J^2_{RF}$ ) e Calcários oolíticos de Fátima ( $J^2_{Fa}$ ), é datado do Batoniano pelas últimas presenças de *Alzonella cuvillieri* na fracção inferior da unidade e pela ocorrência de *Meyendorffina bathonica* ao longo da parte superior. Composto por calcários oo/bio/intra/pelsparites (*grainstones* a *rudstones* e, raramente, *pack-grainstones*), constituem geralmente camadas de espessura métrica, que por vezes são intercaladas por níveis descontínuos menos espessos de biopelintramicroites (*packstone*) (Azerêdo, 2007).

Também muito característico e frequente nesta unidade são os níveis de granulometria grosseira, abonados em bioclastos que incluem equinóides, crinóides, coraliários, algas, moluscos, etc. Estes níveis bioacumulados, podem, em certos casos, corresponder a biostromas que chegam a atingir 3 m de espessura (Cabeça Veada). A espessura total deste Membro é variável, podendo atingir mais de 150 m (Azerêdo, 2007).

### 4.5. Núcleo de Explorações de Alenquer

O núcleo de explorações de Alenquer é conhecido pelos seus calcários bastante vidraços, onde o branco é a sua cor dominante, no entanto, em locais pontuais do maciço, também podem ocorrer calcários com tons mais amarelados e avermelhados.

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

Apesar de, no sítio da *Web* da DGE, apenas se mencionar a existência de uma pedreira de calcário para calçada em actividade, este núcleo conta com mais algumas pedreiras em laboração, cerca de uma dezena. À semelhança do que ocorreu com os núcleos atrás mencionados, o número de pedreiras em actividade nesta zona também já foi bem maior, tendo-se assistido a um acentuado declínio nos últimos anos.

Em analogia com a decrescente quantidade de explorações, no número de pessoal ao serviço também se tem verificado uma grande redução. Em pedreiras onde hoje trabalham 2 ou 3 pessoas, chegou a trabalhar duas ou três vezes mais pessoal, havendo mesmo explorações que acomodavam mais de 30 colaboradores e que recentemente já cessaram a actividade.

Igualmente caracterizada por pedreiras de pequena dimensão, as explorações deste núcleo encontram-se implantadas em flanco de encosta, não atingindo grande profundidade de escavação, mas alcançando, de modo geral, mais de 10 metros.

Devido a ter estado submetido a uma tectónica muito activa, deixa de ser evidente neste maciço o reconhecimento de qualquer estrato, apresentando-se mesmo numa estrutura quase caótica (Fig. 4.8). Pelo que, não havendo possibilidade de seguimento de camadas específicas, a lavra aqui empregue é pouco selectiva. Também porque, em geral, as zonas do maciço calcário onde se inserem estas pedreiras são, na sua quase totalidade, de boa qualidade para a produção de pedra de calçada, e mesmo onde ocorrem manchas de calcário de qualidade inferior, é sempre permitida a recuperação de alguma matéria-prima.

Devido à intensa tectonização a que o maciço esteve sujeito, este apresenta-se com uma estruturação bastante “emalhetada”, comportando uma elevada resistência ao arranque, o que dificulta o seu desmonte mecânico, pelo que é necessário recorrer com alguma frequência ao seu desmonte com explosivos. A totalidade da pedra de calçada que aqui se concebe é produzida manualmente. Mesmo que se optasse pela utilização de cunhas hidráulicas, as características deste calcário não permitem a utilização destes equipamentos.



Figura 4.8 – Frentes de desmonte no maciço dos “Calcários de Ota” onde é evidente o diaclasamento desta formação, não se conseguindo identificar a continuidade de qualquer camada.

### 4.5.1. Enquadramento Geográfico

O núcleo de explorações de Alenquer divide-se em duas zonas bastante próximas, uma zona encontra-se na intersecção da freguesia de Ota com a freguesia de Abrigada, com uma área de 46 e 39 km<sup>2</sup>, respectivamente, ocupando terrenos de ambas. A outra zona situa-se na freguesia

## Núcleos de Explorações de Calcário para Calçada

de Meca, com uma área de 14 km<sup>2</sup> (Município de Alenquer, 2016). Todas estas freguesias pertencem ao concelho de Alenquer, distrito de Lisboa.

Inserindo-se nas serras de Ota e de Atouguia das Cabras, que ascendem a 170 e 173 metros de altitude, respectivamente, as pedreiras de calçada surgem integralmente no maciço de Calcários de Ota (Hidroprojecto, 2000). Esta área encontra-se abrangida pelas Folhas 363 (Abrigada) e 376 (Alenquer) da Carta Militar de Portugal na escala 1:25.000 (Fig. 4.9).

### 4.5.2. Enquadramento Geológico

Em termos do seu enquadramento geológico, o Núcleo de Explorações de Alenquer encontra-se incluído nas Folhas 30 D (Alenquer) e 30 B (Bombarral) da Carta Geológica de Portugal à escala de 1:50.000.

A área das serras de Ota e de Atouguia das Cabras faz parte do extenso maciço calcário do Jurássico Superior, localizando-se entre a Bacia Terciária do Tejo a Este, por um lado, e o grande anticlinal da Serra de Montejunto, mais a Noroeste, por outro lado. Estas exposições calcárias oxfordiano-titonianas (Hidroprojecto, 2000) pertencem à extensa mancha que se inicia aproximadamente a 1 km a Norte de Alenquer, alinhada no sentido Norte – Sul, com cerca de 7 km de comprimento e uma largura máxima de 2,5 km, a Oeste de Ota, na sua extremidade Sul o afloramento tem apenas 200 a 300 m de largura (Zbyszewski *et al.*, 1965).

Apesar de Choffat considerar que esta mancha calcária alongada constitui um anticlinal dissimétrico cortado por diversas falhas (Zbyszewski *et al.*, 1965, in Ferreira, 2016), crê-se que esta estrutura se trata, provavelmente, de um *horst* soerguido (Fig. 4.10), confinado a Oeste e a Este por falhas segundo NNE – SSW, ulteriormente reactivadas, que se estende para Sul até próximo de Alenquer, com pendor suave predominante para Este a Este-Nordeste. Parece assim evidenciar um comportamento de uma estrutura em monoclinal ligeiramente ondulado (Hidroprojecto, 2000).

Os “Calcários de Ota” (J<sup>3-4</sup>), que fazem parte de uma formação recifal complexa, são relativamente homogêneos, de grão fino e claro (Paradela & Zbyszewski, 1971), cuja fácies oolítica é contemporânea do recife, o qual ter-se-ia formado na sua periferia (Hidroprojecto, 2000). Nunca se tendo observado colónias de corais em posição de vida, mas somente elementos isolados, a tipologia litológica e a fauna muito abundante são indícios bastantes para confirmar que estamos na presença de calcários bioconstruídos (biostroma) (Manuppella & Balacó Moreira, 1984).

As litologias que constituem esta formação distribuem-se por calcários micríticos, bioclásticos, calciclásticos, microbrechóides, microconglomeráticos e microcristalinos, com oólitos e oncólitos dispersos, com frequentes estruturas derivantes de bioturbação, e, ainda, calcários oolíticos e pisolíticos, com abundantes oncólitos, alternando com calcários microcristalinos (VISA Consultores, 2003).

Estes calcários, que sustentam as serras de Atouguia e de Ota, terão uma espessura superior a 250 m, visto que uma sondagem ali realizada para captação de água, chegou a esta profundidade sem atingir a base da formação. Admitindo-se que possam ter uma espessura que ascenda a cerca de 400 m (Manuppella & Balacó Moreira, 1984)



## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

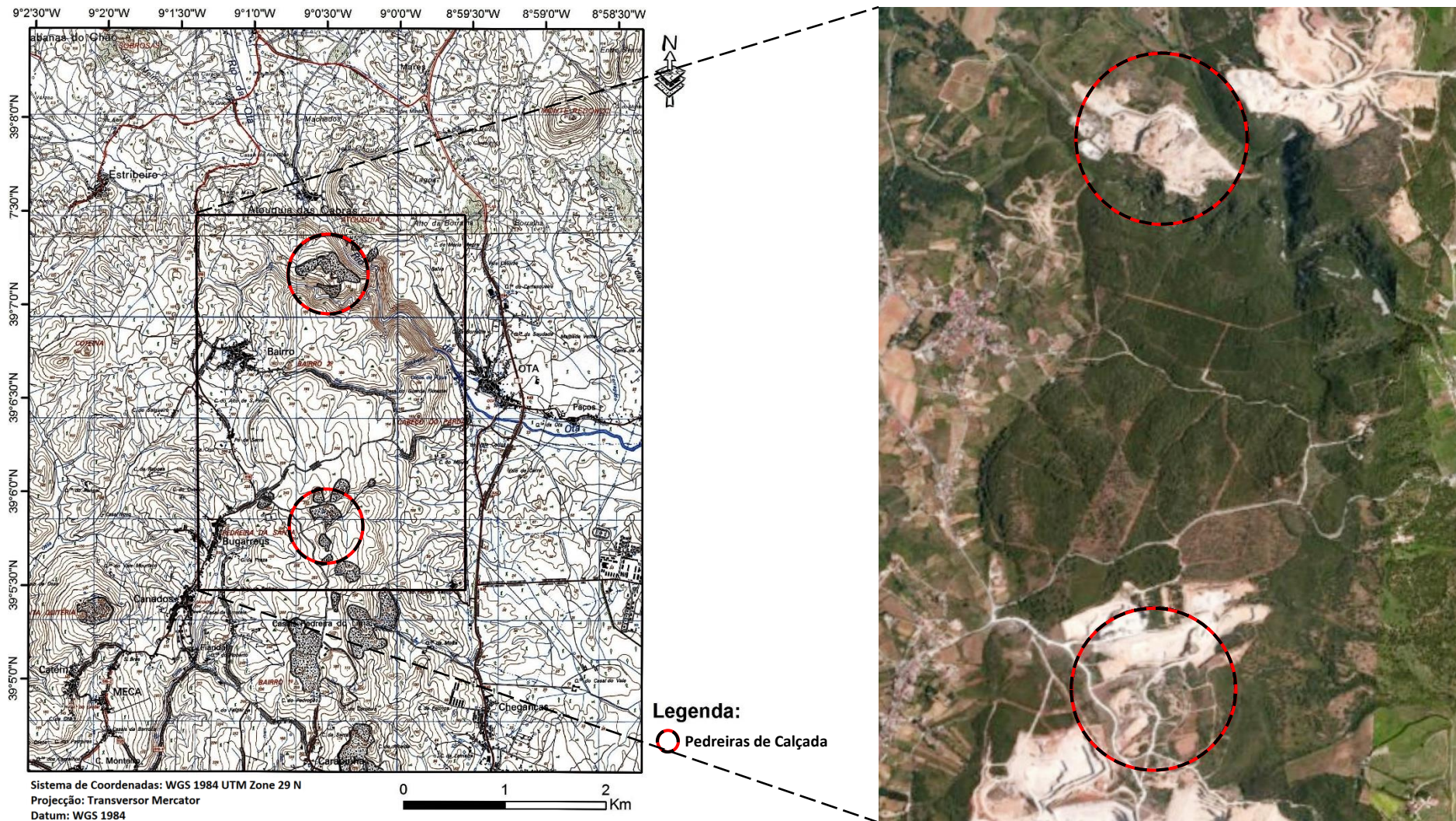


Figura 4.9 – Enquadramento geográfico das pedreiras de calçada do Núcleo de Explorações de Alenquer, nas Folhas 363 (Abrigada) e 376 (Alenquer) da Carta Militar de Portugal na escala 1:25.000.

## Núcleos de Explorações de Calcário para Calçada

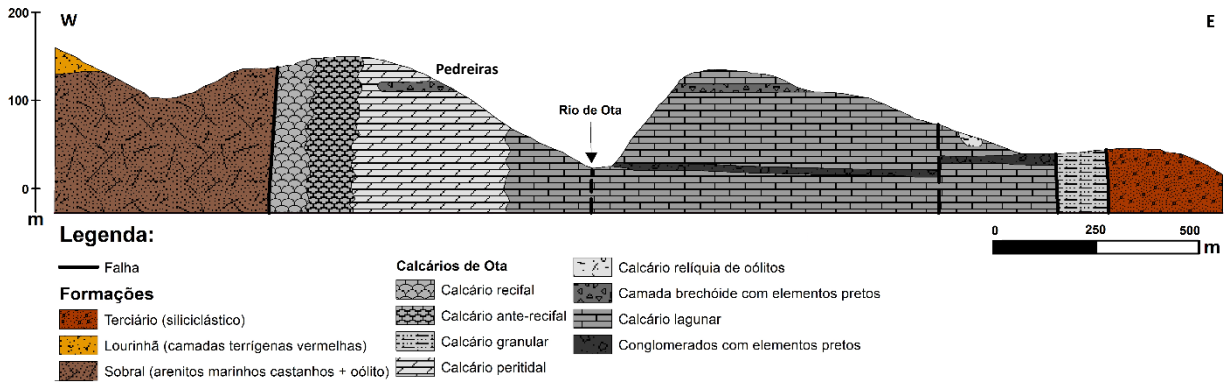


Figura 4.10 – Perfil geológico do “horst” que passa na área das pedreiras de calçada na Serra de Atougia das Cabras (adaptado de Leinfelder, 1994).

A estrutura da área onde se inserem os Calcários de Ota, entre outras litologias (Fig. 4.11), foi submetida a uma tectónica frágil muito activa, responsável pela génese de zonas de cisalhamento de orientação preferencial segundo N-S a NNE-SSW, NW-SE e NE-SW a ENE-WSW (Hidroprojecto, 2000). Quanto à datação desta formação, a associação de dasycladas (*Clypeina jurássica* e *Campellina striata*) junto com as foraminíferas (*Labyrinthina mirabilis* e *Alveosepta jaccardi*) é típica do Kimmeridgiano em Portugal (Ramalho, 1971, in Ellis *et al.*, 1990).

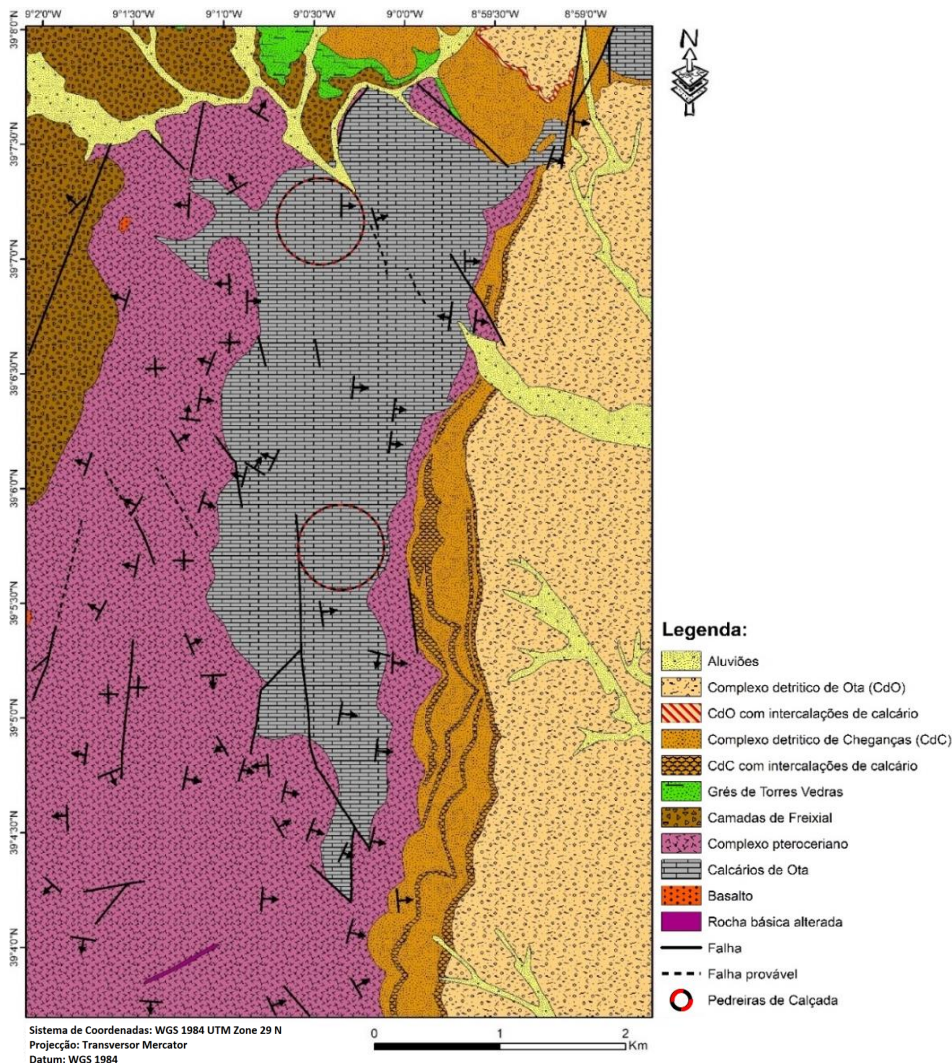


Figura 4.11 – Enquadramento geológico das pedreiras de calçada do Núcleo de Explorações de Alenquer. Adaptado das Folhas 30 D - Alenquer e 30 B - Bombarral da Carta Geológica de Portugal à escala de 1:50.000.

### Capítulo 5 – Caracterização e Certificação da Pedra Natural para a Calçada Portuguesa

Apesar de na calçada portuguesa serem relevantes os predicados de natureza estética, a escolha correcta dos tipos de calcário a utilizar numa determinada aplicação norteia-se cada vez mais por factores económicos, numa óptica de preço/durabilidade, o que torna imprescindível o conhecimento das características técnicas de cada tipo de pedra para se evitarem prescrições menos adequadas que venham a pôr em causa a vida útil do pavimento a realizar.

Tendo-se em consideração que o valor de mercado das pedras ornamentais passa de um modo geral por particularidades da sua tonalidade e textura, definidoras do respectivo padrão ornamental, também não restam dúvidas de que é fundamental a determinação das suas características físico-mecânicas que permitam definir as rochas do ponto de vista da qualidade. Avaliar a adequação de cada pedra natural às condições a que será utilizada implica a realização de estudos e ensaios laboratoriais que fornecerão elementos para a respectiva caracterização, qualificação tecnológica e dimensionamento (Pinto, 2006). Estudos estes que reflectir-se-ão favoravelmente na garantia da qualidade dos produtos e nos preços que os mercados estão dispostos a pagar por uma qualidade controlada.

A qualidade de um trabalho de calçada assenta fundamentalmente em três vertentes: (i) as características do tipo de pedra utilizada; (ii) a qualidade da produção, e; (iii) a qualidade do calcetamento. Tentando-se com este trabalho fazer-se uma caracterização de algumas variedades de pedra de calçada, cabe-nos a nós aqui fazer uma exposição da avaliação dos dois primeiros predicados.

O primeiro destes factores está ligado aos processos geológicos que conduziram à génese e posterior evolução das formações produtivas. Como todas as substâncias naturais, cada tipo de rocha raramente integra materiais de características homogéneas ao longo de todo um maciço ou, até frequentemente, apenas ao nível de cada pedreira. Pelo que será de esperar, dentro de certos limites, variações mais ou menos significativas de algumas das propriedades em cada uma das variedades exploradas.

O segundo aspecto, a qualidade da produção, diz respeito à perfeição do corte da pedra de calçada, que deverá estar assegurada pelos requisitos relativos às características geométricas. Dependendo do tipo de trabalho a realizar, a qualidade geométrica da pedra a utilizar deverá ser assegurada, pois se há trabalhos de menor exigência onde cabem a utilização de pedra de pior qualidade, existem outros onde deverá ser requerida uma maior perfeição neste atributo de modo a permitir a realização de um pavimento com a qualidade pretendida.

#### 5.1. Norma Portuguesa NP EN 1342:2014 - Caracterização de Cubos e Paralelepípedos de Pedra Natural para Pavimentos Exteriores

A avaliação e atestação da conformidade da pedra de calçada encontra-se regulamentada pela Norma Portuguesa NP EN 1342:2014 (Cubos e paralelepípedos de pedra natural para pavimentos exteriores – Requisitos e métodos de ensaio).

Esta Norma especifica os requisitos de desempenho e os métodos de ensaio correspondentes para todos os cubos e paralelepípedos de pedra natural utilizados em pavimentações exteriores e no acabamento de ruas. Estas pavimentações incluem todos os pavimentos típicos das obras rodoviárias, tais como zonas pedonais e com tráfego, praças ao ar livre e similares para serem

## Caracterização e Certificação de Pedra Natural para a Calçada Portuguesa

usadas em condições exteriores que estão expostas aos agentes de intemperismo, tais como variações de temperatura, chuva, gelo, vento, etc. (NP EN 1342:2014).

A presente Norma inclui também as disposições necessárias para avaliação e atestação da conformidade dos cubos e paralelepípedos de pedra natural para a respectiva marcação CE, assim como também compreende aspectos considerados importantes para a sua comercialização. Entenda-se por cubo e paralelepípedo como uma unidade de pedra natural obtida por corte ou fendilhamento e utilizada como material de pavimentação, no qual a largura nominal não excede duas vezes a espessura e o comprimento não excede o dobro da largura (NP EN 1342:2014).

### 5.1.1. Requisitos das Características Geométricas

Esta norma indica que devem ser declaradas as dimensões nominais dos cubos ou paralelepípedos, devendo as dimensões entre as faces ser declaradas sob a forma de uma dimensão nominal unitária ou como um intervalo de dimensões nominais mínimas e máximas (NP EN 1342:2014), como por exemplo a pedra de calçada miúda (5x7) que compreende uma dimensão dos cubos entre 5 a 7 cm de lado.

As maiores exigências nas tolerâncias admissíveis para as características geométricas vão para os produtos serrados e para os produtos que receberam acabamento superficial. Sendo a pedra de calçada tipicamente produzida em dimensões aleatórias dentro das várias gamas comerciais, as quais são definidas por um intervalo nominal (mínimo-máximo), poderá assim ser enquadrada na Classe 0, sem tolerâncias expressas na Norma, devendo as tolerâncias ser objecto de acordo entre o cliente e o produtor (Henriques *et al.*, 2009).

### 5.1.2. Amostra de Referência

Esta Norma preconiza que, por cada fornecimento, o fornecedor deverá disponibilizar ao cliente uma amostra de referência que deve ser constituída por um número adequado de cubos ou paralelepípedos de pedra natural para mostrar o aspecto geral do produto acabado. Esta amostra deverá expor a gama de variação do aspecto no que respeita à cor, ao padrão do venado, a estrutura física e ao acabamento superficial, assim como as características específicas da pedra, tais como orifícios típicos, preenchimentos cristalinos, manchas, veios cristalinos e manchas ferruginosas, devendo estas características ser consideradas como típicas da pedra, e não como defeitos e, conseqüentemente, não devem transformar-se num motivo para rejeição, a não ser que a sua concentração se torne excessiva e se perca o aspecto típico da pedra (NP EN 1342:2014).

No entanto, esta amostragem de referência não implica que se verifique uma identidade absoluta entre as amostras e o material fornecido, podendo sempre ocorrer variações naturais (NP EN 1342:2014).

Qualquer comparação entre o material fornecido e a amostra de referência deve ser efectuada colocando a amostra de referência junto das do fornecimento e observando-as de uma distância de cerca 2 metros sob condições de luminosidade natural e registando-se quaisquer diferenças visíveis nas características das pedras (NP EN 1342:2014), se considerado necessário não dever-se-á deixar de se realizar uma comparação mais pormenorizada.

### 5.1.3. Requisitos sobre as Características da Pedra

De acordo com a norma portuguesa NP EN 1342:2014 devem ser determinadas e declaradas as características essenciais de cubos e paralelepípedos de pedra natural. Para além das características essenciais a Tabela 5.1 também apresenta outras características voluntárias consideradas importantes do ponto de vista comercial, mas que não influenciam a satisfação dos requisitos fundamentais das obras em que os produtos serão utilizados.

A conformidade do produto com os requisitos da presente norma e com os desempenhos declarados das características relevantes para o uso previsto do produto, deve ser demonstrado através de:

- a) Ensaio de tipo inicial;
- b) Controlo da produção pelo produtor, incluindo a avaliação do produto.

Os ensaios do tipo inicial são necessários para determinar os valores que devem ser declarados em relação a cada propriedade, devendo ser realizados quando:

- a) A norma é aplicada pela primeira vez ou no início de produção de um novo tipo de pedra;
- b) Se verificar alterações significativas na matéria-prima, comprovada visualmente ou através de alterações significativas nos resultados do controlo da produção.

Tabela 5.1 – Características a determinar em cubos e paralelepípedos de pedra natural para pavimentos exteriores (retirado da NP EN 1342:2014).

<b>Características essenciais</b>		
<b>Característica</b>	<b>Norma</b>	<b>Resultados</b>
Resistência à compressão	NP EN 1926	Valor mínimo esperado
Resistência ao gelo-degelo	NP EN 12371	Valor médio da resistência à compressão, antes e após 56 ciclos de gelo-degelo
Resistência ao desgaste	NP EN 14175	Valor máximo esperado
Resistência ao escorregamento	NP EN 14231	Valor médio, em húmido e em seco
<b>Características recomendadas</b>		
<b>Característica</b>	<b>Norma</b>	<b>Resultados</b>
Descrição petrográfica	NP EN 12407	Descrição
Absorção de água à pressão atmosférica	NP EN 13755	Valor máximo esperado
Massa volúmica aparente e porosidade aberta	NP EN 1936	Valor médio

O produtor tem a obrigatoriedade de implementar um sistema interno de controlo de produção permanente e documentado, devendo este sistema ser adequado à dimensão de cada empresa, bem como à complexidade do processo produtivo. O controlo de produção deve consistir em procedimentos para a verificação interna da matéria-prima, do equipamento utilizado, do processo de produção e do produto final, através de inspeções e ensaios regulares, devendo os resultados obtidos demonstrar que os produtos colocados no mercado estão em conformidade com a presente norma e com os desempenhos declarados das características dos produtos, definidos com base nos ensaios do tipo inicial (Henriques *et al.*, 2009).

Sempre que sejam utilizados procedimentos de ensaio alternativos aos dos ensaios de referência, deve ser determinado a sua correlação e disponibilizada para inspeção (NP EN 1342:2014).

## 5.1.4. Cálculo dos Valores a Declarar

Em relação à forma de apresentação dos valores a obter, a presente norma especifica que, independentemente do tipo de ensaio realizado, os valores a determinar devem ser calculados e declarados segundo o seguinte formato:

Valor médio ( $\bar{x}$ ), é a média dos dados que se obtêm quando se observa uma variável sobre todos os elementos da população (Equação 5.1), que assumimos finita.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_i x_i \quad \text{Equação 5.1}$$

em que:

$x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$  - são os valores medidos;

$n$  - é o número de valores medidos.

Desvio padrão ( $S$ ), é uma medida de dispersão que mede a variabilidade dos valores à volta da média (Equação 5.2).

$$S = \pm \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad \text{Equação 5.2}$$

Coefficiente de variação ( $v$ ), utilizado para comparar a variação de conjuntos de observações que diferem da média (Equação 5.3).

$$v = \frac{S}{\bar{x}} \quad \text{Equação 5.3}$$

Valor mínimo esperado ( $E_L$ ), é o valor que corresponde ao quantil 5 % de uma distribuição logarítmica normal, para um nível de confiança de 75 % (Equação 5.4).

$$E_L = e^{(\bar{x}_{ln} - (K_s \cdot S_{ln}))} \quad \text{Equação 5.4}$$

Valor máximo esperado ( $E_H$ ) é o valor que corresponde ao quantil 95 % de uma distribuição logarítmica normal, para um nível de confiança de 75 % (Equação 5.5).

$$E_H = e^{(\bar{x}_{ln} + (K_s \cdot S_{ln}))} \quad \text{Equação 5.5}$$

em que:

$\bar{x}_{ln} = \frac{1}{n} \sum_i \ln x_i$  - é a média logarítmica;

$S_{ln} = \sqrt{\frac{\sum(\ln x_i - \bar{x}_{ln})^2}{n-1}}$  - é o desvio padrão logarítmico;

$K_s$  - é um factor quantil (Tabela 5.2) relativamente ao número de valores medidos ( $n$ ), correspondente ao quantil 5 % de uma distribuição logarítmica normal para um nível de confiança de 75 %.

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

Tabela 5.2 – Factor quantil ( $K_s$ ) relativamente ao número de valores medidos ( $n$ ), correspondente ao quantil 5 % para um nível de confiança de 75 % (adaptado da NP EN 1342:2014).

$n$	$K_s$
6	2,34
7	2,25
8	2,19
9	2,14
10	2,10
15	1,99
20	1,93

### 5.1.5. Critérios de Aceitação

Sobre o produto final deve ser definido um plano de amostragem para a realização de ensaios e os respectivos resultados devem ser registados e estarem disponíveis para inspecção. Os ensaios para verificação das características geométricas e físico-mecânicos devem ser realizados em amostras representativas das propriedades médias do lote e da sua variabilidade (NP EN 1342:2014). Na Tabela 5.3 expõem-se os critérios de conformidade para aceitação de um lote ou de uma remessa.

Para o caso de produtos não conformes deve ser especificado os procedimentos para as acções a desenvolver, tais como reprocessamento, reclassificação ou rejeição. No caso da não conformidade das características geométricas da pedra de calçada o seu reprocessamento passará, se possível, por um novo aparelhamento da pedra, já a reclassificação poderá levar a uma diminuição da classificação qualitativa da pedra de calçada com a consequente diminuição do seu valor. Caso não seja possível aplicar nenhum dos referidos procedimentos, a pedra de calçada seguirá para rejeito.

### 5.2. Marcação CE

A marcação CE surge de uma directiva europeia (Directiva 89/106/CE de 21 de Dezembro de 1988 - Produtos de Construção) que estabelece que os produtos devem estar aptos ao uso a que se destinam, por forma a garantir que as obras onde estes sejam incorporados cumpram com os requisitos essenciais da referida directiva: (i) resistência mecânica e estabilidade; (ii) segurança contra incêndios; (iii) higiene, saúde e ambiente; (iv) segurança na utilização; (v) protecção contra ruído; (vi) economia de energia e retenção de calor (Rébola, 2011).

Esta directiva dita que todos os materiais de construção, onde também se engloba a pedra de calçada, têm que ser providos de uma declaração de conformidade que tem como objectivo fornecer ao cliente um conjunto de informações sobre o produto, permitindo verificar a quem o aplica que este está conforme o objectivo da aplicação a que se destina (Castro, 2006).

Quando obtidos os requisitos mínimos necessários para caracterizar e avaliar um produto, o produtor deve elaborar uma declaração de conformidade, correspondendo a um documento que prova ao cliente que o produto que comprou cumpre todos os requisitos exigidos pela directiva “Produtos de Construção” e pela respectiva norma harmonizada do produto (Castro, 2006).

## Caracterização e Certificação de Pedra Natural para a Calçada Portuguesa

Concluídas todas as obrigações para a avaliação da conformidade da pedra de calçada (ensaios do tipo inicial e controlo de produção), cabe ao produtor realizar e conservar uma “Declaração de Conformidade CE” indicativa de que os seus produtos cumprem com os requisitos constados na norma aplicável (NP EN 1342:2014) (Henriques *et al.*, 2009).

Uma vez redigida a Declaração de Conformidade CE o produtor pode e deve apor a Marcação CE nos documentos que acompanham a sua comercialização (por exemplo, numa guia de remessa) ou transmitido por intermédio de qualquer ferramenta de comunicação (por exemplo, *e-mail*) (NP EN 1342:2014). A Marcação CE confere o direito de o produto (pedra de calçada) poder circular livremente no mercado de qualquer Estado-Membro da Comunidade Europeia, dando garantias que o mesmo foi submetido aos procedimentos de avaliação e de controlo da conformidade apropriada constantes na Directiva “Produtos de Construção” (Henriques *et al.*, 2009).

Tabela 5.3 – Critérios de conformidade para aceitação de um lote de pedra natural (adaptado do Anexo A da NP EN 1342:2014).

Característica	Verificação durante a produção	Método de ensaio	Frequência mínima de ensaio	Critérios de aceitação
Geométrica	Verificação continua de acordo com o controlo de produção	NP EN 13373	Cada lote	Dentro do intervalo de tolerância
Resistência à compressão		NP EN 1926	Cada 2 anos	Mais de 80 % dos valores individuais devem ser superiores ao valor mínimo declarado
Absorção de água		NP EN 13755		Mais de 80 % dos valores individuais devem ser inferiores ao valor máximo declarado
Massa volúmica aparente e porosidade aberta		NP EN 1936		Sem requisitos
Resistência ao gelo-degelo em condições normais		NP EN 12371	Cada 10 anos	Dentro do intervalo de tolerância para os dois valores declarados
Resistência ao desgaste		NP EN 14157		Mais de 80 % dos valores individuais devem ser inferiores ao valor máximo declarado
Resistência ao escorregamento		NP EN 14231		O valor médio deve ser maior ou igual ao valor declarado
Descrição petrográfica		NP EN 12407		Em conformidade com a descrição petrográfica declarada

### 5.3. Caracterização das Pedras em Estudo

Na sua qualidade de rochas sedimentares, os calcários ocorrem em sequências de camadas de espessura variável e susceptíveis de apresentarem variações composicionais laterais e verticais. Por este motivo as diferentes tipologias comerciais correspondem a fácies com características específicas, quer pertençam à mesma unidade geológica, quer pertençam a unidades distintas (Moura *et al.*, 2007).

Do que se leu dos capítulos anteriores constata-se que em Portugal são diversificadas as variedades de calcários utilizadas na calçada portuguesa. Sendo assim, levanta-se a



## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

necessidade de se definirem as características de cada um destes litotipos como um meio de selecção dos mais convenientes em função de cada aplicação.

A pedra de calçada, assim como todas as rochas ornamentais, pelo facto de serem aplicadas em locais com características diferentes daquelas onde foram formadas ficam sujeitas a condições agressivas, quer sejam elas naturais (variações de temperatura, exposição solar, gelo-degelo, água, etc.) ou antrópicas (desgaste, contacto com produtos de limpeza, pressão, etc.).

Para poder avaliar a aptidão de uma rocha ornamental em função do uso a que vai estar sujeita é necessário conhecer previamente as suas características petrográficas, físicas, químicas e mecânicas mais importantes (Jimeno, 1996). Torna-se assim evidente a necessidade do estudo e da descrição em detalhe de cada tipo de calcário ao nível da composição mineralógica e da textura, da microfracturação e do eventual grau de alteração de alguns minerais constituintes, no sentido de complementar e precisar as sempre importantes observações macroscópicas. De igual modo e com o objectivo de fornecer elementos que habilitem à definição da sua utilização mais adequada em obra, cabe a determinação das características físico-mecânicas mais relevantes e que os definam sob o ponto de vista da qualidade, através da execução de estudos e ensaios específicos, alguns de cariz tecnológico (Moura *et al.*, 2007).

Só deste modo se torna possível aconselhar para um determinado tipo de pedra de calçada a sua utilização mais adequada, que deverá ser aquela onde alcance o seu valor técnico, estético e comercial mais elevado, evitando-se a sua utilização em circunstâncias para as quais não é indicada.

Neste trabalho e de acordo com o estipulado na norma anteriormente mencionada procedeu-se ao estudo das características de cada calcário em análise e que permitiu ter um maior conhecimento sobre as suas propriedades, assim como a comparação destas. Para além da mera descrição petrográfica da superfície da pedra, através da descrição macroscópica, com destaque para a sua tonalidade, da análise microscópica e mineralógica, procedeu-se à determinação da composição química e execução de um determinado número de ensaios físico-mecânicos que vão para além dos mencionados na referida norma e que podem ser agrupados em duas categorias fundamentais, de acordo com a sua finalidade:

Ensaio de identificação – são aqueles que têm por objectivo determinar as características básicas das pedras naturais:

- Determinação da resistência à compressão uniaxial;
- Determinação da resistência à carga pontual;
- Determinação da dureza de Schmidt;
- Determinação da absorção de água à pressão atmosférica;
- Determinação da massa volúmica aparente e real;
- Determinação da porosidade aberta e total;
- Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade;
- Determinação da velocidade de propagação do som;
- Determinação do módulo de elasticidade dinâmico.

Ensaio de durabilidade – destinam-se à previsão do período de tempo durante o qual o elemento em pedra natural desempenhará, sem colapsos, as funções para as quais foi concebido:

- Determinação da resistência ao desgaste por abrasão;
- Determinação da resistência ao desgaste em meio aquoso (*Slake Durability Test*);
- Determinação da resistência à cristalização de sais;
- Determinação da resistência ao gelo.

## Caracterização e Certificação de Pedra Natural para a Calçada Portuguesa

A importância relativa dos ensaios físico-mecânicos no seu conjunto é função do tipo de utilização a que se destina a pedra natural, tornando-se alguns deles imprescindíveis na avaliação da aptidão de cada variedade a ser utilizada com determinada finalidade, em determinadas condições de exposição à intempérie e/ou outros agentes agressivos ou ainda quando sujeita a solicitações específicas. Em todo o caso, para pavimentos interiores muitos destes ensaios, sobretudo os que avaliam os efeitos provocados pela acção de agentes do intemperismo, deixam de ser relevantes.

Segundo Henriques *et al.* (2009) a pedra de calçada deverá obedecer a determinados requisitos que garantam um bom desempenho durante o seu tempo de vida útil em obra, pelo que podemos aqui definir alguns dos parâmetros mínimos que devem ser cumpridos pelas pedras de melhor qualidade:

Resistência à Compressão Uniaxial – as pedras de melhor qualidade deverão comportar no mínimo uma resistência de 60 MPa, sendo que na prática 1 MPa corresponde a 10 kg/cm<sup>2</sup>;

Porosidade Aberta – tem-se como valor indicativo para as pedras de melhor qualidade um máximo de 6 %;

Absorção de Água à Pressão Atmosférica – para a pedra de melhor qualidade não deverá ultrapassar 3 % do seu peso;

Resistência ao Escorregamento – é considerado seguro para pisos horizontais um valor de resistência ao escorregamento (SRV) superior a 35. Para pisos em rampa este valor deverá ser um pouco maior, cerca de 40;

Resistência ao Desgaste – tomamos como referência os valores propostos na Tabela 5.4;

Resistência ao Gelo – em termos de ciclos de gelo-degelo sem evidências de deterioração da pedra e confirmado por ensaio de compressão são considerados os números da Tabela 5.5 de acordo com a altitude das zonas exteriores em que a pedra será empregue no nosso país. Para pedra de calçada a exportar e que se destina a pavimentos exteriores em regiões afectadas pela acção do gelo, consideram-se os valores da Tabela 5.6.

### 5.3.1. Amostragem

Uma amostragem tem como objectivo a obtenção de uma amostra a granel que seja representativa das propriedades médias do lote e da sua variabilidade. Pelo que uma boa amostragem e o seu transporte de forma apropriada e cuidadosa é um pré-requisito para que um estudo possa fornecer resultados fiáveis das propriedades a determinar, devendo ser colhido um número adequado de amostras para que se possa obter uma boa estimativa da heterogeneidade natural do lote de pedra a analisar.

O número e dimensões das amostras dependem dos métodos de ensaio a que se destinam, sendo que a quantidade e formato dos provetes necessários são referidos nos métodos de ensaio aplicáveis. A recolha de amostras para a caracterização dos calcários em estudo foi realizada segundo as recomendações da norma portuguesa NP EN 1342:2014 que especifica orientações sobre os procedimentos para obtenção de amostras de pedra natural em pedreiras, unidades de transformação e obras de construção.

Não tendo este trabalho como propósito a caracterização dos maciços calcários onde surgem as pedreiras de calçada, mas sim qualificar os produtos que nelas se concebem, a maioria das amostras correspondem a cubos de pedra de calçada que foram colhidas a partir dos montes em stock nas pedreiras de cada núcleo. Apenas para os provetes de maior dimensão e que

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

exigem um maior volume das pedras, foram recolhidos blocos de calcário “traçados” que também se destinavam a ser transformados em pedra de calçada.

Tabela 5.4 – Valores propostos para a resistência ao desgaste de acordo com as características do tráfego, (adaptado de Henriques *et al.*, 2009).

Características do Tráfego		Ensaio de Desgaste	
Tráfego	Uso	Amsler (percurso 200 m)	Capon (disco de 70 mm)
Intenso (1)	Público	≤ 0,8 mm	≤ 18,0 mm
Forte (2)	Público	≤ 2,0 mm	≤ 19,5 mm
Forte a moderado (2)	Colectivo	≤ 3,5 mm	≤ 21,5 mm
Moderado	Colectivo	≤ 5,5 mm	≤ 24,5 mm
Fraco	Privado	≤ 9,5 mm	≤ 30,0 mm

(1) Inclui tráfego de veículos pesados e outros de transporte de carga

(2) Inclui circulação ocasional de veículos de emergência e de transporte de cargas

Tabela 5.5 – Número de ciclos do ensaio gelo-degelo a que deve resistir a pedra de calçada de acordo com a altitude onde será empregue em Portugal Continental, (adaptado de Henriques *et al.*, 2009).

Proposta de zonação do índice de gelo em função da altitude para Portugal Continental	Número de ciclos de ensaio de gelo-degelo a que deve resistir a pedra para calçada (prevendo o mínimo de 50 anos como vida útil do pavimento)
500 a 900 m	20 a 40 ciclos
900 a 1500 m	40 a 80 ciclos
> 1500 m	80 a 120 ciclos

Tabela 5.6 – Número de ciclos do ensaio gelo-degelo propostos para pedra de calçada a exportar para regiões afectadas pela acção do gelo, (adaptado de Henriques *et al.*, 2009).

Áreas	Número de ciclos
Fracamente gelivas (máximo de 2 dias/ano com temperaturas inferiores a -5 °C)	≥ 56 (requisito especificado na NP EN 1342:2014)
Moderadamente gelivas (3 a 10 dias/ano com temperaturas entre -5 e -10 °C)	≥ 96
Fortemente gelivas (mais de 10 dias/ano com temperaturas inferiores a -10 °C)	≥ 144 (para situações particularmente gelivas o número de ciclos deve ser especificado pelo cliente)

Também importa salientar que em cada pedreira foram recolhidas amostras em quantidade e com as propriedades que se acharam adequadamente representativas da heterogeneidade do lote em questão. Tendo-se também por cada núcleo seleccionado diversas pedreiras em diferentes locais para a recolha de amostras de modo a tornar o material da amostragem representativo do núcleo em questão, mas todas elas pertencentes à mesma formação geológica.

Dos tipos de calcários para estudo a seleccionar de cada região optou-se para o Núcleo de Explorações de Alqueidão da Serra por colher amostras de calcário negro em pedreiras pertencentes à unidade de “Camadas de Cabaços e de Montejunto”, no Núcleo de Porto de Mós-Alcanede colheram-se amostras de calcário branco em pedreiras localizadas na unidade de

## Caracterização e Certificação de Pedra Natural para a Calçada Portuguesa

“Calcários micríticos da Serra de Aire” e para o Núcleo de Alenquer foram seleccionadas também amostras de calcário branco pertencendo todas elas à unidade de “Calcários de Ota”.

Para cada núcleo de explorações de pedra de calçada foi adoptado uma sigla, uma cor e um símbolo que identifica cada calcário em questão (Tabela 5.7), de modo a facilitar a compreensão dos resultados apresentados graficamente.

Tabela 5.7 – Sigla, símbolo e cor correspondente ao calcário em estudo de cada núcleo de explorações de calcário para calçada.

Núcleo de Explorações	Sigla	Símbolo	Cor
Alqueidão da Serra	D	●	Azul
Porto de Mós - Alcanede	C	◆	Vermelho
Alenquer	A	■	Verde

### 5.3.2. Preparação dos Provetes

Dependendo do ensaio de caracterização físico-mecânica foram executados provetes de diferentes formas, todos eles obedecendo ao formato e dimensão que estava estipulado na norma por nós seguida para cada ensaio em questão, e que também serviram para a respectiva caracterização petrográfica.

Tratando-se de calcários maciços onde não é evidente qualquer orientação na sua estrutura, os provetes foram executados com uma orientação aleatória relativamente à geometria do cubo de calcário da amostragem. Note-se que mesmo que tivéssemos por objectivo nesta caracterização ter em consideração a orientação da estrutura do maciço, não era possível ter esse rigor para todos os calcários aqui estudados, uma vez que, e tal como já referido anteriormente, existem maciços que se encontram totalmente tectonizados sem ser possível determinar a sua sequência estrutural.

Correspondendo a um produto que será aplicado na concepção de um pavimento, poder-se-ia ter em consideração a sua posição em relação à direcção dos esforços a que vai estar sujeito, mas também esta orientação não é possível determinar, pois será o calceteiro que no acto de colocar e emalhetar das pedras vai decidir qual a melhor face e geometria da pedra a dar ao arranjo da calçada. Por todos estes factores considerou-se que a melhor representação que se poderia fazer deste produto seria a obtenção de provetes de forma completamente aleatória.

Os provetes cilíndricos foram obtidos por carotagem a partir de cubos de pedra de calçada. Após se obter um tarolo com 55 mm de diâmetro e comprimento variado procedeu-se ao corte dos seus topos, com auxílio de uma serra com disco diamantado, de forma a obter-se um cilindro com aproximadamente 55 mm de altura que seria igual ao seu diâmetro. De forma a obter-se uma superfície plana das faces dos provetes cilíndricos e que estas fossem paralelas entre si, e uma vez que não se dispunha de um equipamento adequado para esse processo, optou-se pela sua rectificação manualmente. Esta tarefa revelou-se bastante demorada, mas de extrema importância para a credibilidade dos resultados obtidos nos ensaios.

Os provetes prismáticos foram realizados por corte mecânico tanto a partir dos cubos de pedra de calçada como dos blocos de calcário, tendo-se para isso utilizado serras com disco diamantado.

### Capítulo 6 – Caracterização Petrográfica

A caracterização petrográfica de uma rocha ornamental tem como finalidade a sua descrição em termos de estrutura, textura, composição mineralógica, classificação petrográfica, assim como evidenciar todas as características que poderão influenciar o respectivo comportamento mecânico, a sua durabilidade e inevitavelmente o valor estético de cada rocha.

A caracterização dos calcários fez-se com recurso a exame macroscópico, completado com a determinação dos índices colorimétricos, e microscópico, tendo sido complementada com a análise mineralógica por difracção de raios-X e da composição química, por fluorescência de raios-X. Esta descrição petrográfica foi realizada segundo a norma portuguesa NP EN 12407:2008, que vem especificada na já referida NP EN 1342:2014 como a norma a seguir.

#### 6.1. Estudo Macroscópico

O estudo macroscópico dos calcários teve como propósito avaliar algumas características peculiares e fundamentais das rochas à vista desarmada, tais como a cor, forma e tamanho dos cristais, aspecto geral da textura e do padrão ornamental, etc., que fornecem indicações de grande significado prático, uma vez que o aspecto visual de uma rocha é por parte do utilizador um factor determinante para a sua selecção, muitas vezes em detrimento das suas características físico-mecânicas.

A análise macroscópica de cada calcário em estudo fez-se a partir dos cubos de pedra de calçada que foram colhidos na amostragem, as superfícies de observação correspondem a faces obtidas por fendilhamento (corte por percussão), iguais às superfícies que as pedras da calçada apresentam, não deixando, no entanto, de se observar as superfícies dos provetes que eram obtidas por corte com a serra diamantada. O método de observação utilizado foi a simples visualização à vista desarmada e quando necessário recorreu-se ao auxílio de uma lupa monocular.

De um modo geral, os calcários em estudo apresentam-se com uma estrutura compacta de textura bastante homogénea e matriz muito fina, composta essencialmente por calcite micrítica, caracterizando-se por calcários microcristalinos com presença de material aloquímico. No seio da matriz surgem pontuações e lineações de calcite esparítica que no caso das pontuações correspondem a zonas espatizadas da matriz micrítica ou de fragmentos de fósseis (bioclastos), já as lineações parecem ser acomodações de calcite espática a preencher fissuras. Nestes calcários também é comum surgirem fósseis, oólitos e pelóides, embora mais evidente nuns que noutros.

##### 6.1.1. Calcário do Tipo A

As amostras analisadas referentes ao calcário do tipo A correspondem a um calcário compacto, maciço, apresentando uma boa coesão e uma superfície após clivagem bastante lisa (calcário vidro) com uma textura cristalina. Macroscopicamente não apresentam porosidade observável, apenas se verifica a existência de veios de espessura milimétrica, por vezes um pouco mais espessos, que se encontram preenchidos por calcite, cristais estes que também se tornam abundantes em pequenas pontuações ou nódulos dispersos pela matriz (Fig. 6.1).

## Caracterização Petrográfica

A matriz apresenta cor branca com uma leve tonalidade acinzentada, suportando alguns bioclastos e oólitos, que por vezes já correspondem a pisólitos. Dentro do conteúdo fossilífero que foi possível observar destaca-se a presença de fragmentos de conchas de bivalves e gastrópodes, totalmente recristalizados por cristais de calcite. Na Figura 6.2 partilham-se algumas imagens do conteúdo aloquímico que foram recolhidas a partir de pedras de calçada analisadas na caracterização deste calcário. De referir que tais elementos presentes nestes calcários são um critério a ter em apreço por constituírem um elemento de elevada qualidade estética e que lhes acrescentam grande valor científico, didático e económico.

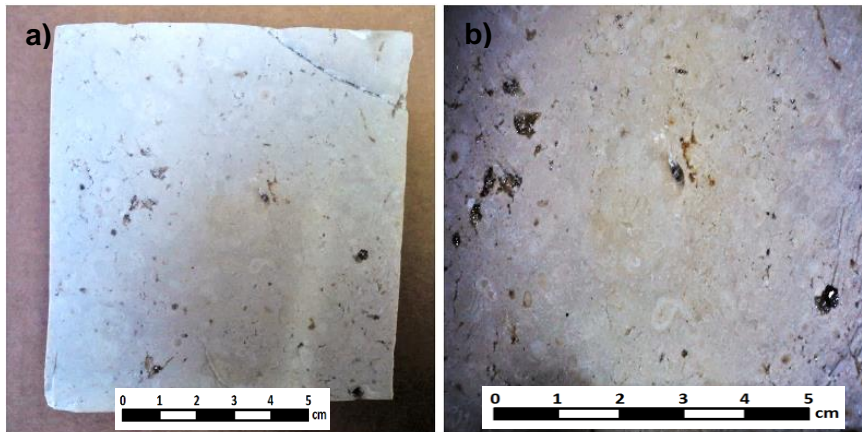


Figura 6.1 – Pedra de calçada do calcário do tipo A: a) aspecto da sua superfície obtida por fendilhamento; b) pormenor da sua textura.

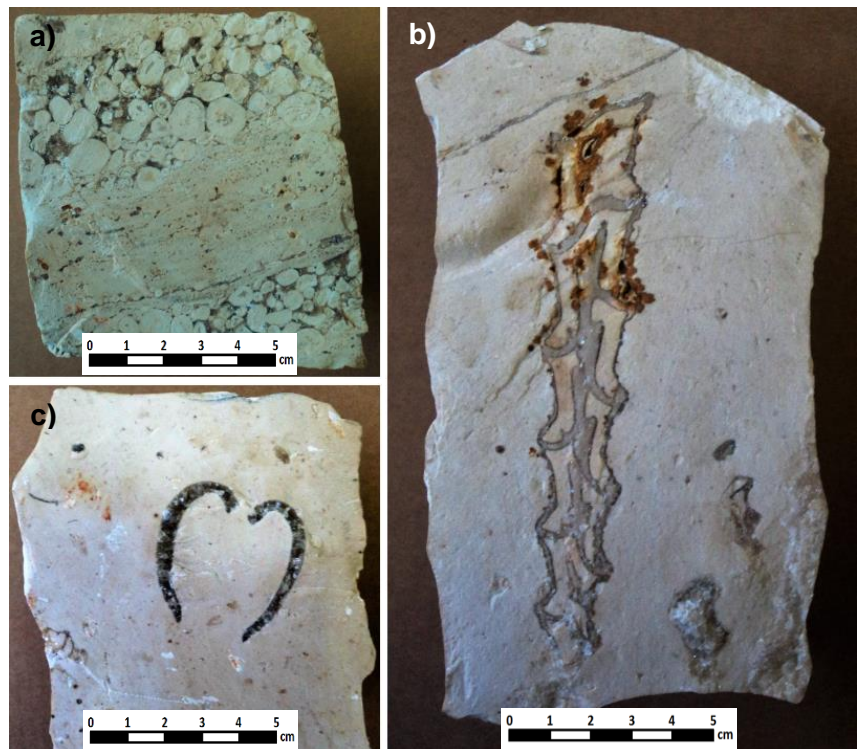


Figura 6.2 – Componentes aloquímicos no calcário do tipo A: a) oólitos e pisólitos; b) gastrópode; c) bivalve.

### 6.1.2. Calcário do Tipo C

O calcário do tipo C apresenta cor branca que por vezes e em certos estratos pode ocorrer com uma leve tonalidade bege a azulada. Corresponde a um calcário compacto com uma estrutura

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

homogénea e textura cristalina. A superfície após clivagem também se apresenta lisa, mas um pouco mais rugosa ao tacto que a do tipo A.

Nestes calcários surgem igualmente alguns filonetes de calcite, embora seja pouco abundante. Também nestas rochas é visível a presença de algum conteúdo aloquímico, nomeadamente oólitos, pisólitos, restos de conchas, gastrópodes, etc., podendo-se observar na Figura 6.3 algumas particularidades petrográficas que caracterizam este calcário.

### 6.1.3. Calcário do Tipo D

Relativamente à análise macroscópica do calcário do tipo D este apresenta-se com uma coloração cinzenta-escura a negra, igualmente homogéneos e com uma estrutura maciça (Fig. 6.4). São bastante visíveis as pontuações de sulfuretos metálicos, de dimensão aleatória, mas de tamanho inferior a 10 milímetros, mais abundantes nuns que noutros.

Também são observáveis laivos de calcite espática de cor clara e que pode corresponder a restos de fósseis ou a microfissuras preenchidas por calcite. Em todas as observações macroscópicas realizadas neste tipo de calcário não foram identificados quaisquer fósseis. De referir ainda que aquando do corte dos provetes na serra de corte era visível óleo em suspensão na água, originário desta pedra.

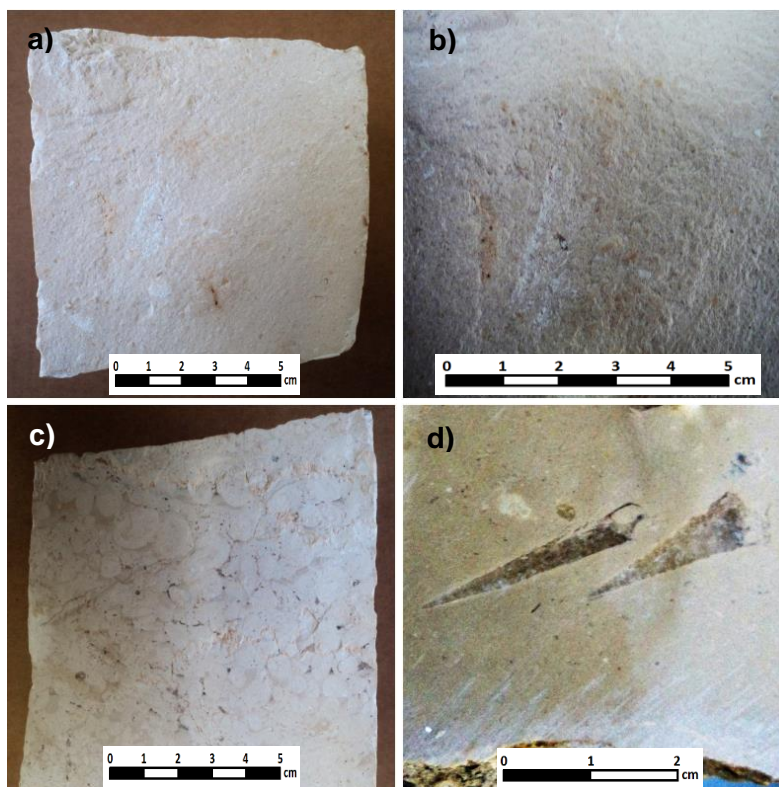


Figura 6.3 – Pedra de calçada do calcário do tipo C: a) aspecto da sua superfície obtida por fendilhamento; b) pormenor da sua textura; c) oólitos e pisólitos; d) gastrópodes.

## 6.2. Caracterização Colorimétrica

A cor é a propriedade de percepção visual correspondendo nos humanos às categorias denominadas vermelho, amarelo, verde, azul, etc., que deriva da interação do espectro luminoso

## Caracterização Petrográfica

com o olho e depende da sensibilidade espectral dos receptores de luz (Nassau, 1983, in Souza et al., 2008).

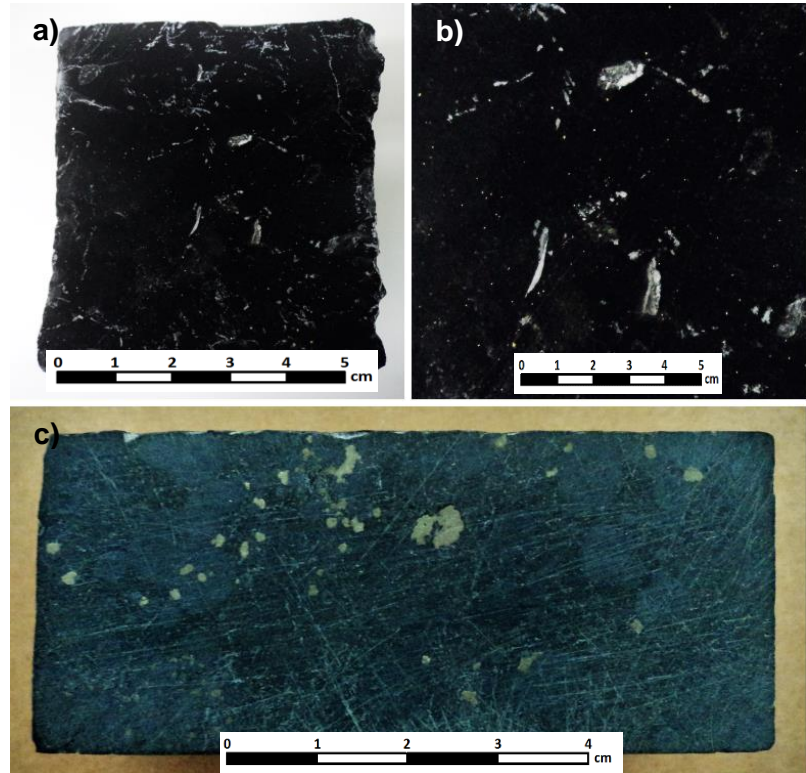


Figura 6.4 – Pedra de calçada do calcário do tipo D: a) aspecto da sua superfície obtida por fendilhamento; b) pormenor da sua textura; c) cristais de pirite.

A radiação eletromagnética é caracterizada pelo seu comprimento de onda (ou frequência) e pela sua intensidade, pelo que quando os comprimentos de onda estão dentro do espectro visível são percebidos pela visão humana, que se refere a um intervalo de comprimentos das ondas eletromagnéticas entre 400 e 700 nm (Petter, 2003, in Souza *et al.*, 2008).

Na colorimetria quantitativa, a discriminação de uma dada cor é feita com base na sua luminosidade, que varia numa escala relativa entre o branco e negro, e na proporção das três cores ou estímulos primários que a compõem. Pelo que os dados assim obtidos podem ser utilizados no cálculo de diferentes parâmetros, os quais permitem a preparação de diferentes diagramas (Figueiredo *et al.*, 2004).

O diagrama mais utilizado e que foi empregue neste trabalho é o sistema colorimétrico tridimensional,  $L^* a^* b^*$  desenvolvido pela CIE (Comissão Internacional de Iluminação) em que se tem um sólido de cor em forma de elipsoide, correspondendo o eixo maior ao parâmetro  $L^*$  (eixo vertical do espaço  $L^* a^* b^*$ ) que representa a luminosidade/claridade, enquanto  $a^*$  e  $b^*$  definem conjuntamente o diagrama de cromaticidade e relacionam-se com o tom e a croma (saturação), podendo considerar-se como os dois eixos principais de cor (eixos ortogonais entre si do espaço  $L^* a^* b^*$ ) (Gomes, 2008).

Neste diagrama, o cromatismo é uniforme, permitindo detectar diferenças de cor com a mesma sensibilidade em toda a gama de tons. Os respectivos parâmetros colorimétricos que quantificam a cor no sistema CIE  $L^* a^* b^*$  têm a seguinte representação (Ikematsu, 2007):

$L^*$  - mede a luminosidade e assume valores entre o 0 % (preto) e 100 % (branco);

$a^*$  - mede a tendência verde-vermelho que varia entre -60 (verde) e +60 (vermelho);

$b^*$  - mede a tendência azul-amarelo que varia entre -60 (azul) e +60 (amarelo).



## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

A cor dos materiais distingue-se pela forma, tamanho, posição, ou brilho que vai depender da composição espectral da luz incidente, das características do objecto (intensidade de reflectância ou de transmitância), da percepção do observador, do iluminante e da geometria óptica de visualização (Gomes, 2008), assim como do meio em que as radiações luminosas podem ser absorvidas, filtradas, reflectidas, refractadas ou interferir entre si (Figueiredo *et al.*, 2004).

A coloração das pedras naturais é um fenómeno complexo, onde o próprio granulado da rocha pode ter importância, na medida em que, segundo Soares (1966) e Chilingar *et al.* (1967), os sedimentos finos tendem para cores escuras e, segundo Esbert *et al.* (1997), cores mais homogêneas. A cor das rochas depende, pois, das suas características petrográficas, isto é, da sua composição química e mineralógica, textura e estrutura (Figueiredo *et al.*, 2004).

Deste modo, aquando da determinação da cor das pedras naturais, deve ser controlado as variações de iluminação e de humidade a que estas podem estar sujeitas (Esbert *et al.*, 1997, in Figueiredo *et al.*, 2004). Um outro factor importante que também tem influência sobre a cor exibida pela rocha, é o tipo de acabamento das superfícies (Figueiredo *et al.*, 2004).

A análise colorimétrica pode ser realizada com espectrofotómetros, que são equipamentos que medem a diferença de energia radiante entre cada comprimento de onda incidente e o comprimento de onda reflectido por um dado objecto, em que as curvas espectrais de reflectância de cada medição permitem o cálculo dos três parâmetros do sistema CIE  $L^*a^*b^*$ .

Avaliando-se o desvio padrão ( $S$ ) e o coeficiente de variação ( $v$ ) dos resultados obtidos é possível definir o grau de variabilidade dos índices colorimétricos e indirectamente a homogeneidade cromática e textural da rocha analisada (Souza *et al.*, 2008).

### 6.2.1. Metodologia Utilizada

A cor dos calcários em estudo foi determinada com recurso a um espectrofotómetro portátil CM-700d de marca Konica Minolta utilizando-se uma abertura de medição com um diâmetro de 8 mm. Este equipamento permite definir o tipo de observador e o iluminante a usar, tendo-se optado pelo iluminante normalizado D65 que é o que melhor reproduz as condições médias de iluminação diurna. A faixa de comprimento de onda observado varia entre 400 e 700 nm com um intervalo de comprimento de onda de 10 nm.

Para a determinação da colorimetria de cada calcário em estudo foram utilizadas as superfícies originais das pedras de calçada, as quais são obtidas por fendilhamento. Nestas superfícies foram realizadas medições (Fig. 6.5) em quantidade suficiente para se obter uma média regularizada dos índices  $L^* a^* b^*$  e de reflectância, de modo a estabelecer-se a cromaticidade média para as rochas ensaiadas.



Figura 6.5 – Procedimento e equipamento utilizado na caracterização colorimétrica dos calcários em estudo.

## Caracterização Petrográfica

Em cada provete e de forma aleatória foram realizadas entre 2 a 4 determinações dos parâmetros colorimétricos, dependendo das áreas que se adequavam a tal, tendo-se sempre o cuidado de que a abertura de medição do equipamento ficasse totalmente apoiada na superfície do provete de modo a não haver qualquer interferência com fontes de iluminação exteriores. De referir que antes da realização deste procedimento, os provetes foram previamente lavados e secos.

### 6.2.2. Resultados Obtidos

A média dos valores das curvas espectrais resultantes das medições realizadas nos provetes ensaiados (ANEXO I – Curvas Espectrais) são apresentados no Gráfico 6.1 indicando assim o comportamento cromático de cada calcário e o seu grau de uniformidade textural.

A cromaticidade dos calcários foi estabelecida com o valor médio ( $\bar{x}$ ) dos índices colorimétricos medidos no sistema CIE L\*a\*b\* e que resultaram das medições realizadas nas amostras de cada um (ANEXO II – Índices Colorimétricos). O valor médio obtido para cada calcário encontra-se representado no Gráfico 6.2.

Do que se consegue analisar dos parâmetros determinados pode-se constatar que o calcário do tipo A apresenta-se bastante homogêneo, com baixo coeficiente de variação dos índices colorimétricos, indicador de reduzida diversidade mineral. A cor deste calcário corresponde a um cinzento bastante claro, quase branco. O calcário do tipo C é muito idêntico ao A, mas com uma variação dos seus índices colorimétricos ligeiramente mais elevada que o anterior.

Já o calcário do tipo D apresenta-se relativamente homogêneo com um elevado coeficiente de variação dos parâmetros a\* e b\*, indicando uma maior complexidade cromática, o que também poderá ser indicativo de uma maior diversidade mineral. Este calcário ostenta um cinzento-escuro quase negro.

Com os parâmetros aqui determinados estabeleceu-se uma padronização do comportamento cromático médio de cada calcário analisado, o que permitirá futuramente comparar com outros lotes destas mesmas pedras, assim como quantificar nos respectivos pavimentos o grau de variação cromática e estética destas rochas quando submetidas a processos de alteração física e/ou química, bem como, após a aplicação de produtos impermeabilizantes ou reforçadores de sua resistência.

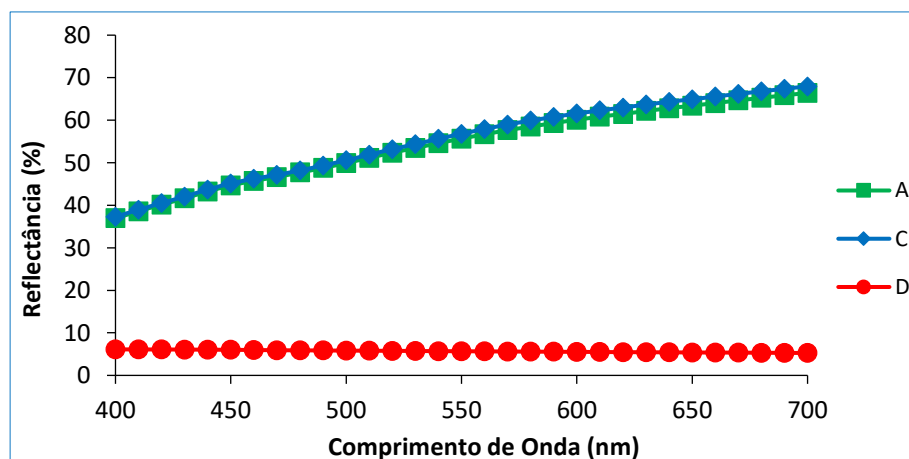


Gráfico 6.1 – Curvas espectrais dos valores médios do conjunto das medições realizadas para cada tipo de calcário.

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

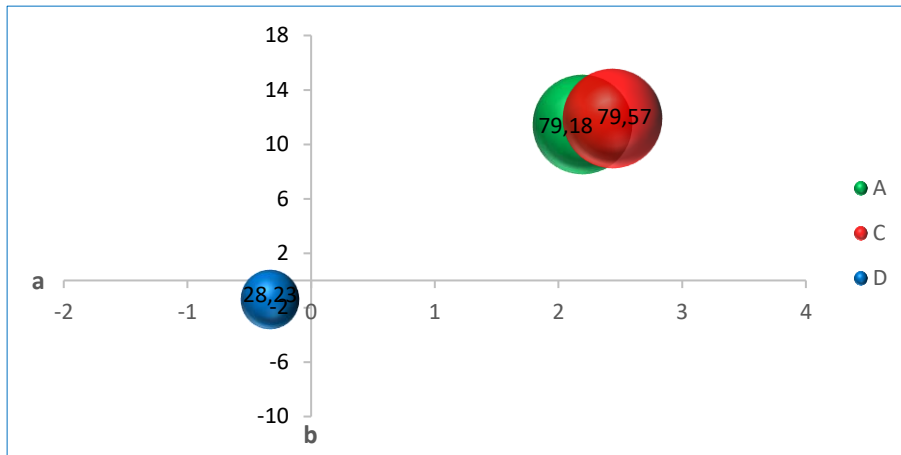


Gráfico 6.2 – Projecção dos valores médios de  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  das amostras de cada calcário, o volume das esferas corresponde ao valor do índice  $L^*$ .

### 6.3. Estudo Microscópico

O estudo microscópico das rochas consistiu na observação e análise de lâminas delgadas das rochas em questão através de um microscópio (Nikon) de luz transmitida. Para cada rocha foi efectuada uma lâmina delgada, no Laboratório de Petrologia (Lâminas Delgadas) do Departamento de Geologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Estes calcários foram classificados segundo as classificações de Folk (1959) e de Dunham (1962), in Suguio (2003). A classificação de Folk estabelece uma classificação prática baseada nas proporções relativas de três membros extremos: (i) aloquímicos; (ii) matriz de calcite microcristalina e; (iii) cimento de calcite espática. Depois desta subdivisão dos calcários em três tipos principais (aliquímicos espáticos, aloquímicos microcristalinos e microcristalinos), há que fazer a distinção da componente aloquímica. A classificação de Dunham estabelece uma distinção fundamental entre os carbonatos consoante as características hidrodinâmicas dos ambientes de sedimentação (Suguio, 2003).

As análises e conclusões das lâminas são descritas em seguida, assim como algumas fotografias das características mais importantes, tendo estas sido tiradas com o equipamento fotográfico acoplado ao microscópio.

#### 6.3.1. Calcário do Tipo A

O calcário A corresponde a uma rocha de textura cristalina de grão fino, a matriz é composta por calcite microcristalina de cor acastanhada e translúcida ao microscópio óptico, designando-se por micrite, onde também surge calcite esparítica apenas a preencher descontinuidades e componentes aloquímicos (Fig. 6.6).

Dispersos na matriz e correspondendo aos componentes aloquímicos existem oólitos, *pellets* e inúmeros bioclastos, sendo os mais comuns os restos de bivalves, com forma alongada e encurvada, e os gastrópodes. As estruturas orgânicas dos fragmentos fossilíferos dos vários géneros encontram-se apagadas devido à recristalização que sofreram.

Segundo adaptação à classificação de Folk (1959) este calcário corresponde a um *Pelbiomicrito*, pela classificação de Dunham (1962) podemos defini-lo como um *Wackestone*.

## Caracterização Petrográfica

### 6.3.2. Calcário do Tipo C

O calcário do tipo C é formado predominantemente por precipitação química e que também comporta vestígios de algum material aloquímico (*pellets*, bioclastos, oólitos), possuindo uma matriz micrítica onde por vezes se torna abundante a calcite espática (Fig. 6.7) a preencher poros, discontinuidades e bioclastos.

Pela classificação de Dunham (1961) estamos na presença de um *Wackstone*, segundo a adaptação à classificação de Folk (1959) podemos definir este calcário como um *Pelbiomicrito*esparite.

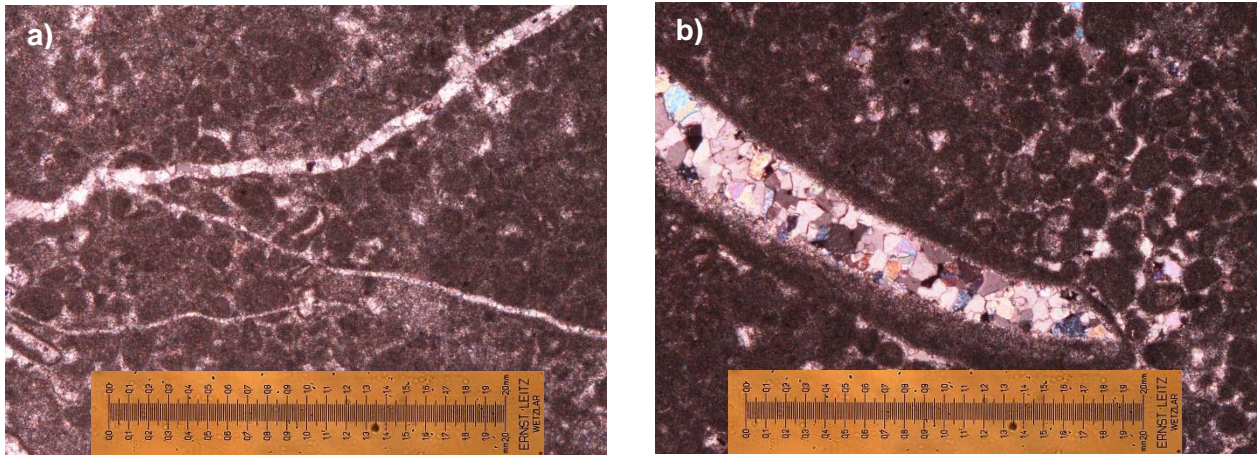


Figura 6.6 – Fotomicrografias do calcário A em nicóis cruzados e ampliadas 4x: a) matriz constituída por pelóides e alguns oólitos onde se observa filonetes preenchidos por cristais de calcite (esparite); b) fragmento fóssil preenchido por calcite espática.

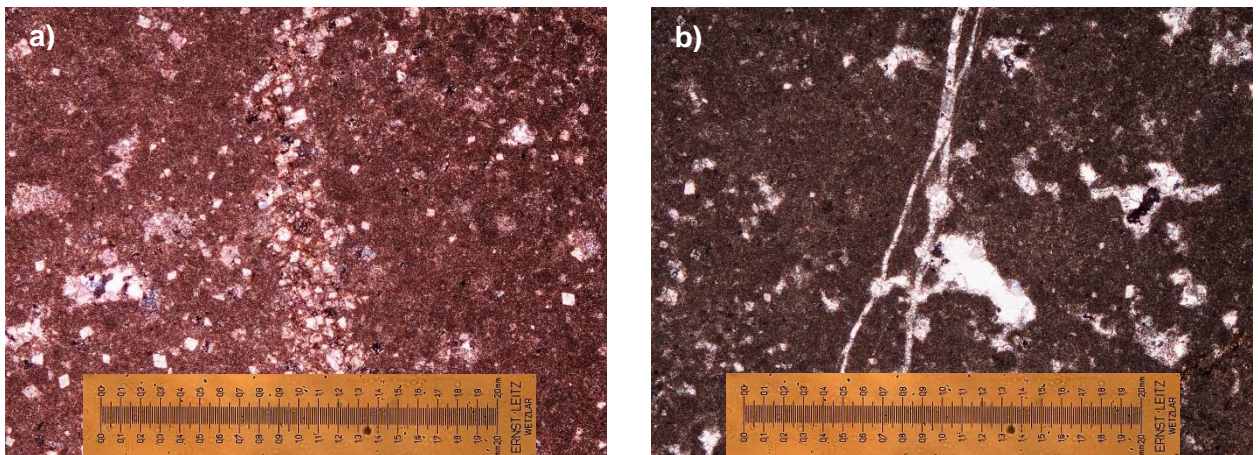


Figura 6.7 – Fotomicrografias do calcário C em nicóis cruzados e ampliadas 4x: a) matriz micrítica onde surge simultaneamente cimento de calcite espática; b) nódulos de cristais de calcite que também preenchem os veios.

### 6.3.3. Calcário do Tipo D

O calcário do tipo D é formado de precipitação química e também contém algum material aloquímico. Esta pedra ajusta-se a um biomicrito parcialmente espatizado, onde surgem

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

abundantes opacos que corresponde a sulfuretos metálicos e matéria carbonosa, no qual também é observável uma certa orientação destes, que provavelmente foi consequência do metamorfismo de contacto (Fig. 6.8).

Em adaptação à classificação de Folk (1958) pode-se definir este calcário como um *Biomicrosparite*, segundo Dunham (1961) estamos na presença de um *Wackstone*.

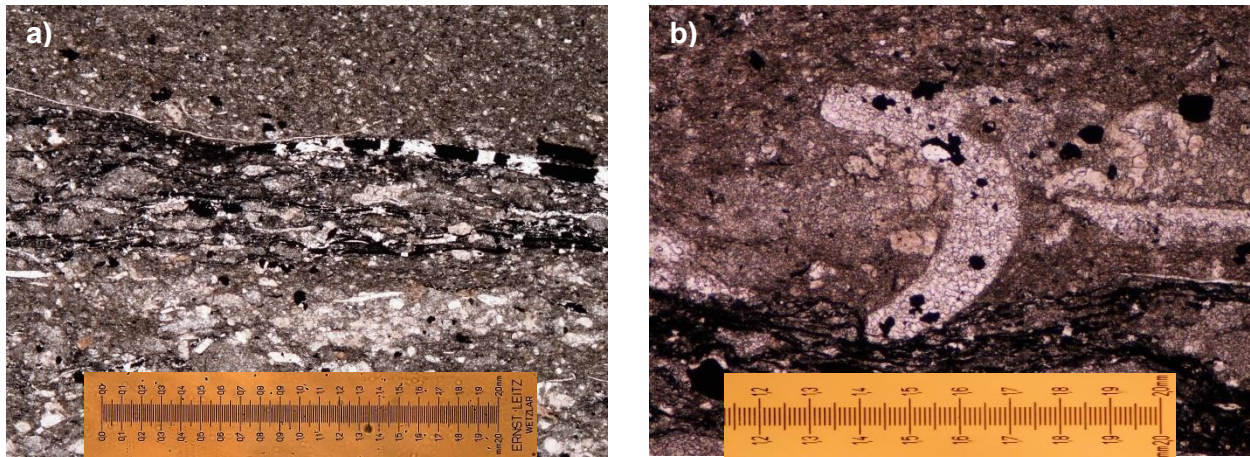


Figura 6.8 – Fotomicrografias do calcário D em nicóis cruzados: a) matriz micrítica onde há abundância de calcite espática e opacos que também surgem a preencher veios, notando-se ainda uma certa orientação de bandas de minerais (ampliação 4x); b) fragmento fóssil preenchido por calcite espática (ampliação 10x).

### 6.4. Caracterização Mineralógica por Difracção de Raio-X

De modo a complementar a informação obtida com as observações microscópicas também se procedeu à análise quantitativa e qualitativa dos compostos cristalinos que estruturam cada calcário, utilizando-se a difracção de raios X, onde se evidenciam os principais elementos constituintes. Este é um método que permite a identificação das fases cristalinas presentes num material, desde que se conheça a composição aproximada do mesmo e por comparação entre fichas cristalográficas de referência de materiais puros com o difractograma obtido.

#### 6.4.1. Metodologia Utilizada

Para a realização do estudo da composição mineralógica por difracção de raios X foi utilizado o método da amostra total em pó, onde se procedeu à moagem de vários fragmentos representativos de cada calcário. Esta moagem foi realizada num moinho de anéis, sendo o material posteriormente crivado de modo a obter-se um pó com calibre a 180  $\mu\text{m}$ . Da totalidade do pó obtido e depois de devidamente homogeneizado e esquarterado, retirou-se uma pequena fracção que foi encaminhada para o laboratório de análise de raios X.

A composição mineralógica foi determinada com recurso a um equipamento de modelo Philips Analytical X-Ray B. V. – PW3710 Based, com gerador de tensão de 40 kV, onde foi utilizado um ânodo em cobre (Cu) e varrimento de  $2\theta$  entre  $2,01^\circ$  e  $59,99^\circ$  com um passo de  $0,02^\circ$ .

### 6.4.2. Resultados Obtidos

Através dos difractogramas obtidos (Gráficos 6.3, 6.4 e 6.5) e por comparação com fichas cristalográficas de referência de materiais puros, foi possível identificar a composição cristalina de cada calcário.

Para o calcário A verifica-se uma quase generalidade dos picos da calcite, nos quais surge um de maior intensidade em  $2\theta = 29,48$ , à ainda a referir um possível vestígio de quartzo que surge no pico  $2\theta = 26,59$  e de minerais argilosos que estão representados por umas muito ligeiras bossas que surgem na parte inicial do gráfico.

O calcário do tipo C é muito semelhante ao A, em que os picos que apresenta correspondem na sua quase totalidade a picos da calcite, com um pico de grande intensidade em  $2\theta = 29,41$ , também se podem observar vestígios de quartzo em  $2\theta = 26,56$  e minerais argiloso nas bossas que surgem na parte inicial do gráfico.

O calcário do tipo D apresenta-se com uma composição um pouco mais diversificada que os calcários A e C, surge igualmente o predomínio dos picos de calcite, embora de menor intensidade, sendo igualmente o pico  $2\theta = 29,49$  como o pico mais intenso. Neste difractograma são ainda visíveis alguns sulfuretos, num pequeno pico em  $2\theta = 40,84$  e que corresponde à pirite, e outro em  $2\theta = 34,21$  que se ajusta à calcopirite, para além das evidentes bossas de minerais de argila na parte inicial do gráfico.

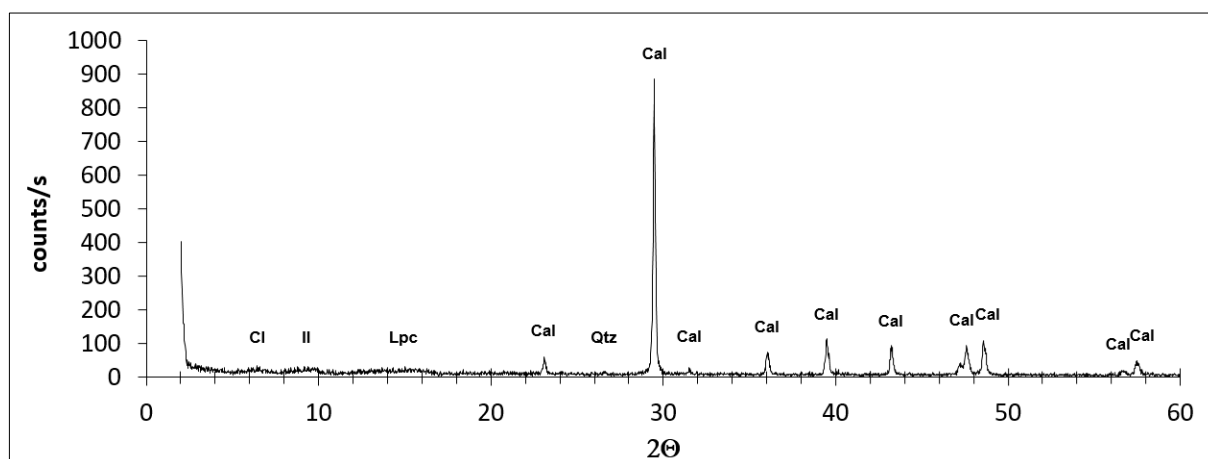


Gráfico 6.3 – Difractograma obtido para o calcário do tipo A. Legenda: Cal – calcite; Qtz – quartzo; Cl – clorite; Il – ilite; Lpc – lepidocrocite.

### 6.5. Determinação da Composição Química

Segundo Sossai (2006) o conhecimento da composição química de uma pedra natural serve para destacar a presença de alguns compostos, mesmo em pequena quantidade, que podem afectar a durabilidade da rocha num determinado meio e identificar os elementos que mais facilmente contribuem para a alteração da rocha por reacção química.

No sentido de se conseguir uma caracterização da composição química dos calcários em estudo, ainda que de uma maneira genérica, foram efectuadas análises elementares por espectrometria de fluorescência de raios-X. Esta técnica possibilita determinar de uma forma

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

quantitativa e qualitativa os elementos químicos, permitindo estimar a proporção em que cada elemento se encontra presente.

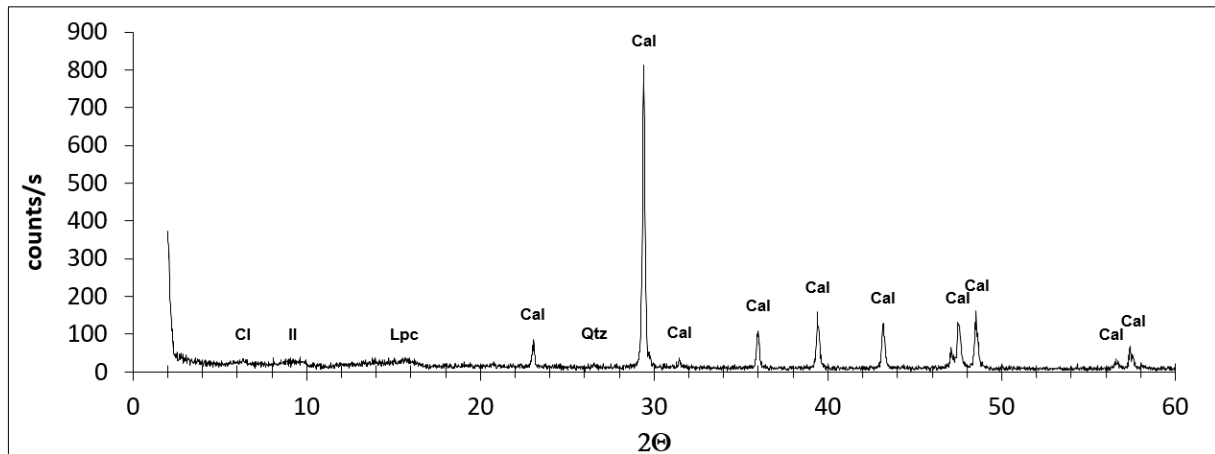


Gráfico 6.4 – Difractograma obtido para o calcário do tipo C. Legenda: Cal – calcite; Qtz – quartzo; Cl – clorite; Il – ilite; Lpc – lepidocrocite.

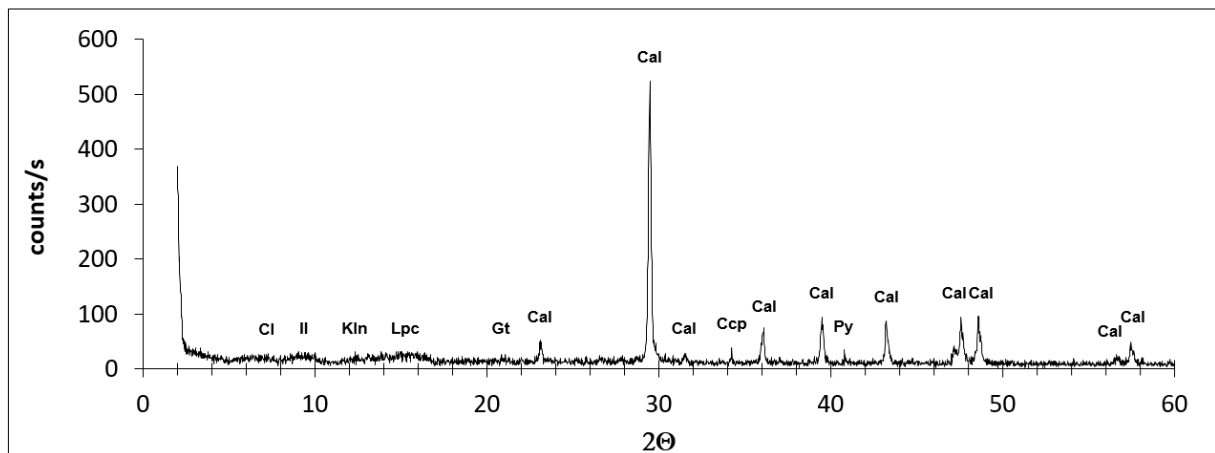


Gráfico 6.5 – Difractograma obtido para o calcário do tipo D. Legenda: Cal – calcite; Qtz – quartzo; Cl – clorite; Il – ilite; Lpc – lepidocrocite; Kln – caulinite; Gt – goethite; Py – pirite; Ccp – calcopirite.

### 6.5.1. Metodologia Utilizada

Para a determinação da composição química dos calcários em estudo foi utilizado um espectrómetro de fluorescência de raios X portátil da Niton, modelo Thermo Scientific Niton XL3t XRF com tecnologia GOLDD+, com uma superfície de medição de 8 mm de diâmetro. Segundo Ferreira (2015), este aparelho funciona através dos princípios espectroscópicos de comprimento de onda dispersivo, semelhante a uma microsonda eletrônica. Este equipamento estava ligado a um computador para a leitura automática e imediata dos dados, sendo depois possível a sua exportação em ficheiro excel.

Este método de análise foi executado sob as superfícies fendilhadas e serradas de amostras de cada calcário (Fig. 6.9), tendo-se utilizado 6 provetes para cada calcário nos quais foram realizadas 4 leituras em cada um deles, de modo a determinar-se a sua composição média.

## Caracterização Petrográfica



Figura 6.9 – Procedimento e equipamentos utilizados na determinação da composição química dos calcários em estudo.

### 6.5.2. Resultados Obtidos

A análise de fluorescência de raios X permitiu avaliar a concentração de 43 elementos químicos nas diferentes amostras de cada calcário. Os valores obtidos não correspondem a um total de medida próximo de 100 % devido à incapacidade do equipamento em analisar alguns elementos leves. Embora fosse tido em atenção, não se considerou que este facto fosse impeditivo da análise dos calcários porque este trabalho tem apenas intenções comparativas.

Após a observação dos resultados, optou-se apenas por considerar os elementos maiores e que surgiram na maioria das medições, sendo estes expressos em percentagens ponderais sob a forma de óxidos (Tabela 6.1).

Dos valores obtidos podemos concluir que os calcários A e C são quimicamente muito semelhantes sendo quase totalmente constituídos por óxido de cálcio (CaO) e um pouco de sílica (SiO<sub>2</sub>). Já o calcário D apresenta-se um pouco mais dissemelhante, onde para além do predomínio do óxido de cálcio como nos anteriores (mas em menor quantidade), surge com uma maior concentração em quase todos os outros elementos, aos quais acresce a alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), o óxido de manganês (MnO) e óxido de estrôncio (SrO). O elevado conteúdo nestes óxidos, com destaque para a sílica, a alumina e óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), poderá estar relacionado com o carácter mais margoso deste calcário e com o metamorfismo de contacto que o terá afectado.

Tabela 6.1 – Composição química dos calcários.

Óxido (%)	Calcário		
	A	C	D
CaO	49,53	49,55	40,68
SiO <sub>2</sub>	0,61	0,46	7,56
K <sub>2</sub> O	0,14	0,15	1,60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,09	0,09	2,28
BaO	0,04	0,04	0,05
TiO <sub>2</sub>	0,03	0,03	0,08
SO <sub>3</sub>	0,08	0,12	1,13
Cl <sub>2</sub> O	0,04	0,08	0,04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	4,97
MnO	-	-	0,04
SrO	-	-	0,95



### Capítulo 7 – Caracterização Físico-Mecânica

A caracterização físico-mecânica de uma rocha é uma etapa fundamental para a sua utilização correcta, segura e económica, devendo ter um peso crucial aquando da sua escolha, principalmente quando se sente a grande influência das tendências estéticas. Sendo aqui bastante adequado dar o exemplo da importância que esta caracterização tem na selecção prévia da qualidade da pedra quando esta se destina a pavimentos em locais de passagem intensiva de pessoas.

A determinação destas características é imprescindível para avaliar a sua aptidão como material ornamental assim como também servirão para estimar a durabilidade do seu acabamento superficial (Shehata *et al.*, 1990; Sousa *et al.*, 2005; in Sousa, 2006).

Embora a aparência visual seja muito importante, dado que os atributos estéticos são determinantes quando se trata da escolha de uma determinada pedra, é do conhecimento das suas características e dos mecanismos de alteração, eventualmente induzidos pelos agentes que sobre ela vão actuar, que se deverá determinar a escolha dos tipos litológicos que melhor se adequarão a cada situação em específico (Moura, 2006). Esta tarefa só poderá ser executada se se dispuser de valores de referência para as características técnicas mais relevantes exigidas para cada caso, pelo que aqui se realizaram uma série de ensaios que permitirão, contamos nós, contribuir para um melhor conhecimento dos atributos, mas também restrições, dos três calcários em estudo que são amplamente aplicados na calçada portuguesa.

#### 7.1. Determinação da Resistência à Compressão Uniaxial

A resistência à compressão uniaxial (RCU) é uma propriedade da rocha que permite qualificar tecnologicamente o material, mas que raramente uma pedra ornamental será submetida a tamanho esforço de compressão em condições normais de utilização (Sossai, 2006).

De entre os ensaios utilizados para o estudo das propriedades mecânicas das rochas, a RCU é o ensaio laboratorial mais comum na determinação da resistência das rochas e muito provavelmente o mais antigo (Antão, 2004), sendo um parâmetro de extrema importância quando se trata de pavimentos como é o caso da calçada portuguesa que está muitas vezes sujeita a constantes esforços compressivos aplicados por cargas que sobre ela circulam.

A RCU corresponde ao valor mais elevado de tensão que um provete pode suportar quando submetido a uma carga unidireccional e com uma orientação perpendicular às extremidades do provete, correspondendo à relação entre a carga e a área da secção do provete (Santarém Andrade, 2004).

Segundo Hudson & Harisson (1997) o teor em água, a temperatura e a anisotropia do provete são factores que condicionam de forma determinante a resistência calculada para a rocha, sendo que o aumento da temperatura e do teor em água para níveis próximos da saturação provocam a diminuição da resistência, aumentando a ductilidade do material na região pós-pico, pelo que quando se determina um valor de resistência da rocha deve-se ter em consideração estas duas variáveis. Já a anisotropia do provete é um factor intrínseco da própria rocha, podendo originar consideráveis variações da quase totalidade das suas propriedades, pelo que deverá ser tido em conta.

## Caracterização Físico-Mecânica

As rochas que apresentam elevada RCU geralmente também mostram bom comportamento em relação a outras propriedades, como baixa porosidade, elevada resistência à flexão, etc. Sendo que esta resistência é influenciada positivamente ou negativamente pelas características intrínsecas da própria rocha, como a textura, estrutura, granulometria, arranjo, tipo de contactos intergranulares, etc. (Iamaguti, 2001).

Nas rochas duras a pequena deformabilidade está associada a uma rotura súbita com uma resistência residual praticamente nula, enquanto que rochas brandas exibem uma maior deformação onde se torna bastante evidente logo no início do carregamento (Guerreiro, 2000). Em rochas onde a deformabilidade admitida é praticamente nula levará a uma rotura precoce do provete ensaiado.

### 7.1.1. Procedimento do Ensaio

O método de determinação da resistência à compressão uniaxial para cubos e paralelepípedos de pedra natural encontra-se regulamentado pela norma europeia EN 1926, pelo que se utilizou a versão actual desta norma em vigor no nosso país, a norma portuguesa NP EN 1926:2008. A RCU de cada provete é expressa através da razão entre a carga de ruptura do provete ( $F$ ) e a área da sua secção transversal ( $A$ ) determinada antes do ensaio, de acordo com a Equação 7.1.

Para a realização deste ensaio recorreu-se à utilização de uma prensa rígida servo-controlada de modelo *Servo Plus Evolution* da marca *Matest* de 2000 KN de força máxima.

$$RCU = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 7.1}$$

em que:

$RCU$  – é a resistência à compressão uniaxial (MPa);

$F$  – é a carga de ruptura (N);

$A$  – é a área da secção transversal do provete antes do ensaio (mm<sup>2</sup>).

Os provetes utilizados neste ensaio foram preparados de modo a cumprir as rigorosas exigências referidas na norma aqui seguida, com uma dimensão de cerca 55 mm de diâmetro ( $\bar{d}$ ) e de igual altura ( $h$ ), sendo esta um pouco mais variável. Admitindo-se a possibilidade de haver provetes que estejam fora das tolerâncias admissíveis, para além de todo o cuidado na sua elaboração e rectificação, optou-se pela utilização de uma membrana de neoprene com cerca de 2 mm de espessura tendo por objectivo corrigir ou atenuar algumas imperfeições que os provetes pudessem ter, tornando a carga transmitida pelos pratos da prensa às faces do provete mais uniforme.

Com a devida colocação do provete, procedeu-se então à configuração da prensa para as especificidades do ensaio de acordo com a referida norma e com a geometria e dimensão do provete, tendo-se assim adoptado uma taxa de tensão constante de 1 MPa/s e um “*stop load*” de 30 %, ou seja, o ensaio só terminava quando houvesse uma quebra de tensão superior a 30 % da carga que estivesse a ser exercida no momento imediatamente antes. Para todos os provetes verificou-se que com esta perda de carga o provete já tinha atingido a sua RCU máxima.

### 7.1.2. Resultados Obtidos

No decorrer do ensaio e à medida que se verificava o aumento da carga iam surgindo fracturas longitudinais ao longo de todo o provete, observando-se que para a maioria deles a carga máxima de ruptura do provete era atingida quando este já se encontrava totalmente fragmentado. Verificando-se assim que a fracturação da rocha se inicia muito antes de se atingir o seu colapso, pelo que na maioria dos ensaios realizados observou-se que existe uma fracturação primária que inicialmente corresponde a uma mono-fractura axial que vai evoluindo para multi-fracturas axiais que dividem o provete em lâminas. Estas fracturas por clivagem axial são resultantes da compressão aplicada ao provete que origina o desenvolvimento de pequenas fissuras na direcção da aplicação da carga (Fig. 7.1).

O colapso do provete que é originado pela fracturação secundária ocorre por descamação e libertação de fragmentos para fora do provete, havendo casos em que o desenvolvimento é gradual e outros em que ocorre de um modo súbito. Esta fracturação secundária dá origem ao colapso dos provetes por explosão seguida de estilhaçamento, que segundo Antão (2004) é o típico em rochas de grão muito fino.

Pelo exposto acima optou-se por calcular dois valores para a resistência à compressão uniaxial, um que corresponde ao surgimento da primeira fractura ( $RCU\ 1^{af}$ ) e um outro que coincide com a carga máxima suportada pelo provete ( $RCU\ max$ ) (Gráfico 7.1), sendo que na maioria dos casos os provetes que obtiveram maior resistência à primeira fractura também corresponderam aos provetes com maior carga máxima suportada.

No ANEXO III – Resistência à Compressão Uniaxial, apresenta-se o valor médio ( $\bar{x}$ ) da RCU do conjunto de provetes de cada calcário em estudo, bem como o desvio padrão ( $S$ ), o coeficiente de variação ( $v$ ) e o valor mínimo esperado ( $E_L$ ). De referir que devido a alguns provetes apresentarem uma RCU muito abaixo da restante maioria, os valores aqui apresentados foram cálculos apenas considerando os 10 valores mais elevados, pelo que não se tinha a certeza se esta discrepância de resistência correspondia de facto à capacidade intrínseca da rocha ou a um outro factor externo, como por exemplo alguma imperfeição na geometria dos provetes.

Relativamente aos dois parâmetros de resistência à compressão considerados para este ensaio verifica-se que para a carga máxima suportada pelos provetes ( $RCU\ max$ ) são os provetes do calcário D que apresentam o valor médio ( $\bar{x}$ ) mais elevado, cerca de 99 MPa, um pouco mais abaixo com cerca de 93 MPa surge o calcário C, enquanto que os provetes do calcário A ficam-se pelos 82 MPa. No que diz respeito ao surgimento da 1ª fractura ( $RCU\ 1^{af}$ ) verifica-se que tanto o calcário do tipo C como do D apresentam uma resistência média ( $\bar{x}$ ) de 72 MPa, já o calcário A ostenta um valor mais reduzido, de apenas 53 MPa.

O Gráfico 7.2 permite-nos melhor visualizar e comparar os valores médios dos parâmetros obtidos para cada calcário em estudo, sendo evidente a correlação entre a resistência à compressão uniaxial máxima ( $RCU\ max$ ) e a resistência à compressão uniaxial para o surgimento da primeira fractura ( $RCU\ 1^{af}$ ).

### 7.2. Determinação da Resistência à Carga Pontual

Segundo o Anexo B (informativo) da NP EN 1926:2008, a determinação do índice de resistência da pedra natural sob carga pontual é um método simples para o controlo na fase de produção da resistência à compressão uniaxial (RCU). Devido a ser um ensaio que permite uma

## Caracterização Físico-Mecânica

preparação muito simples e não dispendiosa dos provetes, este método é largamente utilizado em aplicações de mecânica das rochas para obtenção de uma avaliação rápida e barata da variabilidade da resistência nas rochas dos maciços, sendo por isso ideal para ser utilizada no controlo de produção da pedra de calçada.

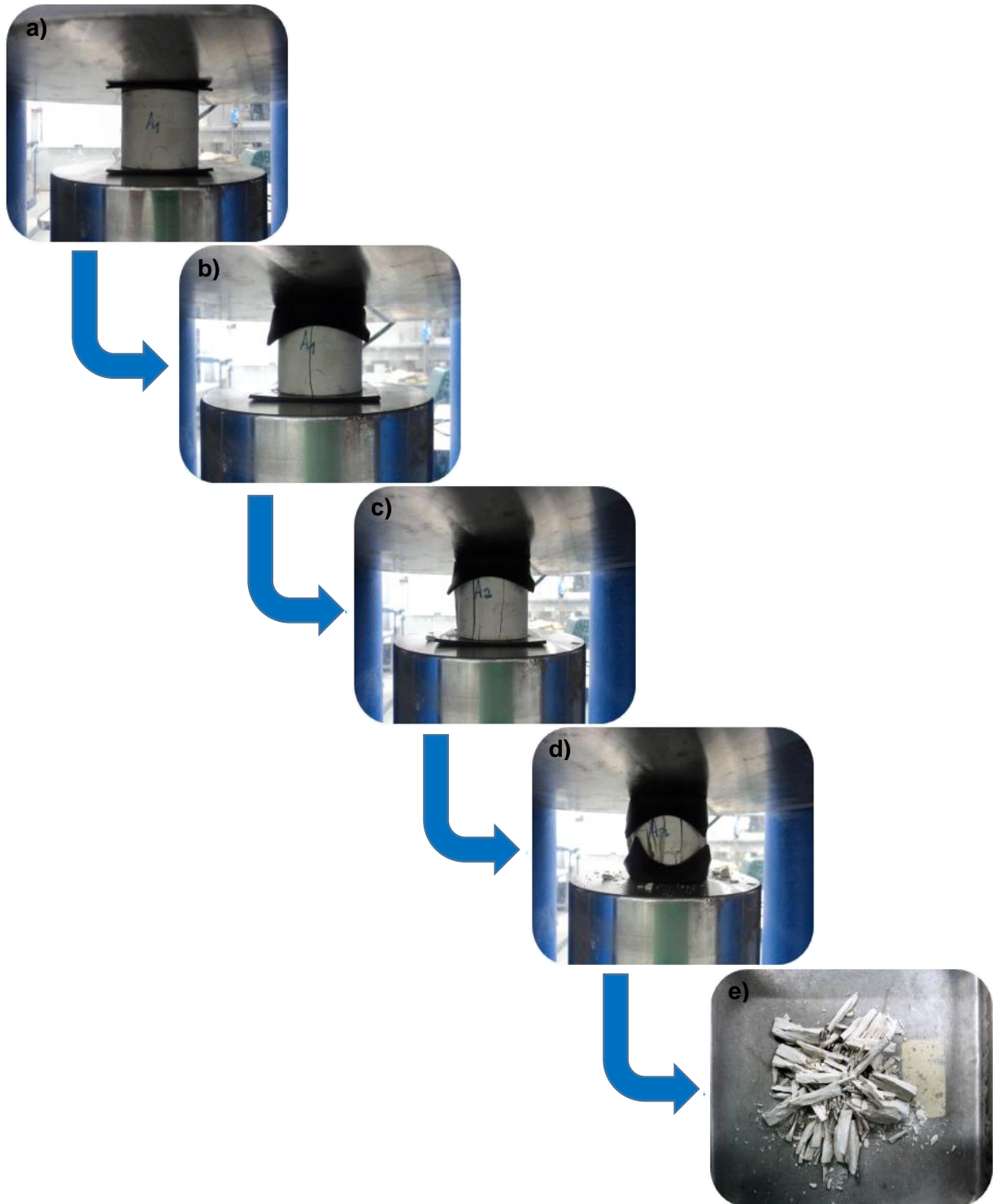


Figura 7.1 – Mecanismo de fracturação típica da maioria dos provetes ensaiados: a) provete no centro dos pratos da prensa com a respectiva membrana de neoprene nas faces; b) surgimento da primeira fractura; c) desenvolvimento de múltiplas fracturas; d) provete completamente fragmentado após atingir a carga máxima; e) configuração do provete após o ensaio de RCU.

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

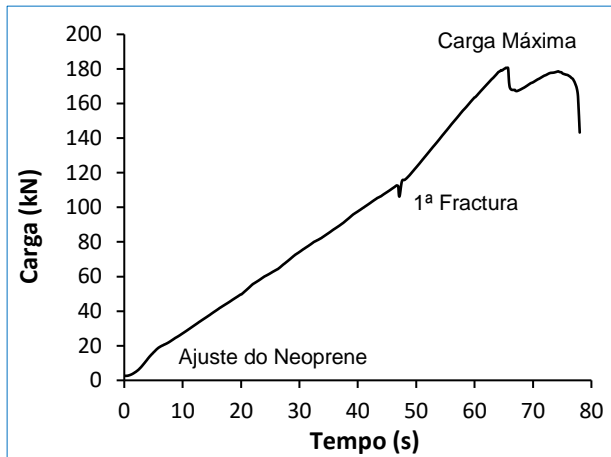


Gráfico 7.1 – Gráfico do ensaio de RCU do provete C<sub>18</sub>, que corresponde ao modelo característico da maioria dos provetes ensaiados.

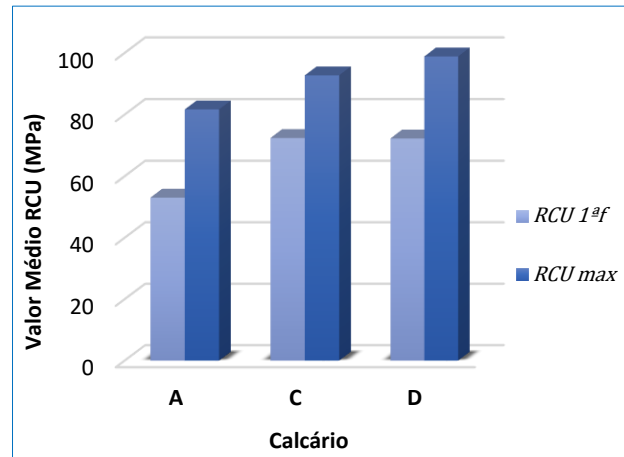


Gráfico 7.2 – Valor médio de cada calcário para a resistência à compressão uniaxial máxima (*RCU max*) e para o aparecimento da primeira fractura (*RCU 1ªf*).

Este ensaio de natureza destrutiva pode ser realizado quer em laboratório ou no campo, possibilitando a utilização de provetes com diferentes formas e dimensões e em diferentes condições de teor de água (natural, seco em estufa e saturado).

Este ensaio é geralmente recomendado para rochas que apresentem valores de RCU superior a 25 MPa de modo a obter um índice de resistência à compressão pontual superior a 1 MPa (Santarém Andrade, 2004), que permitirá prever a resistência à tracção e à compressão uniaxial (Pinho, 2003).

Diversos autores têm tentado estabelecer correlação entre os valores obtidos neste ensaio com os valores determinados para a RCU, de modo a possibilitar a determinação deste último só com base no índice de resistência à carga pontual (NP EN 1926:2008). É usual tentar fazer esta conversão através da multiplicação de um factor *K*, observando-se na literatura um vasto leque de valores para este factor, que variam entre 8 e 54 (Santarém Andrade, 2004), mas a maioria das estimativas coloca os valores deste factor entre 16 e 24 (Martins & Miranda, 2010). Contudo a equação da correlação ideal para se utilizar os dados do índice de resistência sob carga pontual para se estimar a RCU, é a equação que se obtém num estudo preliminar de cada tipo de rocha em apreço. Se não existir o estudo prévio desta correlação para um tipo específico de rocha, poder-se-á utilizar a seguinte equação geral (Equação 7.2) de correlação (NP EN 1926:2008):

$$RCU = 22 \times I_{S(50)} \quad \text{Equação 7.2}$$

Em que  $I_{S(50)}$  é o índice de resistência sob carga pontual corrigido e corresponde aos resultados obtidos através do método do diâmetro equivalente (ISRM, 1985), permitindo efectuar estimativas fiáveis da resistência de rochas anisotrópicas mesmo quando os provetes apresentam formas irregulares (Santarém Andrade, 2004). Esta equação é baseada numa vasta investigação de uma ampla gama de rochas duras e brandas, e apesar de não fornecer uma previsão muito exacta de RCU para todos os tipos de rochas, é recomendado como o melhor factor de correlação unitária disponível para o efeito. De referir que na equação acima (Equação 7.2), para os dados da obtenção da resistência à compressão uniaxial é assumida uma relação de 2:1 entre o comprimento e o diâmetro dos cilindros (NP EN 1926:2008).

## Caracterização Físico-Mecânica

Segundo Pinho (2003) ocorrem erros bastante expressivos caso se utilize uma relação arbitrária para estimar a resistência à compressão uniaxial a partir da carga de ponta, especialmente em rochas anisotrópicas onde o valor do factor de conversão  $K$  assume valores muito dispersos.

O ensaio padrão é realizado sobre provetes cilíndricos com um diâmetro de 50 mm e uma altura mínima de 1,5 vezes o seu diâmetro, sendo a aplicação da carga realizada segundo a direcção diametral, que possibilitará a determinação da resistência à carga pontual ( $I_S$ ) através da seguinte Equação 7.3 (ISRM, 1985).

$$I_S = \frac{P}{D^2} \quad \text{Equação 7.3}$$

em que:

$I_S$  – é a resistência à carga pontual (kN/mm<sup>2</sup>);

$P$  – é a carga aplicada ao provete (kN);

$D$  – é o diâmetro do provete (mm).

Para o mesmo ensaio, mas realizado sobre provetes cilíndricos com outra dimensão diametral, a relação de  $(P/D^2)$  terá de ser multiplicada por um factor correctivo a fim de se obter um índice de carga pontual normalizado, calculado através das equações seguintes (Equação 7.4 e 7.5) (ISRM, 1985).

$$F^* = \left(\frac{D}{50}\right)^{0,45} \quad \text{Equação 7.4}$$

em que:

$F^*$  - é o factor correctivo;

$$I_{S(50)} = F^* \times \frac{P}{D^2} \quad \text{Equação 7.5}$$

em que:

$I_{S(50)}$  – é a resistência à carga pontual normalizada (kN/mm<sup>2</sup>).

Para a utilização de provetes paralelepípedicos será necessário definir um diâmetro equivalente correspondente à secção circular com área igual à da secção transversal do provete prismático, sendo posteriormente possível calcular o índice de carga pontual normalizado a partir desse valor, aplicando-se as Equações 7.6, 7.7, 7.8 e 7.9 seguintes (ISMR, 1985).

Sendo,

$$A = W \times D^* = \frac{\pi}{4} \times D_e^2 \quad \text{Equação 7.6}$$

em que:

$A$  – é a área da secção transversal do provete prismático (mm<sup>2</sup>);

$W$  – é a largura do provete (mm);

$D^*$  – é a espessura do provete (mm);

$D_e$  – é o diâmetro equivalente (mm).

Decompõe-se que,

$$D_e = \sqrt{\frac{4}{\pi} \times W \times D'} \quad \text{Equação 7.7}$$

Que permite calcular o,

$$F' = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0,45} \quad \text{Equação 7.8}$$

Determinando-se assim o,

$$I_{S(50)} = F' \times \frac{P}{D_e^2} \quad \text{Equação 7.9}$$

### 7.2.1. Procedimento do Ensaio

O ensaio de resistência à carga pontual foi realizado segundo o procedimento recomendado pela ISMR (1985). No nosso caso de estudo foram utilizados um total de 100 provetes com forma prismática regular, tendo-se o cuidado de seguir a recomendação de Foster (1983) que sugere que para se evitar o aumento de incerteza do  $I_{S(50)}$  para valores de carga mais baixos é vantajoso a utilização de provetes com uma espessura superior a 30 mm (Santarém Andrade, 2004).

No procedimento do nosso ensaio optou-se por determinar a resistência à carga pontual segundo duas condições de teor em água dos provetes, tendo-se realizado uma primeira série de ensaios em que os provetes foram previamente secos em estufa a cerca de 70 °C até massa constante ( $I_{S(50)seco}$ ), e uma segunda série em que os provetes se encontravam com um teor de água correspondente à saturação a pressão atmosférica ( $I_{S(50)saturado}$ ), tendo sido deixados vários dias dentro de água até também apresentarem uma massa constante.

Alude-se para o facto de que os provetes que se destinaram à realização do ensaio sob condições de saturação também foram sujeitos a secagem em estufa de modo a determinar-se o seu peso seco, só depois foram colocados na água tendo-se posteriormente também determinado o seu peso completamente saturado. O cálculo desta diferença de massas permitiu determinar o teor de água de cada provete (Equação 7.10), tendo-se como intuito avaliar a influência deste parâmetro para a resistência à carga pontual de cada calcário.

$$w = \frac{m_s - m_d}{m_d} \times 100 \quad \text{Equação 7.10}$$

em que,

$w$  – é o teor de água (%);

$m_s$  – é a massa do provete saturado (g);

$m_d$  – é a massa do provete seco (g).

Na realização do ensaio cada provete foi colocado entre as duas ponteiras cónicas, accionadas a partir de uma bomba hidráulica (Fig. 7.2), sujeitando os provetes a uma carga

## Caracterização Físico-Mecânica

progressivamente crescente até ocorrer a sua ruptura, tendo-se seguido a recomendação da ISRM (1985) em que a carga era aplicada de forma progressiva de modo a dar-se a ruptura do provete entre os 10 e 60 segundos após o início da actuação da carga.



Figura 7.2 – Equipamento utilizado na realização do ensaio de resistência à carga pontual.

### 7.2.2. Resultados Obtidos

Após a realização do ensaio e da obtenção da força ( $P$ ) de ruptura de cada provete e com os valores dos parâmetros geométricos destes já medidos, procedeu-se ao cálculo do índice de resistência à carga pontual corrigida ( $I_{S(50)}$ ) através do método do diâmetro equivalente. Do total dos provetes que foram ensaiados confirmou-se a validade de todos eles, tendo-se verificado que para a sua totalidade as superfícies de ruptura passaram pelos pontos de carga, como se mostra no ANEXO IV – Resistência à Carga Pontual.

No referido anexo também se apresenta os valores obtidos para todos os provetes e com os quais, após a eliminação dos valores anómalos, calculou-se a média ( $\bar{x}$ ), o desvio padrão ( $S$ ), o coeficiente de variação ( $v$ ) e o valor mínimo esperado ( $E_L$ ) para cada calcário. Nestes cálculos também se procedeu à conversão dos  $I_{S(50)}$  das unidades em que o ensaio é procedido ( $\text{kN/mm}^2$ ) para uma unidade padrão (MPa) e de melhor comparação com outros ensaios realizados, sendo que  $1 (\text{kN/mm}^2)$  corresponde a  $1000 (\text{MPa})$ .

Das determinações conseguidas com este ensaio verifica-se que para a resistência à carga pontual dos provetes secos ( $I_{S(50)seco}$ ) o calcário C apresenta-se com o valor médio ( $\bar{x}$ ) mais elevado  $4,5 \text{ MPa}$ , ligeiramente mais abaixo e com cerca de  $4,35 \text{ MPa}$  surge o calcário A, enquanto que os provetes do calcário D encontram-se um pouco mais afastados com uma resistência de  $3,64 \text{ MPa}$ .

Já em relação à resistência à carga pontual para os provetes saturados ( $I_{S(50)saturado}$ ) surge uma mudança na ordem de resistência dos calcários em relação à obtida para os provetes secos, verificando-se que continua a ser o calcário C a apresentar a resistência média ( $\bar{x}$ ) mais elevada com  $6,19 \text{ MPa}$ , desta vez seguido do D com  $5,16 \text{ MPa}$  e por fim do A com  $4,81 \text{ MPa}$ .

Note-se ainda que para qualquer um dos calcários as resistências obtidas com provetes saturados são superiores às obtidas com provetes secos. Uma possível explicação para esta constatação poderá prender-se pelo facto de haver um certo “amaciar” destes calcários, que correspondem a calcários muito rijos, que faça com que levem a admitirem uma maior



## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

deformação e assim resistirem melhor à carga que lhes é imposta, tornando-se menos “quebradiços”.

De referir que em qualquer uma das metodologias de ensaio, tanto para os provetes secos como para os saturados, não se verificou a mesma sucessão de resistência dos calcários do que a encontrada no ensaio de RCU. No Gráfico 7.3 representa-se os valores médios de cada calcário para que se possam analisar e comparar de uma maneira mais concisa os resultados obtidos neste ensaio.

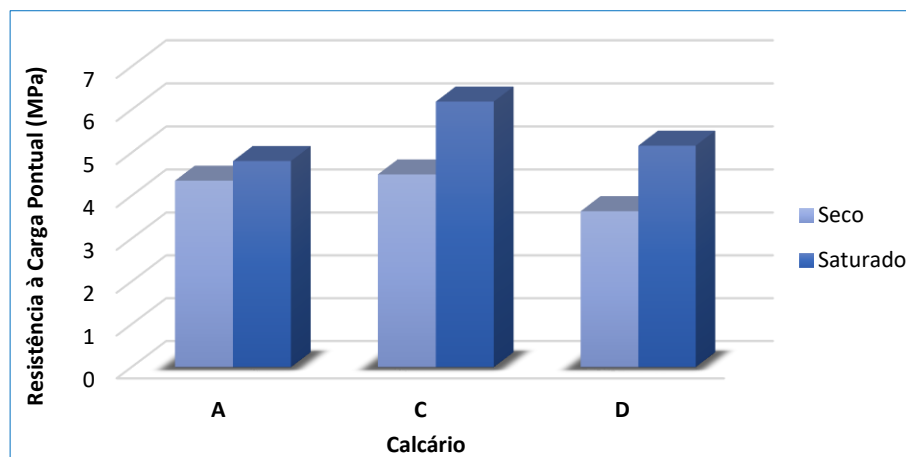


Gráfico 7.3 – Valor médio dos índices de resistência à carga pontual corrigidos ( $I_{S(50)}$ ) para os ensaios com provetes secos ( $I_{S(50)seco}$ ) e saturados ( $I_{S(50)saturado}$ ).

Uma vez já determinada a resistência à compressão uniaxial (RCU) em provetes secos pôde-se assim determinar a sua correlação linear com este ensaio ( $I_{S(50)seco}$ ), possibilitando a determinação do factor  $K$  (Equação 7.11) para cada um dos nossos calcários em estudo (Tabela 7.1). De referir que para a realização destes cálculos utilizou-se o valor médio da carga máxima de resistência à compressão uniaxial ( $RCU_{max}$ ).

$$RCU = K \times I_{S(50)} \quad \text{Equação 7.11}$$

Com o cálculo da resistência à carga pontual sob provetes saturados ( $I_{S(50)saturado}$ ) e não se tendo utilizado provetes saturados na realização do ensaio de RCU, a determinação do factor  $K$  para cada um dos nossos calcários permitiu ainda extrapolar a resistência à compressão uniaxial que cada um destes calcários apresentará sob condições de saturação ( $RCU_s$ ) (Tabela 7.1).

Tendo-se por este método obtido valores de RCU sob condições de saturação muito superiores aos encontrados em condições de amostras secas, verificando-se também o aumento da diferença de RCU entre os diferentes tipos de calcários para estas condições. Salienta-se aqui que a confirmação de tais resultados está dependente da realização do ensaio de resistência à compressão uniaxial com provetes em condições de saturação.

Tabela 7.1 – Valores do factor  $K$  determinados para cada calcário e correspondentes valores de RCU sob condições de saturação ( $RCU_s$ ) calculados através da multiplicação do factor  $K$  com o  $I_{S(50)saturado}$  (Equação 7.11).

Calcário	$K$	$RCU_s$ (MPa)
A	18,85	90,67
C	20,67	127,95
D	27,18	140,25

### 7.3. Determinação da Dureza de Schmidt

A determinação da dureza através da utilização do esclerómetro de Schmidt (vulgo martelo de Schmidt) corresponde a um ensaio não destrutivo, no qual as rochas ficam intactas (Santarém Andrade, 2004).

Através da medição do ressalto da massa de aço quando percutida sobre a superfície da rocha, o ensaio permite avaliar de uma forma aproximada a sua dureza. Para que o ensaio se realize em perfeitas condições, é necessário que o local esteja limpo e com ausência de fissuras, sendo que para a correcta execução do ensaio o martelo deve ser colocado perpendicularmente ao plano de ensaio. Em função da dureza da rocha, a massa de aço sofre um maior ou menor ressalto que reflectirá um valor que será registado no medidor incorporado no equipamento, numa escala de 10 a 100 e que se define como a dureza de Schmidt ( $R$ ) (Monteiro, 2008). Este valor também será condicionado por outras propriedades da rocha a testar, como o módulo de elasticidade, a resistência, a rugosidade da superfície e a massa volúmica (Katz *et al.*, 2000).

A dureza determinada corresponde a uma medição pontual da resistência do material a uma deformação elástico-plástica provocada pelo impacto do martelo (Szwedzicki, 1998, in Santarém Andrade, 2004), sendo esta deformação mais elástica em rochas sãs, verificando-se uma deformação mais plástica em rochas mais alteradas. Por vezes esta dureza superficial é uma característica que pode ser correlacionada com a resistência ao desgaste do material rochoso (Santarém Andrade, 2004).

Note-se que este ensaio só avalia a zona superficial dos materiais, que pode não representar na integra o material rochosos que se pretende caracterizar (Santarém Andrade, 2004), sendo os valores obtidos apenas representativos de uma camada até 5 cm da profundidade (Soares, 2014). Salienta-se ainda que a existência de descontinuidades próximas da superfície do material rochoso que se pretende testar podem influenciar negativamente os valores da resistência (Hack & Huisman, 2002).

A dureza de Schmidt que é representada pelo valor do “ressalto” ( $R$ ), pode depois ser correlacionado com a resistência à compressão simples da rocha constituinte da superfície ensaiada ou com o seu módulo de elasticidade, de acordo com o valor do seu peso específico (Guerreiro, 2000).

#### 7.3.1. Procedimento do Ensaio

O ensaio para a determinação da dureza de Schmidt foi realizado segundo as recomendações da versão revista da ISRM (1981) (Aydin, 2009), onde foi utilizado um modelo do martelo de Schmidt do tipo L. Este ensaio foi realizado directamente sobre os cubos de calcário (pedras de calçada) que se recolheram para amostragem e com os quais posteriormente se elaborou os provetes cilíndricos.

As pedras de teste não sofreram qualquer tipo de preparação para a execução deste ensaio, tendo-se apenas escolhido as superfícies que apresentavam as melhores condições para a sua realização. Estas rochas apresentavam um teor em água resultante da simples secagem ao ar.

Na execução do ensaio o martelo encontrava-se em posição vertical, tendo-se realizado um total de 20 determinações sobre as amostras de cada calcário em estudo.

### 7.3.2. Resultados Obtidos

Do total das 20 determinações do valor de  $R$  que foram realizadas para cada calcário excluiu-se os 10 valores mais baixos, tendo-se realizado os respectivos cálculos com apenas as 10 determinações que apresentaram os valores mais elevados.

Com os valores em questão procedeu-se ao cálculo da média ( $\bar{x}$ ), do desvio padrão ( $S$ ), do coeficiente de variação ( $v$ ) e do valor mínimo esperado ( $E_L$ ) para cada conjunto de provetes (ANEXO V – Dureza de Schmidt).

No que respeita a esta dureza verifica-se que os calcários em estudo apresentam resultados muito semelhantes, sendo o calcário D o que apresenta maior valor médio de  $R$ , seguindo-se o A e por último o C, com 55,60, 54,70 e 52,40, respectivamente.

Os valores médios obtidos para cada calcário foram usados para definir a resistência à compressão uniaxial, utilizando-se para isso o ábaco proposto por Deere & Miller (1966) que relaciona o valor de  $R$  de acordo com a inclinação do martelo e a massa volúmica aparente da rocha (ANEXO VI – Projecção de  $R$  para definição da RCU) (Hoeck, 2007). O valor da massa volúmica utilizada foi por nós determinada para cada tipo de calcário.

Os valores da resistência à compressão uniaxial determinados por este método encontram-se muito acima daqueles que foram definidos pelo ensaio de RCU e com uma ordem diferente de resistência para os 3 calcários em estudo, tendo sido determinado para o calcário A cerca de 195 MPa, para o C aproximadamente 165 MPa e para o D sensivelmente 210 MPa.

Através do ábaco sugerido por Miller (1965) (Guerreiro, 2000) também foi possível correlacionar o valor de  $R$  com a densidade da rocha de modo a se obter um valor para o módulo de elasticidade ( $E_{MS}$ ) de cada calcário (ANEXO VII – Projecção de  $R$  para definição do Módulo de Elasticidade). Sendo assim determinado por este método que o calcário do tipo A apresenta um módulo de elasticidade de 66 GPa, o C de 61 GPa e o D de 69 GPa.

### 7.4. Determinação da Absorção de Água à Pressão Atmosférica

A absorção de água à pressão atmosférica é de grande importância quando os materiais vão estar sujeitos à meteorização, em contacto com a água e/ou com a humidade do solo (Jimeno, 1996) devendo esta propriedade ser normalmente determinada para uma correcta selecção dos materiais a aplicar em obra. Tendo-se como certo que a água desempenha um importante papel na deterioração dos pavimentos que utilizem produtos em pedra natural, e como tal, é de extrema importância a determinação de propriedades que envolvam o transporte de água através dos poros da pedra (absorção de água à pressão atmosférica e absorção de água por capilaridade).

Salienta-se o facto que para o mesmo tipo de rocha, quanto maior for o seu peso específico aparente, menor será a sua porosidade e menor também será o coeficiente de absorção de água, (Jimeno, 1996).

A quantidade de água absorvida por uma rocha depende, em primeiro lugar, da quantidade de poros da rocha (porosidade), e em segundo lugar, da sua forma e tamanho (Rojo *et al.*, 2003, in Machado, 2012). A absorção de água permite estimar a velocidade da entrada de água nos espaços vazios e inferir sobre a sua conectividade, sabendo-se que inicialmente são preenchidos os espaços vazios de maior tamanho e melhor conectados, entrando posteriormente nos espaços vazios mais pequenos e de mais difícil acesso (Machado, 2012). Podemos daqui concluir que as rochas podem ter valores semelhantes de porosidade, mas conter diferentes

## Caracterização Físico-Mecânica

tipos de poros, sobretudo no que diz respeito ao seu tamanho, distribuição espacial e conectividade, factores que são determinantes na quantidade de água absorvida por cada rocha.

Note-se que neste ensaio existe sempre algum ar que fica retido nos poros de mais difícil acesso, impossibilitando assim a entrada de água, pelo que rochas com maior número de micróporos são mais suscetíveis à formação de bolhas no seu interior (Yu & Oguchi, 2010, in Machado, 2012).

As rochas com maior índice de absorção de água e maior permeabilidade, seja pela presença de microfissuras ou pelas relações de contacto entre os grãos, serão rapidamente deterioradas e poderão perder as suas características principais estéticas (brilho, cor, capacidade de polimento, etc.) e físicas (resistência à abrasão, ao ataque químico e a manchas, dureza, resistência à tracção, etc.), que lhe conferem o seu embelezamento e protecção contra agentes agressivos (Iamaguti, 2001).

A absorção de água à pressão atmosférica expressa-se em percentagem, sendo calculada através da razão entre a massa do provete saturado após ter atingido massa constante e a massa do provete seco (Equação 7.12).

$$A_b = \frac{m_s - m_d}{m_d} \times 100 \quad \text{Equação 7.12}$$

em que:

$A_b$  – é a absorção de água à pressão atmosférica (%);

$m_s$  – é a massa do provete saturado após imersão em água até atingir massa constante (g);

$m_d$  – é a massa do provete seco em estufa até massa constante (g).

### 7.4.1. Procedimento do Ensaio

Para a realização do ensaio de absorção de água à pressão atmosférica foram utilizados 10 provetes cilíndricos para cada calcário em estudo (Fig. 7.3), adoptando-se o procedimento descrito na norma portuguesa NP EN 13755:2008.

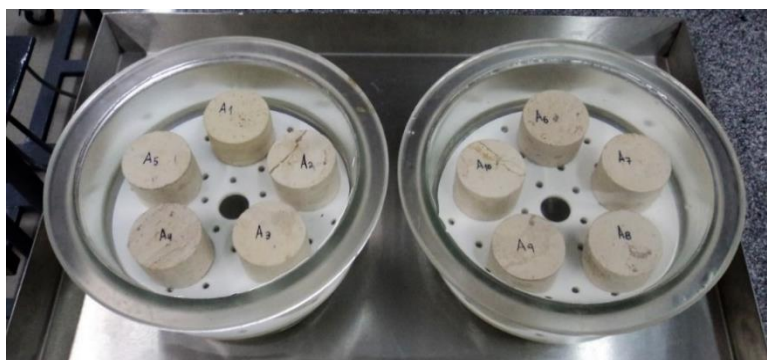


Figura 7.3 – Disposição dos provetes nos recipientes onde foram realizados os ensaios de absorção de água à pressão atmosférica.

### 7.4.2. Resultados Obtidos

No ANEXO VIII – Absorção de Água à Pressão Atmosférica é possível contemplar os valores de absorção de cada um dos 10 provetes utilizados para cada tipo de calcário, tendo-se com

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

eles calculado os valores médios ( $\bar{x}$ ), o coeficiente de variação ( $v$ ), o desvio padrão ( $S$ ) e o valor máximo esperado ( $E_H$ ) para cada calcário dos três núcleos aqui abordados

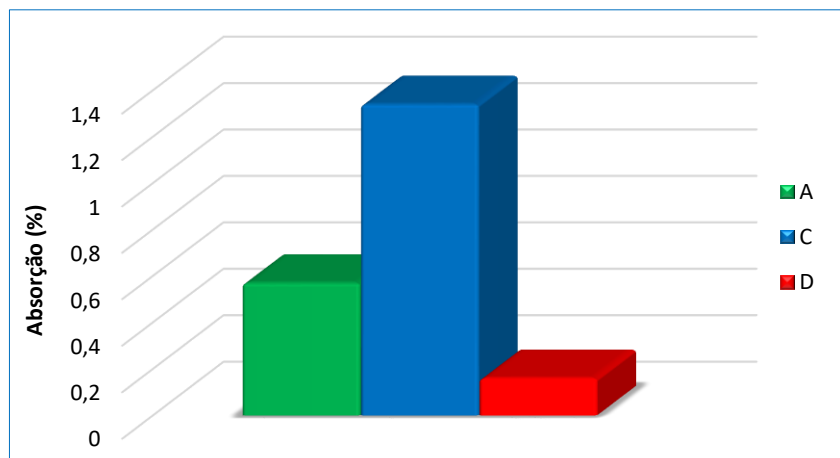
De referir que devido a 2 provetes do calcário D apresentarem evidências de descontinuidades (fracturas) optou-se pela sua exclusão dos cálculos, tendo-se considerado apenas 8 provetes para o seu cálculo médio. Mas em todo o caso estas fracturas não deixam de ser uma característica da própria pedra e que farão parte activa do seu desempenho em obra.

Dos valores médios obtidos com este ensaio verifica-se que existe uma notória diferença entre estes 3 tipos de calcário, apresentando o calcário D uma absorção muito reduzida com cerca de 0,16 %, consideravelmente inferior ao verificado para o calcário A, com um valor de 0,57 %, encontrando-se ainda mais distante do C, este com o maior valor determinado e que ascende a 1,34 %, contudo qualquer um destes valores para a absorção de água à pressão atmosférica são considerados relativamente baixos.

O comportamento distinto dos 3 calcários deve-se ao facto de eles apresentarem porosidades também distintas, tal conclusão é possível comprovar mais à frente através das porosidades calculadas para cada um destes calcários.

O valor bastante inferior do calcário negro (D) em relação aos calcários brancos (A e C), reflecte o processo de metamorfismo a que este calcário foi sujeito, resultando numa pedra natural com um valor de absorção de água muito baixo. Por sua vez, o calcário branco, tal como é normal, é um material mais poroso. No Gráfico 7.4 apresentam-se os valores médios calculados para que se possam analisar e compara de uma maneira mais concisa os resultados obtidos neste ensaio e a conclusão que dele podemos tirar.

Gráfico 7.4 – Valor médio da absorção de água à pressão atmosférica dos calcários em estudo.



### 7.5. Determinação da Massa Volúmica Real e Aparente e da Porosidade Total e Aberta

A massa volúmica de uma pedra natural corresponde à relação entre a massa de uma amostra do material rochoso e o seu volume, sendo considerada uma das propriedades básicas das rochas em que os seus valores são influenciados pela composição mineralógica e pela porosidade (Bell & Culshaw, 1998, in Santarém Andrade, 2004), constituindo assim uma indicação sobre a composição mineralógica e as características de resistência mecânica (Santarém Andrade, 2004).

A massa volúmica aparente de uma rocha corresponde ao quociente entre a massa do provete seco e o seu volume aparente, que corresponde ao volume limitado pela superfície externa do

## Caracterização Físico-Mecânica

provete incluindo os espaços vazios. Esta propriedade depende directamente do tipo e do grau de empacotamento dos minerais que constituem a rocha, normalmente uma baixa massa volúmica corresponde a uma elevada porosidade.

Já a massa volúmica real de uma rocha é determinada pelo quociente entre a massa de uma amostra seca e o volume da sua parte sólida, sendo por isso necessário moer a rocha a uma granulometria muito fina de modo a ficarmos com um volume de rocha que corresponda apenas à fracção sólida sem vazios.

A porosidade de uma pedra natural corresponde à relação entre o volume de vazios e o volume total do material rochoso, contudo devido ao facto de existirem poros isolados (vazios preenchidos por ar) onde não é possível o acesso da água, existem dois tipos de porosidade: (i) a porosidade aberta que se traduz na relação entre o volume de poros abertos (acessíveis) e o volume aparente duma amostra do material rochoso; (ii) a porosidade total que equivale à relação entre o volume total de poros (abertos e fechados) e o volume total do material rochoso (Machado, 2012).

Como nem todos os vazios são acessíveis e tal como se sucede para a massa volúmica real, a porosidade absoluta também não pode ser determinada sem se destruir a amostra de rocha. Para a sua mensuração é necessário moer a amostra muito finamente a fim de se eliminar os poros fechados e inacessíveis. Para pedras densas, com baixa porosidade, as diferenças entre as massas volúmicas real e aparente, assim como entre a porosidade aberta e a porosidade total, são muito pequenas.

A importância que é dada à porosidade das rochas vai depender de cada tipo litológico e da aplicação que é pretendida para a pedra natural, segundo Faim (2014) nas rochas sedimentares a origem clástica ou química, as condições de formação, os processos diagenéticos e a tectónica, vão condicionar de diferentes modos a porosidade das rochas.

A porosidade aberta, aquela que está livremente acessível à água, é um parâmetro muito utilizado no caso das pedras empregues na construção. Esta propriedade está directamente relacionada com a livre circulação de fluidos à pressão atmosférica no interior da pedra, sendo de grande importância na alteração destes materiais rochosos, visto que podem transportar facilmente para o seu interior fluidos com características agressivas (Antão, 2004). Pois sendo a água o principal agente de alteração química, física e mecânica da pedra natural, quanto maior for a permeabilidade das rochas mais fácil será a circulação da água no seu interior, traduzindo-se numa maior possibilidade de alteração.

Segundo Iliev (1966) in Santarém Andrade (2004) a porosidade condiciona de forma importante as propriedades físicas e mecânicas do material rochosos, ideia também compartilhada por Faim (2014) que refere que a presença de poros na estrutura das rochas diminui a resistência e aumenta a sua deformabilidade. De forma análoga Jimeno (1996) alude que para o mesmo tipo de rocha aquela que for mais porosa apresentará valores mais baixos de resistência a esforços mecânicos. Formaintraux (1976) com base na porosidade total estabelece uma equação que permite quantificar as rochas quanto à sua qualidade.

### 7.5.1. Procedimento do Ensaio

O ensaio para determinação da massa volúmica aparente e real e da porosidade aberta e total foi realizado de acordo com a norma portuguesa NP EN 1936:2008, que se baseia no princípio geral de que após secagem até massa constante, a massa volúmica aparente e a porosidade

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

aberta são determinadas através da absorção de água sob vácuo (Fig. 7.4) e da pesagem dos provetes imersos. Após se obter as referidas massas pode-se então proceder aos cálculos para a massa volúmica aparente e para a porosidade aberta.

A massa volúmica aparente é a razão entre a massa do provete seco e o seu volume aparente, e é calculada através da seguinte Equação 7.13.

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \times \rho_{rh} \quad \text{Equação 7.13}$$

em que:

$\rho_b$  – é a massa volúmica aparente do provete ( $\text{kg/m}^3$ );

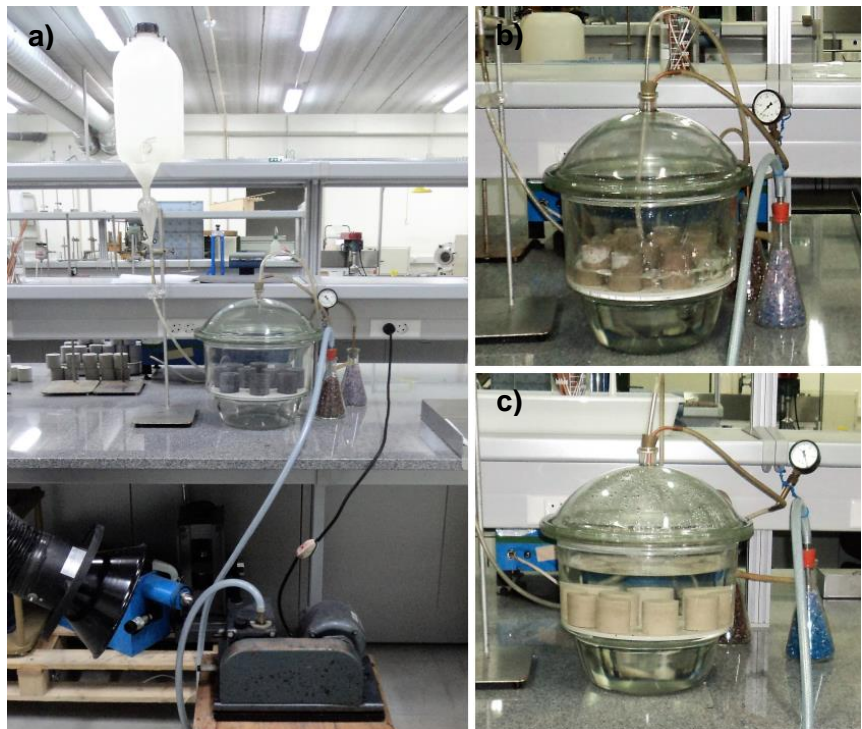
$m_d$  – é a massa do provete seco (g);

$m_s$  – é a massa do provete saturado (g);

$m_h$  – é a massa do provete imerso em água (g);

$\rho_{rh}$  – é a massa volúmica real da água a  $20\text{ }^\circ\text{C} = 998\text{ (kg/m}^3\text{)}$ .

Figura 7.4 – Dipositivo utilizado no ensaio de determinação da massa volúmica e porosidade: a) provetes dentro de um recipiente que estava sujeito a uma depressão de 2 kPa realizada pela bomba de vácuo; b) enchimento do recipiente com água destilada, onde se pode observar a manutenção da depressão; c) provetes totalmente imersos e já à pressão atmosférica.



A porosidade aberta (sob a forma percentual), que se pode definir como a razão entre o volume dos poros abertos e o volume aparente do provete, pode ser calculada através da seguinte Equação 7.14.

$$\rho_0 = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100 \quad \text{Equação 7.14}$$

em que:

$\rho_0$  – é a porosidade aberta do provete (%).

## Caracterização Físico-Mecânica

A determinação da massa volúmica real e da porosidade total requiere que os provetes sejam reduzidos a pó, para a sua determinação foi seguido o método A (picnómetro) (Fig.7.5) que vem referido na norma aqui utilizada.

A massa volúmica real (em quilogramas por metro cúbico) que é a razão entre a massa do provete seco moído e o volume do liquido deslocado pela massa, é calculada através da seguinte Equação 7.15.

$$\rho_r = \frac{m_c}{m_2 + m_c - m_1} \times \rho_{rh} \quad \text{Equação 7.15}$$

em que:

$\rho_r$  – é a massa volúmica real do provete ( $\text{kg/m}^3$ );

$m_c$  – é a massa do provete moído e seco (g);

$m_1$  – é a massa do picnómetro cheio com água destilada e contendo o provete moído (g);

$m_2$  – é a massa do picnómetro cheio de água destilada (g);



Figura 7.5 – Procedimento utilizado na determinação da massa volúmica real e da porosidade total: (I) redução da granulometria dos fragmentos dos provetes no britador de maxilas; (II) moagem dos provetes no moinho de anéis; (III) crivagem do pó a uma granulometria inferior a 0,063 mm; (IV) colocação e pesagem do pó no picnómetro; (V) picnómetros sob vácuo para a retirada completa do ar; (VI) picnómetros em repouso para que o material assente e a água fique límpida para depois ser colocada de nível.



## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

A porosidade total (sob a forma percentual) é a razão entre o volume de poros abertos e fechados e o volume aparente do provete, sendo calculada através da seguinte Equação 7.16.

$$\rho = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_r}\right) \times 100 \quad \text{Equação 7.16}$$

em que:

$\rho$  – é a porosidade total do provete (%).

Com a determinação da porosidade total é possível quantificar a rocha quanto à sua qualidade, pelo que Formaintraux (1976) concluiu que para pedras não fissuradas o valor do índice de qualidade das rochas é afectado pelos poros da rocha e varia de acordo com a seguinte Equação 7.17.

$$IQ_\rho = 100 - 1,6 \times \rho \quad \text{Equação 7.17}$$

em que;

$IQ_\rho$  – é o índice de qualidade da rocha (%);

1,6 – é uma constante.

### 7.5.2. Resultados Obtidos

No ANEXO IX – Massa Volúmica Aparente e Real e Porosidade Aberta e Total, encontram-se discriminados os valores individuais dos provetes que serviram para se determinar a massa volúmica aparente e real, a porosidade aberta e total e o índice de qualidade em termos do valor médio ( $\bar{x}$ ), do coeficiente de variação ( $v$ ), do desvio padrão ( $S$ ) e do valor máximo e mínimo esperado ( $E$ ) dos calcários em análise.

Dos valores médios obtidos com este ensaio verifica-se que existem algumas diferenças entre estes 3 tipos de calcário, sobretudo nas porosidades. Com a média calculada ( $\bar{x}$ ) para a massa volúmica aparente verifica-se que é o calcário D que apresenta a densidade mais elevada, com cerca de 2685 kg/m<sup>3</sup>, com um pouco menos surge o calcário A, com um valor a rondar os 2660 kg/m<sup>3</sup>, e já um pouco mais abaixo, com cerca de 2600 kg/m<sup>3</sup>, o calcário C.

Para o valor médio ( $\bar{x}$ ) da porosidade aberta o calcário D apresenta um valor bastante reduzido, de 0,24 %, segue-se o A com 1,69 % e o C consideravelmente mais elevado, com 4 %.

Nos valores médios ( $\bar{x}$ ) determinados para a massa volúmica real existe uma maior igualdade entre estas 3 variedades de calcário, sendo que para esta determinação é o calcário A que surge com o valor mais elevado, cerca de 2760 kg/m<sup>3</sup>, de seguida o D com 2750 kg/m<sup>3</sup> e com o valor mais baixo continua o C com cerca de 2730 kg/m<sup>3</sup>.

Em termos do valor encontrado para a porosidade total estes calcários encontram-se comparativamente mais próximos, continuando a ser o calcário D com a porosidade mais reduzida, mas muito superior ao valor determinado para a porosidade aberta, com cerca de 2 %. O calcário A também surge com um valor francamente superior ao da porosidade aberta, com 3,5 % seguido do mais poroso, o calcário C com uma porosidade total de 5 %, um pouco mais elevada que a aberta.

## Caracterização Físico-Mecânica

Como seria de esperar, todos os valores da massa volúmica real são superiores aos definidos para a massa volúmica aparente, assim como a porosidade total é superior à porosidade aberta. Também se confirma de uma forma quase geral que os calcários com uma menor porosidade correspondem a uma maior massa volúmica.

Pela determinação do valor médio ( $\bar{x}$ ) para o índice de qualidade a partir do valor da porosidade total verifica-se que o calcário D com cerca de 97,30 % apresenta o resultado mais elevado, de seguida surge o A com 94,40 % e um pouco mais abaixo aparece o C com 92,00 %.

Nos gráficos abaixo apresentam-se os valores médios calculados para as porosidades (Gráficos 7.5) e para as massas volúmicas (Gráfico 7.6) de modo a possibilitar uma melhor análise e comparação dos valores aqui apresentados e também das conclusões por nós retiradas deste ensaio. No Gráfico 7.7 é possível comparar os valores determinados para o índice de qualidade de cada calcário.

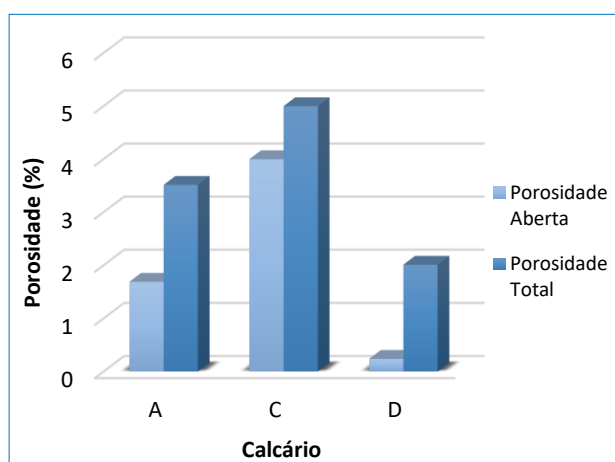


Gráfico 7.5 – Valor médio da porosidade aberta e total dos calcários em estudo.

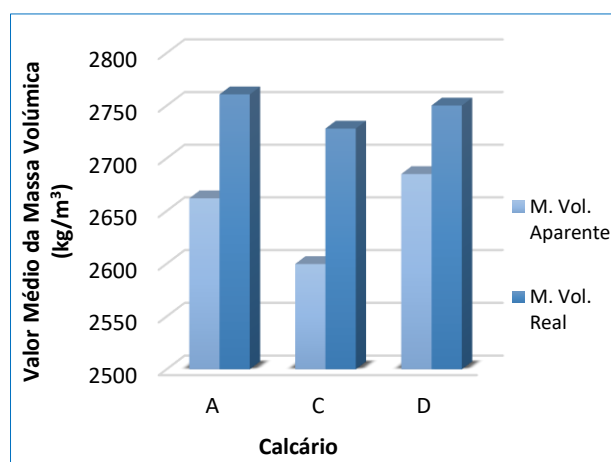


Gráfico 7.6 – Valor médio da massa volúmica real e aparente dos calcários em estudo.

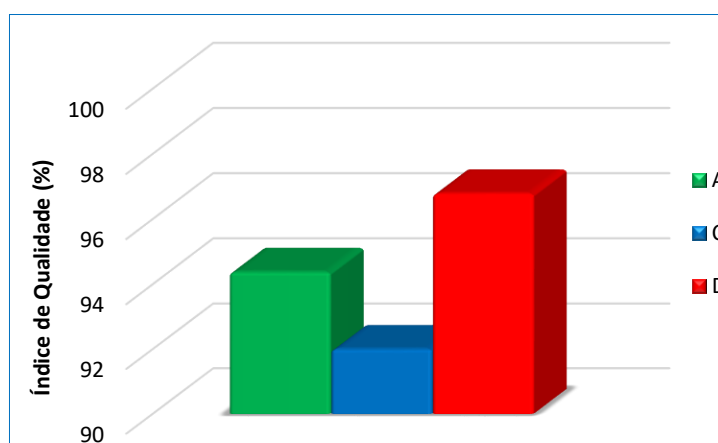


Gráfico 7.7 – Valor médio do índice de qualidade dos calcários em estudo.

### 7.6. Determinação da Absorção de Água por Capilaridade

Dado o papel nefasto que muitas vezes a água representa para as rochas, torna-se de extrema importância o estudo da dinâmica do movimento das soluções no interior dos materiais pétreos (Machado, 2012).

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

O preenchimento com água dos espaços intersticiais, poros ou canais existentes nas rochas, como resultado da tensão superficial, é uma característica específica de cada pedra natural e designa-se por absorção de água por capilaridade (Pinto *et al.*, 2006). Entenda-se por capilaridade o transporte de líquidos através dos poros pela existência de uma tensão superficial existente nos tubos capilares (Soares, 2014), a relação entre a cinética de absorção e a rede porosa traduz a forma como esta controla esse movimento (Machado, 2012).

Coeficientes de capilaridade baixos estão correlacionados com o predomínio de poros de maior tamanho, onde a força de sucção será menor e o volume a preencher é maior (Mosquera *et al.*, 2000, in Machado, 2012), pelo que será devido a este factor que a altura alcançada pela franja capilar será tanto maior quanto menor for o diâmetro dos poros (Esbert *et al.*, 1997, in Machado, 2012).

### 7.6.1. Procedimento do Ensaio

Para a determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade utilizou-se o método de ensaio que vem descrito na norma portuguesa NP EN 125:2000, que tem como princípio que após secagem dos provetes até massa constante, uma das suas faces ficará imersa em água cerca de 3 mm, sendo o aumento de massa sofrido avaliado em função do tempo.

Sendo um método que apenas é aplicado a pedras naturais que apresentem uma porosidade aberta maior que 1 %, optou-se ainda assim por estende-lo ao calcário D de modo a também poder comparar o seu comportamento neste parâmetro com os restantes calcários.

O ensaio iniciou-se com a colocação dos provetes num recipiente, sobre uns suportes adaptados (rede plástica) de modo a que as áreas de apoio das suas bases fossem tão pequenas quanto possíveis, adicionando-se a água ao provete de modo a imergir a base dos provetes até uma profundidade de cerca 3 mm (Fig. 7.6). Durante o ensaio, devido à evaporação, foi sendo adicionada água de modo a manter o nível de imersão constante.

Devido a tratarem-se de pedras pouco absorventes seleccionou-se uma gama de intervalos de tempo que se sequenciaram em 30, 60, 180, 480, 1440, 2880 e 4320 minutos, sendo o final do ensaio atingido quando a diferença entre duas pesagens sucessivas não fosse superior a 1% da massa de água absorvida pelo provete, o que no nosso caso e também como vem referido na norma, as pelo menos 7 medições revelaram-se suficientes.

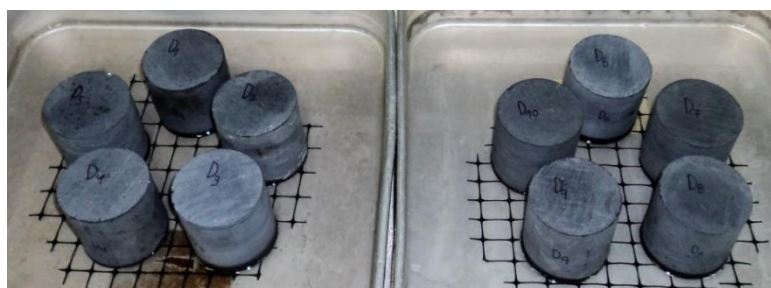


Figura 7.6 – Provetes submetidos ao ensaio de absorção de água por capilaridade.

### 7.6.2. Resultados Obtidos

Os resultados obtidos neste ensaio são apresentados sob a forma de um gráfico em que se representava a massa de água (g) dividida pela área da base imersa do provete ( $m^2$ ) em função

## Caracterização Físico-Mecânica

da raiz quadrada do tempo ( $s^{0.5}$ ). Como no nosso caso o coeficiente de correlação da recta de regressão ajustada aos 5 primeiros pontos medidos na primeira parte do gráfico (Gráfico 7.8) era superior a 0,90, o coeficiente de absorção de água por capilaridade ( $g/m^2/s^{0.5}$ ) é representado pelo declive da recta de regressão linear e pode ser calculado através do quociente entre a ordenada e a abcissa de qualquer ponto da recta, utilizando-se a seguinte Equação 7.18.

$$C = \frac{m_i - m_d}{A \times \sqrt{t_i}} \quad \text{Equação 7.18}$$

em que:

$C$  – é o coeficiente de absorção de água por capilaridade ( $g/m^2/s^{0.5}$ );

$m_i$  – são as massas sucessivas do provete durante o ensaio (g);

$m_d$  – é a massa do provete seco (g);

$A$  – é a área da face imersa em água ( $m^2$ );

$t_i$  – são os tempos decorridos desde o início do ensaio até ao momento da obtenção das sucessivas massas  $m_i$  (s).

No nosso caso para além da representação gráfica optou-se também pelo cálculo da média do coeficiente de absorção de água por capilaridade para os 5 primeiros pontos de medição de modo a se obter um valor médio de absorção para cada provete, sendo depois possível fazer um cálculo médio do conjunto dos 10 provetes de cada calcário. No ANEXO X – Absorção de Água por Capilaridade, apresentam-se os resultados obtidos para o valor médio do coeficiente de correlação da recta de regressão e para o coeficiente de absorção de água por capilaridade em termos do valor médio ( $\bar{x}$ ), do coeficiente de variação ( $v$ ), do desvio padrão ( $S$ ) e do valor máximo esperado ( $E_H$ ) para cada um dos calcários em estudo.

Tal como anteriormente observado, por serem evidentes as fracturas expostas em 2 provetes do calcário D, optou-se pela sua exclusão para o cálculo médio, o que não quer dizer que provetes dos outros tipos de calcário (A e C) também não possuíssem fissuras que afectassem esta determinação, mas, no entanto, não eram visíveis à vista desarmada. Contudo, devido à absorção anómala que alguns provetes apresentaram, existe uma elevada probabilidade de também neles existirem fracturas. Note-se que devido à coloração negra do calcário D as discontinuidades tornam-se mais notórias do que nos calcários brancos.

Dos resultados determinados podemos verificar que existem grandes diferenças em termos do valor médio ( $\bar{x}$ ) de absorção de água por capilaridade para estas 3 variedades de calcários. O calcário D é o que aqui apresenta o valor mais baixo com apenas  $0,15 g/m^2/s^{0.5}$  de absorção de água, o calcário A surge com uma absorção algo superior, cerca de  $0,70 g/m^2/s^{0.5}$  e já o calcário C aparece com uma absorção claramente mais elevada que os restantes, com sensivelmente  $3,12 g/m^2/s^{0.5}$ .

Com esta diferença do coeficiente de absorção de água por capilaridade não restam dúvidas que estamos na presença de universos pétreos bastante diferentes. De forma a melhor discernir a diferença dos valores determinados para este parâmetro, no Gráfico 7.9 abaixo são projectados os valores médios de absorção de água por capilaridade dos 3 calcários em estudo.

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

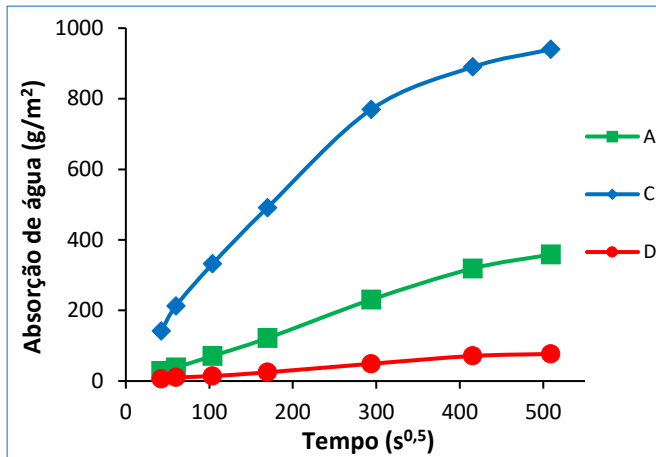


Gráfico 7.8 – Absorção de água por capilaridade para os 3 calcários em análise.

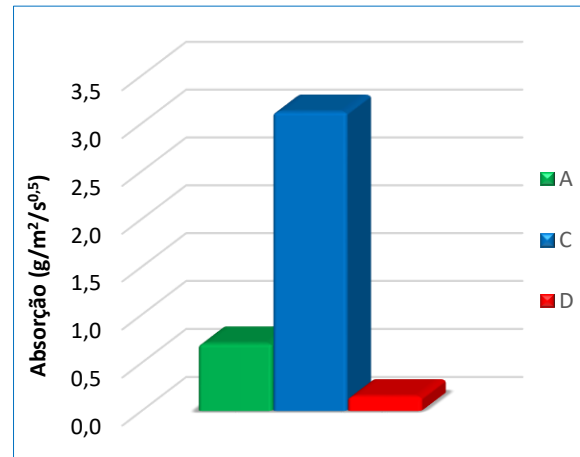


Gráfico 7.9 – Valor médio da absorção de água por capilaridade dos calcários em estudo.

### 7.7. Determinação da Velocidade de Propagação do Som

A determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons é um parâmetro que tem sido utilizado por diversos autores quer para caracterizar o estado de alteração das rochas, quer para a determinação indirecta da fissuração ou para o cálculo de índices de fissuração e de qualidade da rocha. Segundo Tourenq *et al.* (1971), este parâmetro conjuntamente com a porosidade permite-nos quantificar a porosidade de fissura e de poro de uma rocha (Antão, 2004).

O ensaio por ultra-som é um método não destrutivo que usa a energia do som de alta frequência para detectar defeitos ou discontinuidades no interior do material rochoso (Andreucci, 2008, in Pedrosa, 2013).

As ondas sonoras são perturbações mecânicas puramente dilatacionais que quando introduzidas num material se propagam de um ponto para outro transmitindo energia sem transporte de matéria, em que as partículas iniciam um movimento vibratório que se vai propagando às partículas vizinhas e progressivamente a todo o meio (Medeiros, 2007, in Ribeiro, 2013).

O ensaio de ultra-som inicia-se quando ondas de tensão são geradas e transmitidas por um transdutor electroacústico, o qual está em contacto com a superfície do corpo de prova. Quando os pulsos gerados são transmitidos e viajam através da pedra, eles são recebidos e convertidos em energia eléctrica por um segundo transdutor electroacústico. Posteriormente à recepção dos pulsos, um circuito electrónico permite medir o tempo de trânsito e, sabendo a distância entre os pontos de emissão e recepção, é possível então determinar a velocidade média no trecho de propagação, através da seguinte Equação 7.19 (Ramírez, 2015).

$$V = \frac{L}{T} \quad \text{Equação 7.19}$$

em que:

$V$  – é a velocidade de propagação da onda (m/s);

$L$  – é o comprimento percorrido (m);

$T$  – é o tempo de trânsito (s).

## Caracterização Físico-Mecânica

As ondas mecânicas são ondas que perturbam e se propagam através de um meio, requerendo para isso uma fonte de perturbação, um meio que possa ser perturbado e algum mecanismo físico pelo qual as partículas do meio possam influenciar outras partículas, como por exemplo as ondas sonoras (Gimenez, 2012). Dependendo dos factores condicionantes do meio pelo qual se propagam, as ondas mecânicas propagam-se por padrões diferenciados e que podem ser denominadas de:

Ondas de compressão – também conhecidas por ondas longitudinais ou ondas P, em que durante a sua propagação no material produzem regiões de compressão e de dilatação, caracterizando-se por um movimento das partículas na mesma direcção de propagação da onda (Fig. 7.7), fazendo com que este tipo de ondas apresentem a maior velocidade de propagação. Para um material elástico linear, homogéneo e isotrópico, a velocidade de compressão ( $V_P$ ) é relacionado com o seu módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e a densidade (Krautkrauer, 1990, in Ramíres, 2015);

Ondas de cisalhamento – também conhecidas por ondas transversais ou ondas S, caracterizam-se pela vibração perpendicular das partículas em relação à direcção de propagação da onda (Fig. 7.7), fazendo com que a sua velocidade ( $V_S$ ) seja mais lenta que a da onda P. Esta onda relaciona-se com a densidade do material e com o módulo de elasticidade ao cisalhamento (Krautkrauer 1990, in Ramíres, 2015).

As ondas longitudinais e transversais são os dois modos de propagação mais utilizados em ensaios de ultra-som, sendo idênticas às observadas aquando da ocorrência de um sismo, embora a fonte de energia seja distinta (Pedrosa, 2013).

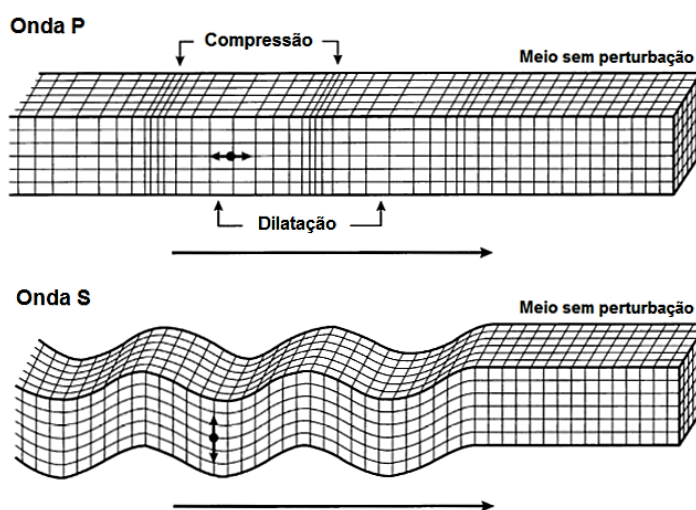


Figura 7.7 – Desenho esquemático do movimento das partículas nas ondas longitudinais (P) e transversais (S), (adaptado de Bolt, 1976, in Pedrosa, 2013).

Teoricamente a velocidade das ondas que se propagam ao longo do material rochoso dependem exclusivamente das suas propriedades elásticas e da sua densidade (Gomes, 2011), mas na prática verifica-se que também são influenciadas por parâmetros como a composição e orientação dos minerais (Guyader & Dinis, 1986, in Antão, 2004), do tipo de ligações entre os minerais, da porosidade, da fissuração, da resistência e do grau de alteração do material rochoso (Iliev, 1966; Kossev, 1970; in Santarém Andrade, 2004), e teor em água (El-Gohary, 2012, in Faim, 2014).

A velocidade das ondas longitudinais pode ser utilizada como um índice de classificação uma vez que o seu valor é indicativo da qualidade da rocha, correlacionando-se linearmente com a resistência à compressão uniaxial (Gomes, 2011). Também com a determinação desta

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

velocidade é possível quantificar a rocha quanto à sua qualidade, através da razão entre o valor medido de  $V_P$  na rocha estudada e o valor teórico máximo de  $V_P^*$  para aquele tipo de rocha com porosidade nula, utilizando-se para isso a Equação 7.20 que determina o índice de qualidade ( $IQ_V$ ). Podendo-se admitir como valor teórico máximo para a velocidade das ondas longitudinais para os calcários com uma porosidade nula de 6600 m/s (Tourenq & Archimbaud, 1974).

$$IQ_V = \frac{V_P}{V_P^*} \times 100 \quad \text{Equação 7.20}$$

em que:

$IQ_V$  – é o índice de qualidade da rocha (%);

$V_P$  – é a velocidade de propagação das ondas longitudinais medida no provete seco (m/s);

$V_P^*$  – é a velocidade de propagação das ondas longitudinais teórica para uma porosidade nula (m/s).

A rugosidade da superfície do material sob o qual se está a realizar a determinação das velocidades de ultra-sons é um factor que vai condicionar os resultados obtidos (perda de amplitude do eco a partir das discontinuidades, perda do poder de resolução e alargamento do feixe sónico) (Pedrosa, 2013), pelo que uma das condições necessárias para a obtenção de um valor fiável na medição através do ensaio de ultra-sons é o adequado contacto dos transdutores (emissor e receptor) ao elemento em estudo. Para o melhoramento deste contacto é recomendável o uso de um acoplante entre as faces do transdutor e da amostra a ensaiar, facilitando a transmissão de energia ultra-sónica entre estas, conseguindo-se assim ter uma boa ligação e isenta de ar.

### 7.7.1. Procedimento do Ensaio

O procedimento para a determinação da velocidade de propagação do som foi executado segundo a norma portuguesa NP EN 14579.

Para a determinação da velocidade de propagação das ondas longitudinais foram utilizados 20 provetes cilíndricos para cada um dos 3 calcários em estudo, sendo esta medição realizada segundo 3 condições dos provetes. Na primeira medição os provetes encontravam-se com um grau de humidade correspondente à secagem em estufa a cerca de 70 °C até massa constante (velocidade dos provetes secos), a segunda medição foi realizada em condições de saturação total dos provetes em água à pressão atmosférica (velocidade dos provetes saturados) e a última determinação foi realizada sob os provetes que estiveram sujeitos a 56 ciclos de gelo-degelo na realização deste mesmo ensaio (velocidade dos provetes após gelo-degelo), mas que para esta condição apenas se realizou a medição em 10 provetes de cada calcário tendo também estes sido secos em estufa a 70 °C até massa constante.

Na execução deste ensaio foi utilizado o Pundit Lab (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester) da marca Proceq, que corresponde a um equipamento de ultra-som portátil que se baseia no método de velocidade do pulso medindo o tempo de trânsito das ondas ultrassónicas. Este equipamento permite ser ligado a um computador que por meio de um programa informático permite obter em tempo real a forma da onda, possibilitando guardar os resultados automaticamente.

## Caracterização Físico-Mecânica

Para a determinação das ondas P foram utilizados um par de transdutores com uma frequência de 54 kHz, sendo um de emissão (gerador do impulso) e um de recepção (medidor da chegada do impulso).

Como já anteriormente foi referido, e apesar de todo o tratamento de alisamento que se realizou à superfície dos provetes, sendo o acoplamento dos transdutores com a superfície do material de extrema importância para se obter resultados fiáveis, optou-se pela utilização de vaselina, não só pela sua facilidade de aplicação e baixo custo, mas também porque é dos materiais que permite um melhor auxílio de transmissão entre as faces do transdutor e da amostra.

Durante a medição e de modo a não se adicionar uma pressão extra ao provete que poderia alterar o seu real valor para este parâmetro, optou-se por segurar os transdutores manualmente sendo a pressão aplicada sempre igual para todos os provetes ensaiados, estando estes apoiados num suporte de madeira criado para esse efeito. Ainda assim exercendo-se uma ligeira pressão de modo a aumentar a área de contacto por diminuição da área de vazios.

Este ensaio foi realizado segundo o método de contacto de transmissão directa em que se colocam os transdutores um de cada lado do provete em faces opostas, em que o transmissor projecta o feixe de som no material e este atravessa-o até à superfície oposta onde é captado pelo receptor. Esta é a disposição que permite a transmissão máxima do sinal entre os transdutores, uma vez que as ondas longitudinais se propagam essencialmente na direcção normal à face do transmissor.

### 7.7.2. Resultados Obtidos

Com o total das determinações realizadas procedeu-se ao cálculo da média ( $\bar{x}$ ), do desvio padrão ( $S$ ), do coeficiente de variação ( $v$ ) e do valor mínimo esperado ( $E_L$ ) da velocidade de propagação das ondas longitudinais ( $V_p$ ) para cada conjunto de provetes e segundo a condição em que foram ensaiados, secos, saturados e após gelo-degelo, sendo também calculado o valor do índice de qualidade ( $IQ_V$ ) a partir do valor da velocidade obtida nos provetes secos (ANEXO XI – Velocidade de Propagação do Som).

Dos valores médios obtidos com este ensaio verifica-se que estes 3 tipos de calcário apresentam valores relativamente semelhantes de propagação das ondas longitudinais, sendo que para todas as diferentes condições dos provetes em teste são os do calcário A que apresenta os valores mais elevados, de seguida o D e por último o C. Para o calcário A e C observa-se que há uma diminuição da velocidade em concordância com a sequência de condições dos provetes seco – saturado – gelo-degelo, já o calcário D apresenta precisamente o contrário, um aumento de velocidade para esta sequência de condições.

Ainda de referir que o calcário D é o que apresenta menor variação de valores entre as diferentes condições dos provetes, de seguida o A e por último o C com a maior diferença. Para cada calcário a variabilidade de valores entre as diferentes condições dos provetes poderá estar relacionado com as distintas porosidades de cada um deles, que afectará com diferente intensidade tanto o grau de saturação dos provetes como as consequências provocadas pelos ciclos de gelo-degelo.

Com a média calculada ( $\bar{x}$ ) para os provetes secos verifica-se que é o calcário A que apresenta a velocidade mais elevada, com cerca de 6595 m/s, um pouco mais abaixo o calcário D, com um valor a rondar os 6265 m/s, e logo a seguir, com cerca de 6230 m/s, o calcário C. Para o valor médio ( $\bar{x}$ ) dos provetes saturados o calcário A continua a ser o que apresenta uma velocidade



## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

maior, de 6575 m/s, segue-se o D com 6295 m/s e o C, com 6190 m/s. Nos valores médios ( $\bar{x}$ ) determinados para os provetes após estarem submetidos a ciclos de gelo-degelo verifica-se que é o calcário A que surge com o valor mais elevado, cerca de 6485 m/s, de seguida o D com 6310 m/s e com o valor mais baixo continua a ser o C com cerca de 6055 m/s.

Em termos do valor médio ( $\bar{x}$ ) determinado para o índice de qualidade ( $IQ_V$ ) destes calcários, verificam-se valores bastante elevados, em que o calcário A surge com cerca de 99,95 %, um valor um pouco acima dos relativamente próximos D e C, com aproximadamente 94,90 % e 94,40 %, respectivamente. Estes índices de qualidade mostram-se próximos comparativamente com os índices determinados através dos valores da porosidade total, embora não se verifique pela mesma ordem. De forma a melhor comparar os valores determinados com este ensaio, no Gráfico 7.10 são projectados os valores médios da velocidade de propagação das ondas longitudinais e no Gráfico 7.11 os valores encontrados para o índice de qualidade.

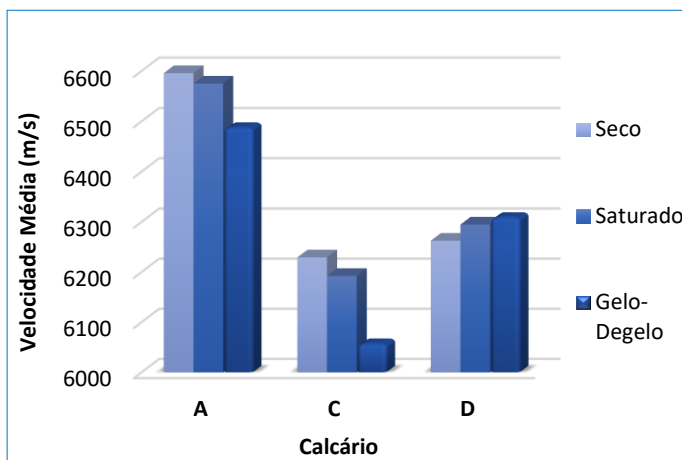


Gráfico 7.10 – Valor médio da velocidade das ondas longitudinais em condições de provetes secos, saturados e após 56 ciclos de gelo-degelo para cada calcário em estudo.

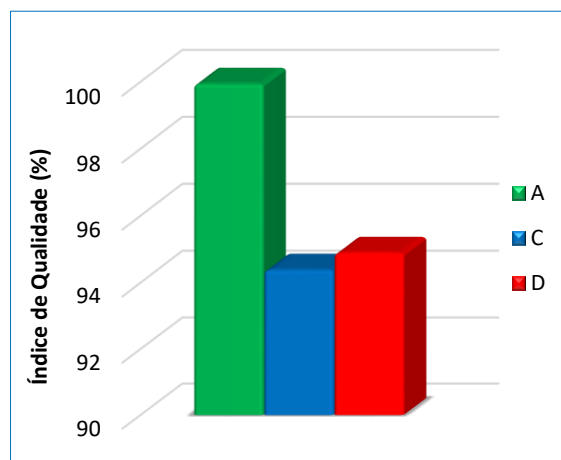


Gráfico 7.11 – Valor médio do índice de qualidade de cada um dos calcários em estudo obtido a partir do valor médio da velocidade das ondas longitudinais em provetes secos.

### 7.8. Determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico

As tensões geradas pela aplicação de forças a uma rocha induzem deformação, e caso estas ultrapassem um certo limite, pode levar à ruptura, dependendo da própria resistência da rocha. A deformabilidade de um material corresponde à propriedade que este tem para alterar a sua forma em resposta à actuação de forças, que no caso das rochas leva ao próprio deslocamento dos grãos que a suportam.

Em função da intensidade da força que é aplicada numa rocha a sua deformação poderá ser permanente (plástica) ou reversível (elástica), dependendo da forma como a força é aplicada e das características mecânicas da própria rocha. O comportamento tensão – deformação é definido pela relação entre a tensão que é aplicada ao corpo de prova e a correspondente deformação resultante da sua acção.

## Caracterização Físico-Mecânica

A teoria da elasticidade baseia-se no princípio do comportamento mecânico de um material quando submetido a uma carga externa, em que a deformação corresponde a uma variação do volume ou comprimento, sendo uma razão adimensional (Romanelli, 2003, in Piauilino, 2014).

Os módulos de elasticidade são parâmetros fundamentais para a engenharia de materiais, uma vez que estão ligados à descrição de várias outras propriedades mecânicas, como por exemplo a tensão de ruptura (Consolino & Pereira, 2010). São propriedades intrínsecas das rochas e que descrevem a relação entre a tensão e a deformação no regime elástico e que dependem da própria elasticidade dos minerais que a constituem, estrutura, granulometria, descontinuidades, porosidade, grau de saturação, etc. As rochas muito compactas e com grão fino mostram módulos de elasticidade elevados, já as rochas pouco coerentes e muito porosas apresentam módulos de elasticidade baixos.

Para o mesmo tipo de rocha e sob igual valor de tensão aplicada, aquela que tiver um módulo de elasticidade mais alto tenderá a ter um valor mais baixo de deformação unitária, e, portanto, será mais consistente (Jimeno, 1996).

Os métodos dinâmicos permitem obter informações tanto quantitativas (módulos elásticos) quanto qualitativas sobre a integridade de um corpo de prova, sendo que depois de analisados podem ser utilizados em outros ensaios. Possuindo a vantagem de poderem ser utilizados em pequenas amostras, serem rápidos e não-destrutivos, com aplicação de baixas cargas.

O princípio dos métodos dinâmicos consiste em calcular os módulos elásticos a partir das frequências naturais de vibração do corpo de prova e dos seus parâmetros geométricos, estas frequências em conjunto com as dimensões e a densidade do material, possuem uma relação unívoca com os módulos elásticos (Consolino & Pereira, 2010). Este princípio é corroborado pela Lei de Hooke, que considera que quando um corpo é submetido a uma tensão sofrerá uma deformação linear ou volumétrica directamente proporcional ao esforço aplicado, podendo estes voltarem à sua forma original ou sofrer deformações irreversíveis (Ivo Alves, 2005).

A velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas transversais ( $V_s$ ) e longitudinais ( $V_p$ ) estão relacionadas com a resistência e a deformabilidade dos materiais rochosos, pelo que através das suas determinações é possível calcular os módulos de deformabilidade elástica dinâmicos, módulo de elasticidade ou de Young ( $E_d$ ) e o coeficiente de Poisson ( $\nu_d$ ).

Para definição do módulo de Young ( $E$ ) podemos considerar um cilindro deitado de comprimento ( $l$ ) e área da base ( $A$ ), que quando uma força distensiva é aplicada paralelamente ao eixo do cilindro, o esforço aplicado resultará em um incremento do comprimento ( $\Delta l$ ) e numa redução do diâmetro do mesmo (Fig. 7.8) (Ivo Alves, 2005). Podendo-se definir este módulo como a relação linear elástica entre a tensão aplicada e a correspondente extensão verificada segundo a direcção de aplicação dessa mesma tensão.

Já a razão entre a deformação longitudinal e transversal verificada pela aplicação de igual tensão é chamada de coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), sendo uma constante que define o comportamento elástico do material rochoso, descreve a proporcionalidade entre as deformações transversais e a correspondente extensão axial do provete (Gomes, 2001). Esta razão que relaciona duas propriedades do material funciona como um indicador litológico muito mais diagnóstico do que qualquer informação das ondas de corpo (Kearey *et al.*, 2009, in Piauilino, 2014).

Segundo Vallejo e Ferrer (2011) in Gomes (2011), os valores dos módulos de elasticidade dinâmicos são geralmente superiores aos correspondentes módulos estáticos obtidos por ensaio de resistência à compressão uniaxial, uma vez que a aplicação de tensões de baixa magnitude resulta num comportamento da rocha puramente elástico. Através da determinação da

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

velocidade de propagação das ondas longitudinais e transversais é possível obter-se os módulos dinâmicos pelas seguintes Equações 7.21 e 7.22:

$$E_d = \frac{\rho_b V_S^2 (3V_P^2 - 4V_S^2)}{V_P^2 - V_S^2} \quad \text{Equação 7.21}$$

em que,

$E_d$  – é o módulo de Young (GPa);

$\rho_b$  – é a massa volúmica aparente ( $\text{kg/m}^3$ );

$V_P$  – é a velocidade de propagação das ondas longitudinais (m/s);

$V_S$  – é a velocidade de propagação das ondas transversais (m/s).

$$v_d = \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)} \quad \text{Equação 7.22}$$

em que,

$v_d$  – é o coeficiente de Poisson;

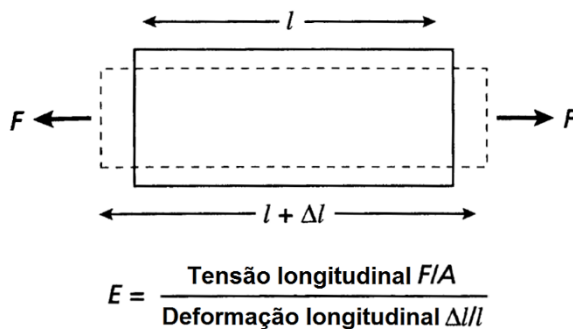


Figura 7.8 – Relação entre a tensão e a deformação para o módulo de elasticidade de Young, (adaptado de Piauilino, 2014).

### 7.8.1. Procedimento do Ensaio

Uma vez que para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico é necessário a velocidade de propagação das ondas P e S, simultaneamente à medição da velocidade de propagação das ondas longitudinais procedeu-se também à determinação das ondas transversais, tendo-se usado o mesmo procedimento na determinação da velocidade destas duas ondas.

Para a obtenção da velocidade de propagação das ondas transversais foi utilizado um tipo de transdutores distinto do usado para a medição das ondas longitudinais, sendo que estes correspondem a transdutores de 250 kHz específicos para a determinação das ondas de cisalhamento (Fig. 7.9). Note-se que a determinação das ondas transversais é bastante mais complexa devido ao facto de por vezes o registo dos tempos da sua chegada se mascararem com os registos de chegada da segunda onda longitudinal.

Após o ensaio de cada provete, o correspondente gráfico de registo com a propagação das ondas ficava disponível no computador para imediata análise, sendo então possível marcar manualmente o tempo de chegada da respectiva onda S, caso não fosse possível definir este

## Caracterização Físico-Mecânica

tempo procedia-se a novos ensaios até se conseguir com relativa certeza determinar o tempo da sua chegada (Fig. 7.10).

Figura 7.9 – Metodologia do ensaio para determinação da velocidade de propagação das ondas S com transdutores de 250 kHz, onde também se podem observar os transdutores de 54 kHz utilizados para a determinação da velocidade de propagação das ondas P.

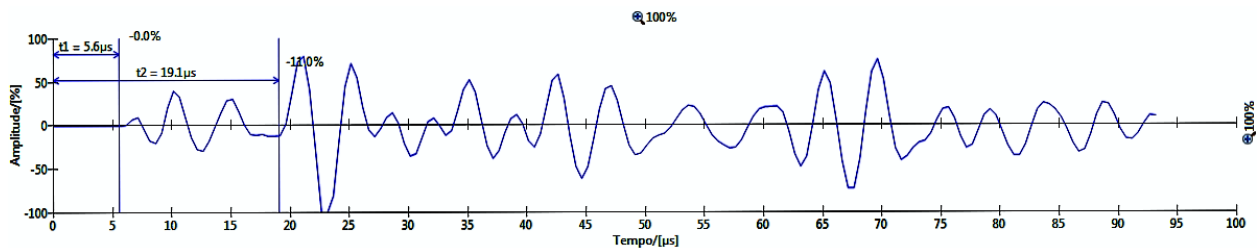
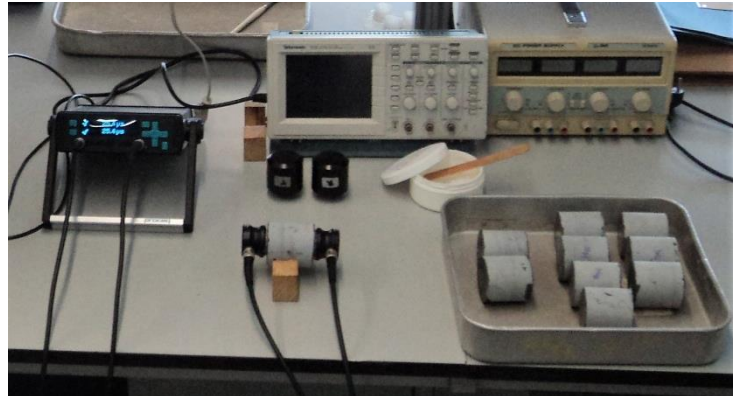


Figura 7.10 – Gráfico do registo da propagação das ondas ultra-sónicas, onde está marcado o momento da chegada da onda S.

### 7.8.2. Resultados Obtidos

Já com a totalidade dos valores da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas procedeu-se ao cálculo do coeficiente de Poisson e do módulo de Young para cada provete, sendo assim possível determinar para cada calcário o valor médio ( $\bar{x}$ ), o desvio padrão ( $S$ ), o coeficiente de variação ( $v$ ) e o valor mínimo esperado ( $E_L$ ), segundo as três diferentes condições, seco, saturado e após gelo-degelo. Os resultados obtidos são apresentados no ANEXO XI – Velocidade de Propagação do Som.

Dos valores médios ( $\bar{x}$ ) obtidos para os provetes secos verifica-se que relativamente ao módulo de Young surgem valores muito próximos entre estes tipos de calcários, ainda assim são os do tipo D com 54,90 GPa que surgem com o valor mais elevado, em seguida o A com cerca de 53,65 GPa e depois o C com aproximadamente 51,75 GPa. No que respeita ao valor médio ( $\bar{x}$ ) do coeficiente de Poisson surge o calcário A com o valor mais elevado, cerca de 0,40 de seguida o C com 0,39 e depois o D com 0,38.

Para a média ( $\bar{x}$ ) do módulo de Young dos provetes sob condições de saturação verifica-se a mesma sequência de resultados que em secos, com o calcário D a surgir com o valor mais elevado, cerca de 56,60 GPa, um pouco menor o A com 54,70 GPa e só depois o C com 50,90. Para o valor médio ( $\bar{x}$ ) do coeficiente de Poisson os valores são iguais aos determinados nos provetes secos.

Para os provetes que estiveram submetidos aos ciclos de gelo-degelo encontramos no valor médio ( $\bar{x}$ ) do módulo de Young maiores disparidades entre os diferentes calcários do que o

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

observado anteriormente nos provetes secos e saturados. Para este parâmetro surge o calcário A com o valor mais elevado, cerca de 68,45 GPa, significativamente mais elevado que o D e o C, com 49,25 e 47,85 GPa, respectivamente. Já para o valor médio ( $\bar{x}$ ) do coeficiente de Poisson voltamos a verificar que existem diferenças mais significativas do que em relação às outras condições dos provetes, com o D a surgir com 0,40, o C com 0,39 e o A com 0,35.

Podemos concluir que estes calcários apresentam valores semelhantes para o módulo de Young e de coeficiente de Poisson, verificando-se as maiores diferenças quando eles são sujeitos à acção do gelo e que se deverá às diferentes alterações que este provoca em cada um deles. Ainda que um pouco menores que os valores do módulo de Young obtidos com o Martelo de Schmidt ( $E_{ms}$ ), os valores que foram aqui determinados apresentam a mesma ordem de valores entre os 3 tipos de calcários.

Nos gráficos abaixo podemos comparar os resultados obtidos com este ensaio, onde são projectados os valores médios do módulo de Young (Gráfico 7.12) e do coeficiente de Poisson (Gráfico 7.13). Como se pode observar por estes, não é possível estabelecer qualquer tendência do comportamento dos calcários em relação às diferentes condições dos provetes.

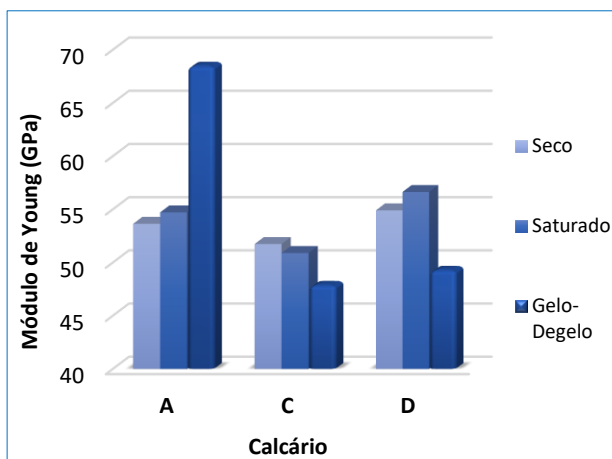


Gráfico 7.12 – Valor médio do módulo de Young em condições de provetes secos, saturados e após 56 ciclos de gelo-degelo para cada calcário em estudo.

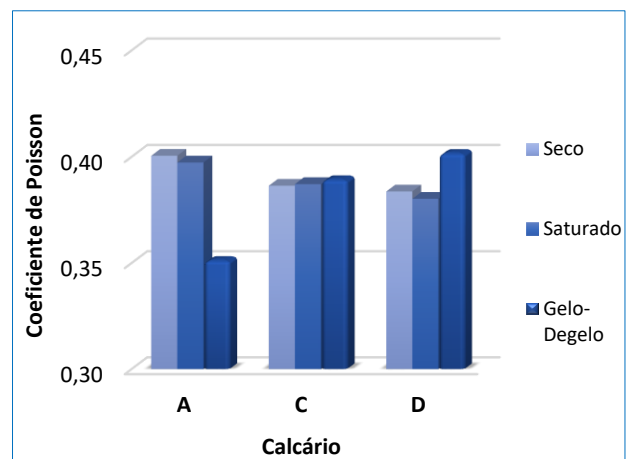


Gráfico 7.13 – Valor médio do coeficiente de Poisson em condições de provetes secos, saturados e após 56 ciclos de gelo-degelo para cada calcário em estudo.

### 7.9. Determinação da Resistência ao Desgaste por Abrasão

A resistência ao desgaste é a propriedade que a rocha possui de resistir à remoção por abrasão dos constituintes da sua superfície, estando dependente da dureza dos seus minerais e do grau de coesão dos seus componentes, que por sua vez está associado ao tamanho e arranjo dos grãos assim como ao seu grau de alteração (Moura, 2012).

Segundo Zum-Gahr (1987) in Silveira (2007) o desgaste por abrasão caracteriza-se por um movimento relativo entre um corpo duro e uma superfície mais macia, neste processo o corpo duro pode ser fracturado e a superfície mais branda pode ser trincada e/ou deformada, sendo tais materiais removidos das suas superfícies e resultando numa perda de volume. Segundo este mesmo autor o desgaste pode ser classificado em relação ao tipo de contacto, podendo este ser realizado a dois e a três corpos. O contacto a dois corpos ocorre quando um abrasivo desliza ao

## Caracterização Físico-Mecânica

longo de uma superfície, já o contacto a três corpos dá-se quando um abrasivo desliza entre duas superfícies, na Figura 7.11 pode-se observar de forma esquemática estes dois tipos de processos.

A pedra natural aplicada em pavimentos exteriores e interiores sofre, por abrasão, um desgaste variável em função do tipo e da intensidade do tráfego a que está sujeita, mas que também depende do seu comportamento face a esse tipo de utilização.

Uma rocha que é mais resistente ao desgaste por abrasão que outra, será mais apropriada para ser empregue em pavimentos que vão estar submetidos a tráfego intenso, pelo contrário, os seus custos de transformação, elaboração e polimento serão maiores (Jimeno, 1996).

A resistência ao desgaste de uma pedra natural é passível de ser determinada pela medição do sulco produzido na sua superfície por um disco rotativo, em condições definidas e com auxílio de material abrasivo. Este ensaio foi originalmente desenvolvido para ladrilhos cerâmicos utilizando-se uma máquina Capon, mas que demonstrada a sua adequabilidade também tem sido usado como método de medida da abrasão em rochas ornamentais pelo Comité Europeu de Normalização (Moreiras *et al.*, 2006).

A norma portuguesa NP EN 14157:2007 que regulamenta o ensaio de resistência ao desgaste para pedra natural, define três métodos distintos para avaliar esta propriedade: (i) ensaio de desgaste com o disco largo - Capon (método referência); (ii) ensaio de desgaste Böhme; (iii) ensaio de desgaste Amsler (mais vulgarizado em Portugal antes do método de Capon se tornar o de referência).

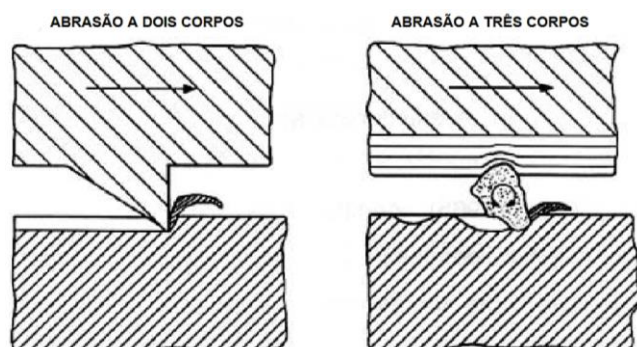


Figura 7.11 – Esquema de desgaste por abrasão a dois e três corpos, (adaptado de Silveira, 2007).

### 7.9.1. Procedimento do Ensaio

Apesar de se terem realizado provetes específicos para a realização do ensaio de desgaste através do método Capon, a indisponibilidade deste equipamento levou a que tivessem sido realizados novos provetes que se adequassem a um protótipo executado segundo a norma ASTM G 65 – 80, específico para o ensaio de desgaste em metais, mas que, no entanto, tem o mesmo princípio de funcionamento que o nosso método referência para pedras naturais. Este ensaio foi realizado no laboratório de Ensaios e Desgaste & Materiais (LED&MAT) do Instituto Pedro Nunes.

Neste ensaio tentou-se adaptar as condições do ensaio referência (Capon) para este equipamento de forma a tornar os resultados do nosso ensaio mais fidedignos e que em todo o caso permite uma comparação entre os valores de desgaste obtidos entre estes calcários.

De referir que para esta metodologia de ensaio não se procedeu à medição do sulco produzido na superfície de cada placa de pedra, mas sim da sua massa seca em estufa, antes e após o

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

ensaio. Com esta diferença de massas pode-se assim determinar a quantidade de material removido por abrasão de cada provete e uma vez que se determinou a massa volúmica aparente de cada calcário, também foi possível fazer-se o cálculo em termos da perda de volume. Este procedimento torna-se mais rigoroso e mais fácil de executar do que a medição da corda das calotes deixadas nos provetes.

Na realização deste ensaio o provete foi pressionado, por um contra-peso de 248 g que exercia uma carga de 22,5 N, contra o disco em aço que tinha um diâmetro de 200 mm e uma largura de 11,4 mm que rodava a uma velocidade de 75 rotações por minuto. Na zona de contacto do disco com o provete era adicionado como material abrasivo alumina seca de 250  $\mu\text{m}$  e que caía com um caudal de 486 g/min, sendo o tempo de ensaio para cada provete de sensivelmente 1 minuto (Fig. 7.12).

Sendo então possível com as seguintes equações fazer-se o cálculo da quantidade de material removido de cada provete, em termos da massa (Equação 7.23) e do volume (Equação 7.24).

$$M_p = m_i - m_f \quad \text{Equação 7.23}$$

em que:

$M_p$  – é a massa perdida por abrasão (g);

$m_i$  – é a massa seca inicial do provete (g);

$m_f$  – é a massa seca final do provete (g).

$$V_p = \frac{m_i - m_f}{\rho_b} \times 1000 \quad \text{Equação 7.24}$$

em que:

$V_p$  – é o volume perdido por abrasão ( $\text{mm}^3$ );

$\rho_b$  – é a massa volúmica aparente de cada provete ( $\text{g/cm}^3$ ).

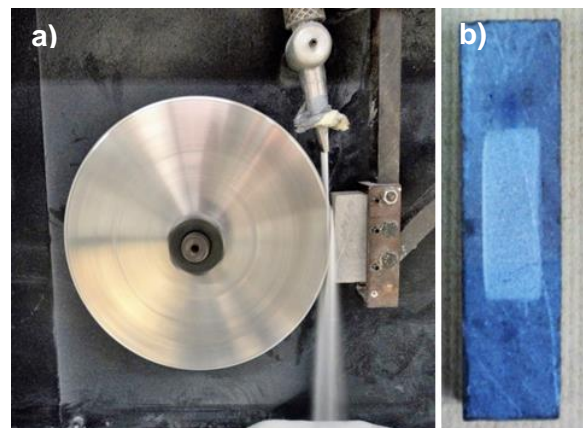


Figura 7.12 – Ensaio de desgaste por abrasão: a) pormenor do contacto da roda de aço com o provete e da queda do material abrasivo; b) sulco característico deixado nos provetes.

### 7.9.2. Resultados Obtidos

No ANEXO XII – Resistência ao Desgaste por Abrasão, apresentam-se os resultados obtidos para o desgaste de cada calcário em estudo, em termos do valor médio ( $\bar{x}$ ), do coeficiente de variação ( $v$ ), do desvio padrão ( $S$ ) e do valor máximo esperado ( $E_H$ ), tanto para perda de massa

## Caracterização Físico-Mecânica

como para a perda de volume, onde também é discriminado os valores individuais de cada provete. Nos Gráficos 7.14 (perda de massa) e 7.15 (perda de volume) permite uma melhor percepção da diferença entre os valores determinados para cada calcário.

Dos valores da resistência ao desgaste determinados por este método de ensaio podemos averiguar que não existem diferenças significativas do valor médio ( $\bar{x}$ ) para a massa perdida ( $M_p$ ) entre estes calcários, verificando-se mesmo que ocorre apenas uma diferença de 0,01 g entre os calcários do tipo A e C. Temos então 0,46 g de massa perdida para o calcário A e 0,47 g para o calcário C, já o calcário D surge com um valor ligeiramente superior, com 0,52 g de material removido.

Para a perda de volume ( $V_p$ ) que foi calculada com base na massa volúmica aparente de cada calcário, observa-se igual sequência para os valores médios ( $\bar{x}$ ) de desgaste, em que o do tipo A mantém-se como o mais baixo com apenas 172 mm<sup>3</sup> de volume de material perdido, ligeiramente acima surge o C com 179 mm<sup>3</sup> e, já com um valor um pouco mais elevado, o D com cerca de 200 mm<sup>3</sup> de material removido.

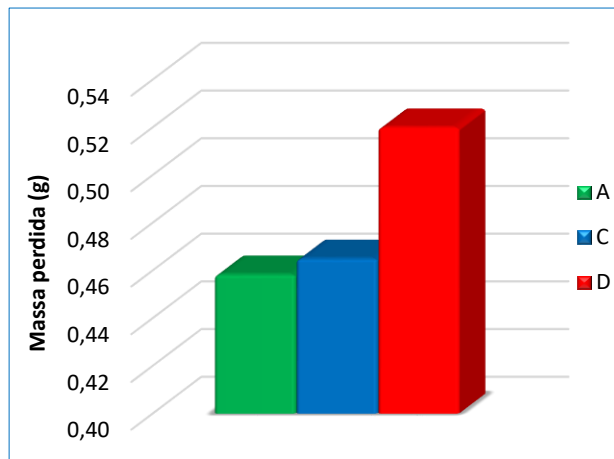


Gráfico 7.14 – Valor médio da perda de massa por abrasão no ensaio de desgaste para cada calcário em estudo.

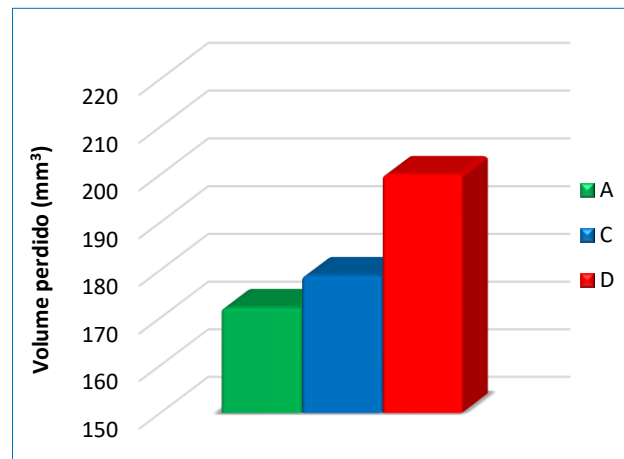


Gráfico 7.15 – Valor médio da perda de volume por abrasão no ensaio de desgaste para cada calcário em estudo.

### 7.10. Determinação da Resistência ao Desgaste em Meio Aquoso

O ensaio de desgaste em meio aquosos (*Slake Durability Test*) tem sido bastante utilizado para caracterizar o comportamento de material rochoso relativamente à sua resistência ao desgaste por atrito em meio aquoso quando submetido a ciclos de secagem e humedecimento, empregue sobretudo em rochas brandas.

Definindo-se a durabilidade das rochas ornamentais como sendo a medida da sua capacidade de manter as suas características essenciais e distintivas face a uma agressão demonstrando a sua resistência à degradação, podendo manter as suas características durante um determinado tempo que poderá ser maior ou menor dependendo do ambiente e do uso da rocha em questão. O índice de durabilidade ( $I_d$ ) é determinado (Equação 7.25) com base na perda de massa verificada após imersão e rotação da amostra no dispositivo de ensaio, determinando-se assim uma resistência ao desgaste.



$$Id = \frac{m_f}{m_i} \times 100 \quad \text{Equação 7.25}$$

em que,

$Id$  – é o índice de durabilidade (%);

$m_i$  – é a massa inicial da amostra (g);

$m_f$  – é a massa da amostra após o ciclo de desgaste (g).

Tendo sido inicialmente proposto para rochas argilo-xistosas (Ferreira & Antão, 2006), este ensaio consiste em submeter o material rochoso previamente fragmentado a ciclos normalizados de secagem, umidificação e ação mecânica.

Segundo Santi (1998), a interação entre o material rochoso e a água é feita com o intuito de provocar a desagregação, a desintegração das partículas e a criação de fissuras e fracturas, definindo-se assim a susceptibilidade do material rochoso brando à alteração quando se encontra exposto às condições atmosféricas (Santarém Andrade, 2004).

Este ensaio de desgaste em meio húmido foi originalmente desenvolvido e finalmente estabelecido por Franklin & Chandra (1972), Gamble (1971) sugeriu a adopção de um segundo ciclo de desgaste ( $Id_2$ ), tendo ainda concluído que a durabilidade aumenta linearmente com o peso específico e inversamente com o teor em água natural (Santarém Andrade, 2004). Geralmente é este segundo ciclo de desgaste que é utilizado para a classificação do material rochoso (ISRM, 1979b, in Pinho, 2003). A taxa de deterioração do material rochoso está subordinada à sua composição mineralógica e propriedades físico-mecânicas, características estas que são reguladoras do comportamento geomecânico da pedra natural e que por sua vez estão exclusivamente dependentes da sua formação geológica e do grau de alteração.

Este ensaio tem ainda a vantagem de facilmente permitir adaptações quer em relação às condições de utilização do material, quer em relação às próprias características de execução do ensaio. Vários autores (Kikuchi, K. *et al.* (1986); Lee, S. G. (1987); Lee, S. G. & Freitas, M. H., (1988)) têm também referido a necessidade de aumentar a duração do ensaio em rochas muito resistentes e/ou sugerido a utilização de tambores com malhas de dimensões ajustadas ao material em estudo (Ferreira & Antão, 2006).

### 7.10.1. Procedimento do Ensaio

Com as necessárias adaptações considerou-se que este método de ensaio poderia mostrar-se adequado na caracterização da durabilidade das pedras em estudo, não como um meio de classificação directo, mas a título experimental de modo a perceber-se se este ensaio permitiria a obtenção de índices de desgaste significativos que possibilitassem a comparação entre os valores obtidos para cada calcário e até estabelecer algum tipo de correlação com o ensaio de desgaste por abrasão já realizado.

Depois de lavados e secos em estufa à temperatura de 105 °C até atingirem massa constante, procedeu-se à pesagem individual de cada provete. Em foram colocados 5 provetes em cada um dos tambores com uma malha de 2 mm de abertura e procedeu-se ao ciclo de desgaste em meio aquoso durante 10 minutos, no qual foram realizadas 200 rotações (Fig. 7.13). Terminado este ensaio voltou-se a repetir todo o processo de secagem e pesagem individual dos provetes e tornou-se a repetir o ensaio, um 2º ciclo de iguais características e que juntamente com o 1º fez 400 rotações.

## Caracterização Físico-Mecânica

Estando-se a trabalhar com rochas relativamente duras onde o desgaste obtido era bastante reduzido, optou-se por executar um 3º ciclo de desgaste ( $Id_3$ ) durante 1 hora e que juntamente com os anteriores finalizou 1600 rotações, de modo a conseguir-se variações de desgaste mais significativas. De referir que devido à geometria paralelepípedica que dificultava o rolamento dos provetes, o desgaste sofrido por estes se devia não só ao atrito, mas também a alguns choques que ocorriam entre eles.

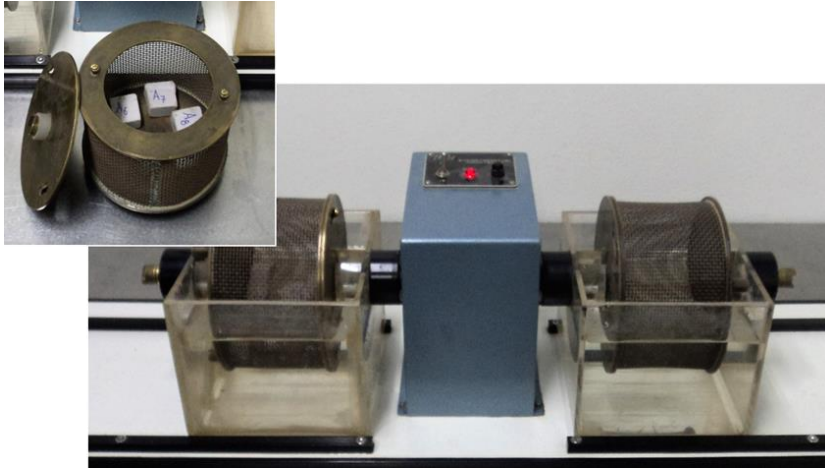


Figura 7.13 – Equipamento utilizado no ensaio de desgaste em meio húmido.

### 7.10.2. Resultados Obtidos

No ANEXO XIII – Resistência ao Desgaste em Meio Aquoso, apresentam-se os resultados obtidos para cada calcário em estudo, no que se refere ao valor médio ( $\bar{x}$ ), coeficiente de variação ( $v$ ), desvio padrão ( $S$ ) e valor mínimo esperado ( $E_L$ ), em termos de índice de durabilidade ( $Id$ ). Neste anexo encontram-se também discriminados os valores individuais de cada provete assim como os gráficos com as suas tendências de desgaste.

Pelo que se pode analisar dos valores de desgaste obtidos com este ensaio percebe-se que no primeiro e segundo ciclo de desgaste, 200 e 400 rotações, respectivamente, o calcário C é o que exibe uma maior resistência, seguido do A e por último do D, sendo, no entanto, bastante idênticos. Já quando se procedeu ao 3º ciclo de ensaio perfazendo 1600 rotações verifica-se uma maior diferença de valores quanto ao desgaste sofrido e que há uma troca de posições, passando o calcário A a apresentar o maior valor médio do índice de durabilidade com cerca de 99,87 %, seguido do C com 99,45 % e do D que continua a ter o menor índice de durabilidade, com 99,37 % (Gráfico 7.16).

Não sendo métodos de ensaio que utilizem o mesmo princípio de desgaste, mas ainda assim se fizemos uma comparação entre os valores obtidos no ensaio de desgaste por abrasão e este ensaio, podemos verificar que a ordem dos calcários em função do desgaste sofrido segue a mesma sequência nos dois ensaios.

### 7.11. Determinação da Resistência à Cristalização de Sais

A alterabilidade pode ser definida como a susceptibilidade que uma rocha tem a se alterar em função do tempo, segundo Becerra e Costa (2007) a deterioração provocada por determinados

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

agentes pode ser avaliada por meio dos ensaios de alteração acelerada, dentro dos quais a exposição à cristalização de sais por meio de ciclos de imersão de provetes em soluções seguida de secagem em estufa, simulando a acção de um dos principais agentes químicos que ocasionam deterioração em rochas com aplicação ornamental.

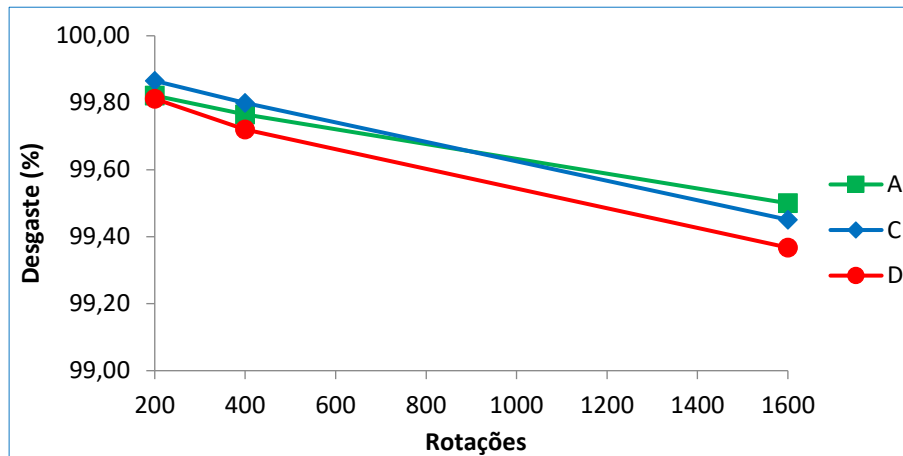


Gráfico 7.16 – Resistência de cada calcário ao desgaste em meio aquoso em função do número de rotações.

Este ensaio permite avaliar a resistência relativa aos danos estruturais provocados pela cristalização de sais em pedras naturais, principalmente em zonas costeiras onde esta acção se torna mais evidente, no entanto não deve ser usada isoladamente devendo os resultados obtidos ser ponderados com outras propriedades visando a avaliação da durabilidade da pedra, nomeadamente a resistência ao gelo (Pinto, 2006).

Para causar danos os sais necessitam de estar presentes no interior da estrutura da rocha, processo que só ocorre através da circulação de água no seu interior e na qual os sais poderão estar dissolvidos. Estes sais para além de se poderem encontrar dissolvidos nas soluções circulantes, também poderão estar incorporados na própria constituição da rocha ou depositados na sua rede porosa (Nap & Lalane, 2010, in Machado, 2012).

Os factores que condicionam a cristalização de sais no interior das rochas estão relacionados com a sua porosidade, o tamanho dos poros, as propriedades do sal (solubilidade, expansão de volume e pressão de cristalização), o transporte e grau de saturação da solução, o local da cristalização e a resistência do material pétreo à pressão de cristalização (Rodriguez-Navarro & Doehne, 1999; Benavente *et al.*, 2007<sup>a</sup>; Yu & Oguchi, 2010; in Machado, 2012).

Segundo Begonha (2011) a acção resultante da cristalização de minerais de sais solúveis a partir de infiltrações é tanto mais destrutiva quanto maiores as suas solubilidades e higroscopicidade, quanto maiores as forças de cristalização que desenvolvem no seu processo de crescimento, bem como quanto maior o número de ocorrências de ciclos de cristalização/dissolução ou cristalização/deliquescência. Ainda segundo este autor, uma rede porosa bem interligada possibilita a rápida e eficaz transferência de soluções salinas por capilaridade a partir do solo ou da chuva e a fortes fluxos de evaporação dessas soluções.

A pressão de cristalização vai depender do grau de saturação da solução e da rede porosa, sendo maior em poros de menor tamanho e em soluções sobressaturadas (Benavente *et al.*, 2004a, 2004b; Steiger, 2005a; in Machado, 2012), pelo que daqui se conclui que rochas mais porosas com poros de menor dimensão sofrem maiores danos do que rochas menos porosas e com poros de maior tamanho, sendo que a cristalização e expansão de um sal no seu interior não irá gerar grandes tensões e consequentemente grandes danos.

## Caracterização Físico-Mecânica

Por sua vez Rodriguez-Navarro *et al.* (1999) vão um pouco mais além e consideram que uma rocha que apresente grande porção de micróporos, conectados com poros de maior dimensão e que funcionam como reservatórios de solução, alimentando os poros de menor tamanho, que atingem a sobressaturação mais facilmente acabando por ser os locais com maior propensão à cristalização de sais, conduzindo à rotura da rocha.

Sendo o sulfato de sódio um dos sais mais agressivos na natureza, é o mais indicado para a realização de ensaios de envelhecimento acelerado. Este sal pode surgir sob a forma de duas fases estáveis, a ternardite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) e a mirabilite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), em função da temperatura e da humidade, a ternardite cristaliza directamente a partir da solução a temperaturas superiores a  $34,5\text{ }^\circ\text{C}$ , já a mirabilite a temperaturas mais baixas e condicionada pela humidade relativa (Grossi *et al.*, 1997, in Machado, 2012). A dissolução da ternardite produz uma solução sobressaturada de mirabilite (Flatt, 2002; Steiger, 2005<sup>a</sup>; in Machado, 2012) que por sua vez se cristaliza a partir desta solução implicará um grande aumento de volume, superior a 300 % e que será o principal factor para a acção destrutiva deste sal (Bland & Rolls, 1998; Flatt, 2002; in Machado, 2012).

A realização de repetidos ciclos de dissolução/cristalização deste sal terá consequências quer nas propriedades petrográficas, como a porosidade, quer nas propriedades mecânicas, como a resistência à compressão, acelerando o processo de deterioração das pedras naturais e levando mesmo à sua desintegração.

### 7.11.1. Procedimento do Ensaio

O ensaio de resistência à cristalização de sais (Fig. 7.14) foi executado segundo a norma portuguesa NP EN 12370:2001, efetuado com o objetivo de avaliar a resistência à cristalização dos sais nas pedras naturais e os danos causados pela cristalização destes sais nas pedras de calçada em estudo. Para a concretização deste ensaio os provetes foram bem lavados de forma a retirar qualquer material solto que se encontrasse preso a eles.

Durante a execução do ensaio foi realizado o controle das mudanças apresentadas pelas superfícies dos provetes de modo a registar qualquer alteração que surgisse ao nível da cor, do estado de coesão e do aparecimento de fissuras.



Figura 7.14 – Embebição dos provetes na solução salina onde se encontravam com um afastamento entre si de pelo menos 10 mm e 20 mm relativamente às paredes do recipiente e com o nível da solução a situar-se cerca de 8 mm acima do seu topo. Neste procedimento também se utilizou um multímetro para controlo da temperatura da solução.

Após a realização dos 15 ciclos do ensaio os provetes foram colocados em água durante 24 horas e lavados em água corrente, sendo depois colocados na estufa a  $105\text{ }^\circ\text{C}$  até atingirem massa constante de modo a obter-se a sua massa seca após o ensaio. Para cada provete o

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

resultado é expresso sob a forma de percentagem de variação de massa ( $\Delta M$ ), relativamente à massa seca inicial (Equação 7.26).

$$\Delta M = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100 \quad \text{Equação 7.26}$$

em que,

$\Delta M$  – é a variação da massa (%);

$m_i$  – é a massa inicial seca (g);

$m_f$  – é a massa final seca (g).

### 7.11.2. Resultados Obtidos

No ANEXO XIV – Resistência à Cristalização de Sais, apresentam-se os resultados obtidos para a resistência à cristalização de sais de cada calcário em estudo, no que se refere ao valor médio ( $\bar{x}$ ), ao desvio padrão ( $S$ ) e ao coeficiente de variação ( $v$ ), em termos da variação da massa após o ensaio ( $\Delta M$ )., encontrando-se também discriminados os valores individuais para cada provete.

Pelo que se pode observar dos resultados obtidos (Gráfico 7.17) tanto o calcário A como o C tiveram um incremento da sua massa após o ensaio de resistência à cristalização de sais, onde o A apresenta um ganho de 0,23 % da sua massa inicial e o C de 0,27 %, Este acréscimo de massa aconteceu pelo facto de não ter ocorrido qualquer desintegração nestes provetes e por haver uma adição de cristais de sais na sua rede porosa, indo também ao encontro da maior porosidade aberta do calcário C em relação ao A.

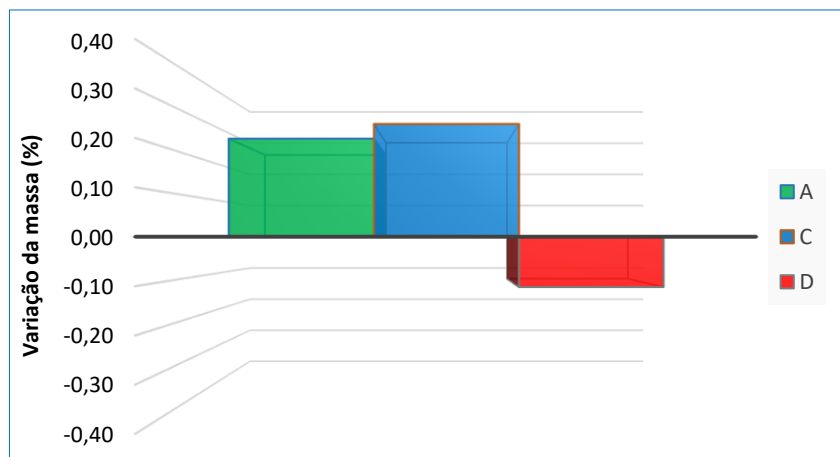


Gráfico 7.17 – Variação da massa de cada calcário em estudo após os ciclos de cristalização de sais.

Já o calcário D, e apesar de ter uma porosidade muito reduzida e bastante inferior comparativamente com as outras variedades, apresenta uma perda de massa de -0,12 % em relação à sua massa original e que se deveu à desintegração de pequeníssimas partículas de material, uma vez que não são visíveis à vista desarmada quaisquer alterações nestes provetes.

De referir que para o calcário D foi excluído um provete para os seus cálculos médios por apresentar descontinuidades ainda antes de ter começado a realização do ensaio, e uma vez que não se chegou a desintegrar mantendo sempre a sua forma ao longo de todos os ciclos de

ensaio, levou a que houvesse um considerável aumento da sua massa fruto do preenchimento destas descontinuidades pelos sais precipitados (Fig. 7.15), o qual levaria a uma adulteração dos valores obtidos para este calcário.



Figura 7.15 – Provete onde é evidente o preenchimento das descontinuidades por cristais de sulfato de sódio.

### 7.12. Determinação da Resistência ao Gelo

O principal parâmetro que condiciona a utilização da pedra natural em exteriores de regiões com climas de temperaturas negativas regulares, está relacionado com o seu comportamento sob condições de gelividade (Borges *et al.*, 2012), fenómeno que com o decurso dos ciclos poderá provocar alteração estrutural da rocha (fissuração, desagregação, etc.) e, consequentemente, inaptidão no seu desempenho em obra (Simão *et al.*, 2010).

Sempre que se pretende aplicar uma pedra natural em exteriores de zonas cujas condições climáticas sejam caracterizadas por períodos regulares de temperaturas abaixo dos 0 °C, deve-se avaliar as alterações sofridas na sua aparência visual e/ou nas suas características físico-mecânicas quando submetidas a ciclos sucessivos de gelo-degelo. Segundo Borges *et al.* (2012) esta alteração resulta da combinação de três variáveis: (i) características inerentes à pedra natural selecionada (petrografia e propriedades físicas); (ii) tipo de aplicação e; (iii) parâmetros climáticos.

A resistência ao gelo é uma característica de durabilidade e de determinação fundamental quando se pretende utilizar a pedra natural em regiões ciclicamente sujeitas a ações de gelo-degelo, uma vez que a congelação da água nos seus poros e fissuras desenvolve tensões internas que podem conduzir a um mau desempenho em obra (Borges *et al.*, 2012).

Quando a temperatura se aproxima de 0 °C e a água passa do estado líquido ao estado sólido, dão-se mudanças importantes no seu comportamento, no começo da formação do gelo cada molécula de água liga-se por ligações de hidrogénio a quatro outras moléculas de água formando um grupo tetraédrico, estes grupos por sua vez ligam-se entre si, também por ligações de hidrogénio, formando uma estrutura hexagonal rígida (Bland & Rolls, 1998, in Antão, 2004). Uma das consequências desta organização quando da formação do gelo é o aumento do volume em cerca de 9 % (Antão, 2004).

O processo de congelamento da água em rochas porosas está relacionado quer com as suas propriedades físicas (variações volumétricas, plasticidade, velocidade do fluxo, etc.) quer com a complexidade da rede porosa existente na rocha.

A formação do gelo contribui para a fracturação das rochas, sendo as grandes pressões que se fazem sentir nas paredes dos vazios aquando da congelação da água, provocada pela

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

expansão do seu volume, a principal acção desencadeadora (Fookes *et al.*, 1988; Bland & Rolls, 1998; in Antão, 2004).

Uma outra teoria está relacionada com a migração da água para zonas de gelo em vez da sua conversão no local. Este é um modelo dinâmico que combina vários factores que modificam o comportamento da água gelada, tais como as propriedades da rocha (módulo de elasticidade, resistência à tracção, dimensão dos minerais e dos vazios) e as condições ambientais (temperatura, gradiente de temperatura e disponibilidade de água). Um dos seus fundamentos rege-se pelo facto de as fases de gelo e de água poderem coexistir dentro da rocha a temperaturas abaixo dos 0 °C (Bland & Rolls, 1998, in Antão, 2004), sendo que a presença de sais, os efeitos de adsorção e os efeitos de capilaridade poderem ser alguns dos factores que levem a esta situação.

Uma vez que a água líquida possui uma energia livre superior à da água gelada, ocorre uma migração da água líquida para as zonas mais geladas, ou seja, para as zonas de menor energia. Afectado pela permeabilidade da rocha, pela temperatura e pela quantidade de água disponível, este movimento gera uma força de sucção da ordem dos  $10^6$  N/m<sup>2</sup> que é exercida ao longo das fissuras, contribuindo para a sua abertura (Antão, 2004).

Portugal é um país pouco afetado pelo processo de gelividade, uma vez que as temperaturas mínimas inferiores a -5 °C ocorrem apenas em cerca de 15 % do território. No entanto, como país exportador para regiões de latitudes mais elevadas, torna-se fundamental a avaliação da resistência ao gelo das rochas ornamentais que são comercializadas para esses países (Borges *et al.*, 2012).

A magnitude dos efeitos que a acção do gelo tem sobre a pedra natural aplicada em obra está muitas vezes dependente da própria funcionalidade a que se destina, no caso da pedra de calçada que é utilizada nos pavimentos o efeito dos ciclos de gelo-degelo vai ser acentuado pelas pressões a que este pavimento poderá estar sujeito. Dá-se aqui o exemplo de uma calçada portuguesa realizada no exterior de uma moradia na cidade de Toronto, Canadá, onde as condições climáticas no que respeita à gelividade são bastante rigorosas, acabando pela acção do gelo provocar a rotura das pedras que constituem o pavimento e conseqüentemente originar a degradação da calçada. Destaca-se que este fenómeno ocorre sobretudo nas zonas onde o pavimento está sujeito à pressão exercida pela passagem de veículos, pelo que em zonas onde apenas ocorre a passagem de peões o comportamento da pedra acaba por ser totalmente distinto, apresentando menores danos e conseguindo manter a sua coerência (Fig. 7.16).

Sobressai nesta circunstância que a pedra de calcário negro tem um comportamento diferente em relação às de calcário branco, resistindo melhor à acção deste agente climatérico e conseguindo manter a sua integridade, contudo existem sempre algumas pedras que acabam por ceder. Esta resistência pode ser justificada pela baixa porosidade e logo reduzida absorção de água deste tipo de calcários, mitigando assim a acção do gelo.

Quando os cubos e paralelepípedos de pedra natural (pedra de calçada) se destinem a ser utilizados em áreas sujeitas a requisitos regulamentares de gelo-degelo, a resistência ao gelo deve ser determinada utilizando-se os métodos de ensaio que vem referidos na norma portuguesa NP EN 12371:2006, devendo os resultados serem expressos e declarados como o valor médio da resistência à compressão antes e após 56 ciclos de gelo-degelo (ensaio tecnológico). Para locais sujeitos a temperaturas inferiores a -12 °C é aconselhável utilizar diferentes ciclos de ensaio, como por exemplo congelação em água, congelação a uma temperatura mais baixa, utilizar um maior número de ciclos, etc.

## Caracterização Físico-Mecânica

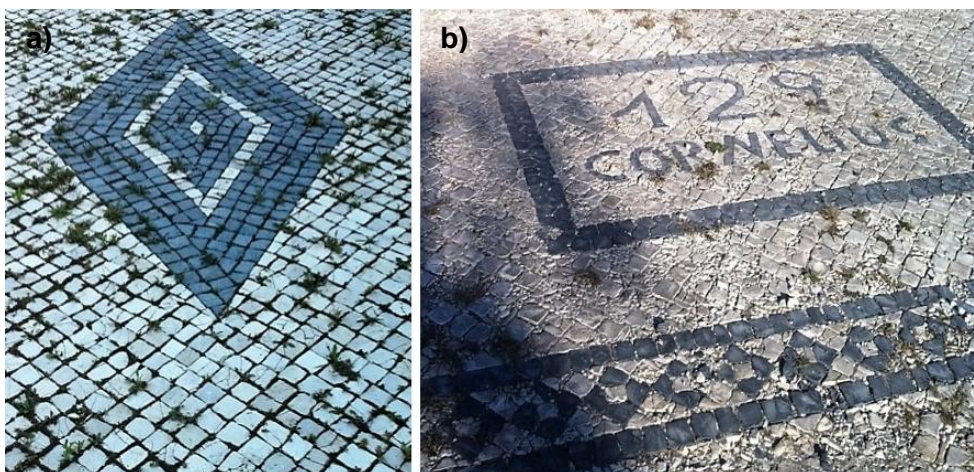


Figura 7.16 – Calçada portuguesa 5x7 numa moradia em Toronto, Canadá: a) zona de circulação de peões onde, apesar de pouco cuidada, a calçada mantém a sua consistência; b) zona de passagem de veículos onde a calçada está bastante deteriorada.

### 7.12.1. Procedimento do Ensaio

Para a realização deste ensaio foi seguida a norma portuguesa NP EN 12371:2006, que tem como princípio que a resistência ao gelo de elementos de pedra natural é determinada através de um ensaio constituído por ciclos de gelo ao ar e de degelo em água. O ensaio tecnológico tem como propósito determinar o efeito de ciclos de gelo-degelo em características de desempenho, que neste caso é aplicado à resistência à compressão uniaxial segundo a norma portuguesa NP EN 1926:2008, após 56 ciclos.

Por não haver a disponibilidade de uma cuba de gelo própria para a realização deste ensaio, optou-se pela utilização de um congelador doméstico (Fig. 7.17), referira-se que também estes equipamentos atingem facilmente as temperaturas que são indicadas para a realização deste ensaio.

Para a monitorização da temperatura no interior dos provetes durante os ciclos de gelo e de degelo foi utilizado um provete munido de uma sonda de temperatura termopar do tipo K, ligada a um multímetro com uma resolução de  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  e uma exactidão de  $\pm 5\%$ . Esta célula foi colocada num orifício executado paralelamente ao eixo longitudinal do provete ficando posicionada sensivelmente no seu centro. Após a colocação da célula o orifício foi selado com cimento (Fig. 7.18), tendo-se deixado a sonda liberta numa pequena câmara de ar.

Para se proceder ao descongelamento dos provetes, estes eram retirados do congelador e colocados dentro de um recipiente com água, tendo-se realizado este procedimento 56 vezes. De referir que entre cada ciclo procedia-se à troca de posições dos provetes dentro do congelador, de forma a diminuir o efeito de alguma diferença de temperaturas que pudesse haver entre determinadas zonas dentro do congelador.

Após cada ciclo de gelo-degelo foi realizada uma inspecção visual em todos os provetes de forma a perceber-se em que ciclo de ensaio começava a ocorrer alguma alteração na superfície dos provetes, sendo que também se procedia à sua classificação (ANEXO XV – Inspeção Visual dos Provetes no Ensaio de Gelo-Degelo), de acordo com a magnitude dos danos causados em cada provete, pelo que o ensaio de cada provete chegaria ao fim quando atingisse a classificação 3 da seguinte escala:



## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

0 – Provete intacto;

1 – Danos muito pequenos (pequeno arredondamento dos vértices e arestas) que não comprometem a integridade do provete;

2 – Uma ou várias pequenas fissuras ( $\leq 0,1$  mm de largura) ou desprendimento de pequenos fragmentos ( $\leq 30$  mm<sup>2</sup> por fragmento);

3 – Uma ou várias fissuras, orifícios ou desprendimentos de fragmentos maiores que os definidos para a classificação “2”, ou alteração dos veios, ou o provete mostrar sinais importantes de desagregação ou de dissolução;

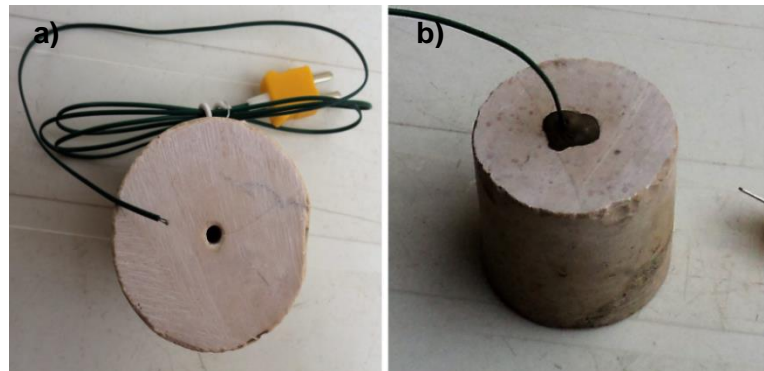
4 – Provete com fissuras grandes ou partido em dois ou mais pedaços ou desintegrado.

Findo os ciclos de gelo-degelo, e com os provetes que a eles resistiram, procedeu-se à determinação da sua resistência à compressão uniaxial tal como foi executado para a determinação deste parâmetro sobre os provetes “sãos”.



Figura 7.17 – Disposição dos provetes dentro do congelador onde se procedia ao controlo da temperatura de congelação.

Figura 7.18 – Provete referência utilizado no controlo da temperatura: a) sonda de temperatura que será introduzida no pequeno orifício no centro do provete; b) orifício já selado com cimento.



### 7.12.2. Resultados Obtidos

Da inspeção que foi sendo feita aos provetes ao longo dos ciclos de gelo-degelo, ainda que poucas, verificaram-se algumas alterações visuais. Relativamente ao C há a referir a abertura de pequenas discontinuidades nos provetes C<sub>4</sub>, C<sub>5</sub> e C<sub>10</sub> (Fig. 7.19), já para o calcário D há a assinalar o colapso de 2 provetes (D<sub>7</sub> e D<sub>10</sub>) através de várias discontinuidades (Fig. 7.20), mas que ambos já as apresentavam antes da realização do ensaio de resistência ao gelo, pelo que já tinham sido registadas aquando da realização de outros ensaios, para o calcário A não houve nenhuma patologia a registar.

## Caracterização Físico-Mecânica

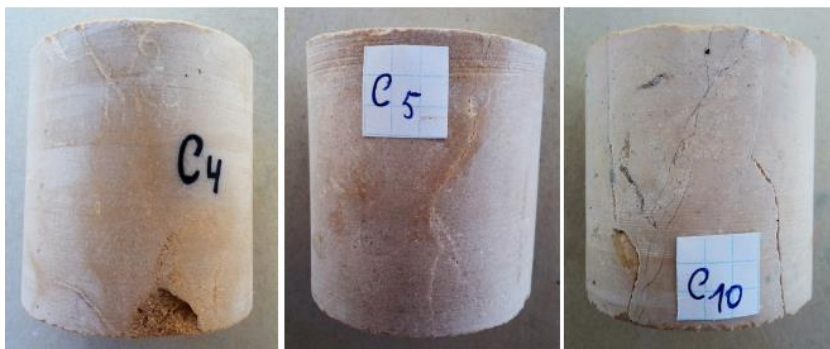


Figura 7.19 – Provetes do calcário C (C<sub>4</sub>, C<sub>5</sub> e C<sub>10</sub>) onde surgiram algumas fracturas.



Figura 7.20 – Provetes do calcário D (D<sub>7</sub> e D<sub>10</sub>) que se partiram por grandes fracturas.

Tal como ocorreu no ensaio de RCU verificou-se que a fracturação dos provetes também se iniciava antes de estes atingirem a sua resistência máxima e o conseqüente colapso. Pelo que também foi considerado dois valores para a resistência à compressão uniaxial após os ciclos de gelo-degelo, um que corresponde ao surgimento da primeira fractura ( $RCU_g 1^{af}$ ) e um outro que coincide com a carga máxima suportada pelo provete ( $RCU_g max$ ).

Mesmo não se tendo observado qualquer descontinuidade durante os ciclos de gelo-degelo em determinados provetes, houve alguns deles que aquando da aplicação da carga se fracturaram segundo descontinuidades preexistentes e que desenvolveram uma maior fraqueza pela acção do gelo. Estes planos preferenciais de ruptura dos provetes eram caracterizados por simples fracturas, por descontinuidades preenchidas por cristais de calcite (calcite espática) ou ainda por descontinuidades preenchidas por pequenos cristais de óxidos de ferro (Fig. 7.21).

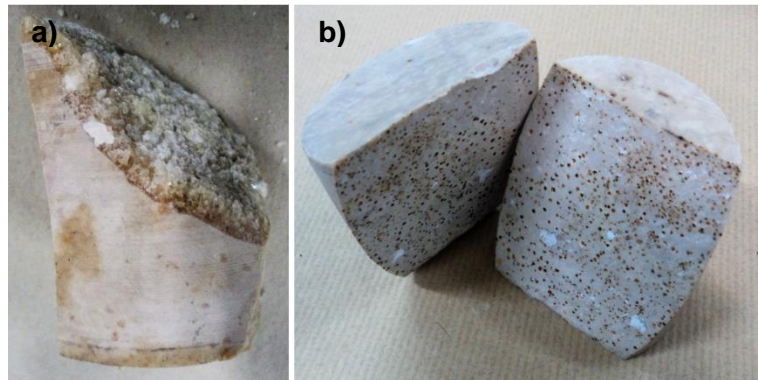
No ANEXO XVI – Resistência à Compressão Uniaxial após os Ciclos de Gelo-Degelo, apresenta-se o valor médio ( $\bar{x}$ ) da RCU após os 56 ciclos de gelo-degelo para cada conjunto de provetes dos calcários em estudo, bem como o desvio padrão ( $S$ ), o coeficiente de variação ( $v$ ) e o valor mínimo esperado ( $E_L$ ). De referir que para estes cálculos apenas foram considerados os 7 valores mais elevados de resistência, o que possibilitou a exclusão de alguns valores mais baixos de provetes que terão colapsado logo numa fase inicial da compressão provocado por determinadas descontinuidades ou devido a alguma eventual imperfeição na geometria dos provetes, mas que ainda assim possibilitou que se cumprisse com o número mínimo de ensaios que vem referido na norma aqui seguida.

Relativamente aos dois parâmetros de resistência à compressão considerados para este ensaio verifica-se que para a carga máxima suportada pelos provetes ( $RCU_g max$ ) são os provetes do calcário C que apresentam o valor médio ( $\bar{x}$ ) mais elevado, cerca de 96 MPa, esta resistência surge, ainda que ligeiramente, mais elevada que o valor encontrado para os provetes ensaiados sob condições ditas normais, apresentando uma relação de 104 % em relação à  $RCU max$ . Logo abaixo surge o calcário D com cerca de 96 MPa de  $RCU_g max$ , este já ligeiramente abaixo do

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

valor determinado para a  $RCU_{max}$ , apresentando para este uma relação de 96 %. Com o valor mais baixo encontra-se o calcário A com cerca de 67 MPa, um valor que evidencia uma redução considerável em relação à  $RCU_{max}$ , apresentando uma relação para este de 82 %.

Figura 7.21 – Provetes do calcário A que durante o ensaio de RCU após os ciclos de gelo-degelo se fracturaram segundo planos de discontinuidades: a) descontinuidade preenchida por calcite espática ( $A_5$ ); b) descontinuidade preenchida por óxidos de ferro ( $A_7$ ).



Em relação ao surgimento da primeira fractura ( $RCU_g 1^{af}$ ) verifica-se uma maior proximidade entre os valores de resistência determinados para cada calcário. Para este parâmetro é o calcário D que apresenta o valor mais elevado com cerca de 66 Mpa e uma relação de 91 % com a  $RCU 1^{af}$ . Com o valor intermédio aparece o calcário C, com aproximadamente 53 MPa e uma relação com a  $RCU 1^{af}$  de 73 %. Com o valor mais reduzido continua o calcário A com aproximadamente 42 MPa e uma relação para a  $RCU 1^{af}$  de 79 %.

Pelo que se pode concluir dos resultados obtidos, a acção do gelo afecta com diferente magnitude as características físicas de cada calcário e conseqüentemente o seu comportamento geomecânico em obra, nomeadamente a sua resistência a esforços de compressão uniaxial. No Gráfico 7.18 apresentam-se os valores médios calculados para a RCU após os 56 ciclos de gelo-degelo, tanto em termos da resistência máxima ( $RCU_g max$ ) como para o surgimento da primeira fractura ( $RCU_g 1^{af}$ ) de modo que se possam analisar e compara de uma maneira mais concisa os resultados obtidos neste ensaio.

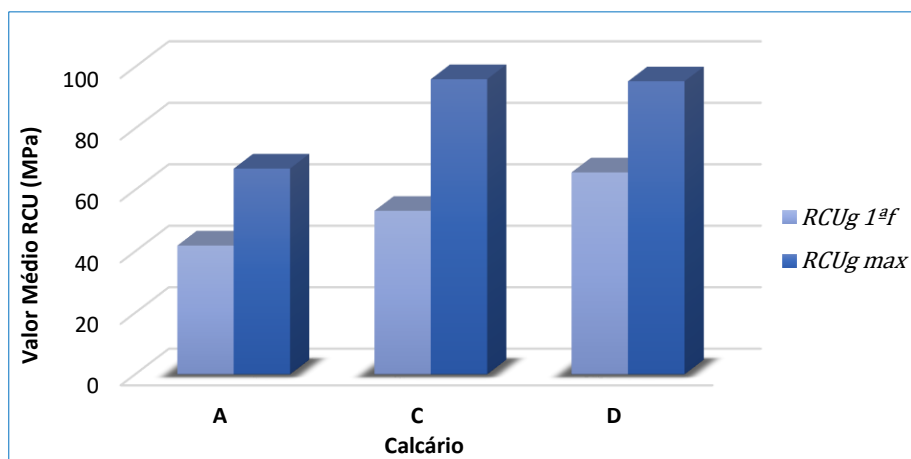


Gráfico 7.18 – Valor médio da RCU após 56 ciclos de gelo-degelo em termos da resistência máxima ( $RCU_g max$ ) e para o surgimento da primeira fractura ( $RCU_g 1^{af}$ ) dos calcários em estudo.

### Capítulo 8 – Considerações Finais

Os fatores que intervêm na seleção de uma pedra natural para aplicação como elemento construtivo são de natureza vária, sendo, contudo, o factor estético frequentemente decisivo nessa seleção. Certos de que será o factor que mais pesa aquando da sua escolha, torna-se imperativo evidenciar algumas particularidades estéticas que caracterizam cada um dos calcários estudados.

Ficou evidente quanto ao calcário do tipo D (Alqueidão da Serra) que estamos na presença de um universo pétreo distinto dos restantes, este é um calcário que tem uma coloração quase negra onde por vezes sobressai as pontuações douradas da pirite.

Em relação aos calcários A e C (Alenquer e Porto de Mós – Alcanede, respectivamente), apesar de terem colorações semelhantes, evidenciam aspectos diferenciadores entre si. O calcário C de uma forma geral apresenta uma coloração mais homogénea e com um tom que se aproxima mais do branco, contudo, não apresenta o brilho que o calcário A emana. Do calcário A há ainda a destacar a abundância dos cristais de calcite tanto em pontuações ou em filonetes, mas também a recristalizar o material fossilífero disperso na matriz, o que lhe promove um belo efeito estético.

A escolha de uma pedra natural tendo por base a avaliação do seu desempenho em obra e da sua adequada utilização, permite mitigar a ocorrência de patologias e as conseqüentes medidas corretivas que venham a ser necessárias efetuar a posteriori. Compreende-se assim a razão de ser deste trabalho, que não tendo como propósito estabelecer uma classificação ou dizer qual a melhor ou pior pedra de calçada, contudo a sua aplicação deverá ser analisada em função do tipo de utilização a que se destina o pavimento e das condições climáticas a que estará sujeito, sendo que para uns casos poderá justificar-se a utilização de um determinado tipo de pedra em específico, mas certamente que para outras situações caberá a utilização de uma outra pedra.

Realizou-se assim com esta dissertação uma caracterização físico-mecânica das pedras calcárias mais utilizadas na calçada portuguesa e que, contamos nós, contribuirá para se evitar muitos dos erros que são cometidos aquando da sua escolha. Sob pena de se colocar em risco todo o seu valor arquitectónico, pela deterioração a que esta poderá estar sujeita e para a qual não foi devidamente acautelada.

Na Tabela 8.1 encontram-se discriminados os valores dos parâmetros físico-mecânicos que foram tidos em consideração neste trabalho e que servem como ponto de comparação entre os calcários em estudo e definir qual a sua melhor aplicabilidade, sendo ainda de referir que todos eles apresentam características que cumprem quase na totalidade os requisitos mínimos de desempenho estabelecidos por Henriques *et al.* (2009) para as pedras de melhor qualidade a aplicar na calçada portuguesa.

Ainda assim podemos destacar algumas tendências ou valores mais díspares que os três calcários apresentam em certos parâmetros. Na RCU o calcário do tipo A é o que apresenta os valores mais baixos de resistência em todas as diferentes condições dos provetes, esta diferença poderá dever-se à sua maior rigidez pelo que admitirá uma menor deformação e por conseqüente entrará em ruptura em estádios mais precoces de compressão, conferindo-lhes uma maior fragilidade. Isso foi verificado durante a realização destes ensaios, e também comprovado pela maior velocidade de propagação das ondas longitudinais ultra-sónicas.

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

Tabela 8.1 – Síntese dos parâmetros físico-mecânicos determinados para os calcários em estudo.

Parâmetro	Calcário		
	A	C	D
$RCU_{max}$ (MPa)	81,67	92,73	98,85
$RCU_{1^af}$ (MPa)	53,06	72,41	72,24
$RCU_s$ (MPa)	90,67	127,95	140,25
$RCU_g_{max}$ (MPa)	66,93	96,02	95,33
$RCU_g_{1^af}$ (MPa)	41,90	53,19	65,69
$I_{S(50)seco}$ (MPa)	4,35	4,50	3,64
$I_{S(50)saturado}$ (MPa)	4,81	6,19	5,16
$R$	54,70	52,40	55,60
$E_{MS}$ (GPa)	66	61	69
$A_b$ (%)	0,57	1,34	0,16
$\rho_b$ (kg/m <sup>3</sup> )	2662,07	2599,79	2685,12
$\rho_0$ (%)	1,69	4,00	0,24
$\rho_r$ (kg/m <sup>3</sup> )	2760,77	2728,50	2750,23
$\rho$ (%)	3,51	5,00	2,01
$IQ_\rho$ (%)	94,38	92,01	96,78
$C$ (g/m <sup>2</sup> /s <sup>0,5</sup> )	0,699	3,121	0,150
$V_pseco$ (m/s)	6596	6229	6293
$V_pseco$ saturado (m/s)	6575	6192	6295
$V_pseco$ gelo (m/s)	6487	6057	6039
$IQ_V$ (%)	99,94	94,38	94,89
$E_dseco$ (GPa)	53,63	51,74	54,90
$E_dseco$ saturado (GPa)	54,71	50,89	56,62
$E_dseco$ gelo (GPa)	68,43	47,83	49,24
$v_dseco$	0,40	0,39	0,38
$v_dseco$ saturado	0,40	0,39	0,38
$v_dseco$ gelo	0,35	0,39	0,40
$M_p$ (g)	0,46	0,47	0,52
$V_p$ (mm <sup>2</sup> )	172,17	178,86	200,02
$Id_3$ (%)	99,50	99,45	99,37
$\Delta M$ (%)	0,23	0,27	-0,12

Para os parâmetros que se relacionam com a absorção de água há a registar em todos eles os valores mais elevados apresentados pelo calcário C, certamente resultantes da maior porosidade verificada neste calcário. No outro extremo surge o calcário D com valores de absorção muito reduzidos, reflexo da reduzida porosidade que ostentam.

De referir ainda os valores determinados nos ensaios de desgaste, onde se verifica sempre a mesma tendência de resistência, com o calcário A a apresentar sempre os maiores índices de resistência ao desgaste, embora com valores muito próximos entre os três calcários.

Por fim deixa-se aqui um alerta para as precauções que se deverá ter na exportação da calçada portuguesa para países com condições climáticas gelivas muito agressivas e que poderão causar a rápida degradação do pavimento devido à ruptura das pedras.

Dada a variabilidade vertical e lateral que se observa nos maciços calcários, que por vezes ocorre mesmo no espaço restrito da própria pedra, é recomendado que qualquer

## Considerações Finais

caracterização desta pedra para fins comerciais se realize em áreas limitadas do maciço e sempre que se observe variações significativas desta matéria-prima. Funcionando como uma ferramenta de avaliação do material que se está a aplicar em obra, mas também como uma garantia para o próprio explorador que atesta a qualidade do material que está a fornecer.

### 8.1. Trabalhos Futuros

Apesar de neste trabalho ter-se realizado uma caracterização genérica do material rochoso de cada região, não deixa de ficar demonstrado as evidentes particularidades da pedra de calçada que se produz em cada núcleo de explorações. Pelo que não deixa de ser um excelente mote para se alargar a caracterização aqui realizada, quiçá mais aprofundada, às restantes zonas que também foram aqui assinaladas e por razões diversas não foi possível ser desenvolvido nesta dissertação. Também não deixamos aqui de frisar a necessidade de atribuir uma maior atenção ao sector da exploração e produção de pedra de calçada, actividade que hoje podemos afirmar estar em vias de extinção.

## Referências Bibliográficas

- Amaral, F. & Santa-Bárbara, J. (2002). *Mobiliários dos espaços urbanos em Portugal*. Mirandela: João Azevedo Editor.
- Antão, A. M. M. C. (2004). *Comportamento Geotécnico do Granito da Guarda Relacionado com a sua Alteração* (Tese de Doutoramento). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Aydin, A. (2009). "ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 46, n.º 3, p. 627-634.
- Azerêdo, A. C. (2007). "Formalização da litostratigrafia do Jurássico Inferior e Médio do Maciço Calcário Estremenho (Bacia Lusitânica)". *INETI, Comunicações Geológica*, 2007, t. 94, p. 29-51.
- Bairrada, E. M. (1985). *Empedrados Artísticos de Lisboa: a arte da calçada mosaico*. Lisboa: Autor.
- Bastos, M. & Silva, I. A. (2006). *Restauração, Reabilitação e Reconservação na Recuperação Paisagística de Minas e Pedreiras*. 30 de Mar. 2016 <[http://visaconsultores.com/pdf/ANIET\\_2006\\_MBIS\\_artigo.pdf](http://visaconsultores.com/pdf/ANIET_2006_MBIS_artigo.pdf)>.
- Becerra, J. E. B. & Costa, A. G. (2007). "Ensaio de alteração acelerada para avaliação da durabilidade de seis granitos ornamentais brasileiros". *Geonomos*, Vol. 15, n.º 2, p.33-42, Minas Gerais.
- Begonha, A. (2011). "Patologia da Pedra. Casos de Obra". *1ª Jornadas de Materiais na Construção*, p. 83-113. 25 de Jul. 2016 <[http://paginas.fe.up.pt/~jmc2011/wp-content/uploads/2011/03/Arlindo\\_Begonha.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~jmc2011/wp-content/uploads/2011/03/Arlindo_Begonha.pdf)>.
- Borges, M. I.; Simão, J.; Carvalho, C. & Pires, V. (2012). "Patologia dos Materiais e Elementos Construtivos: Influência da Resistência ao Gelo de Rochas Silicatadas Portuguesas na Utilização como Elemento Construtivo Exterior". *Patorreb 2012: 4º Congresso de patologia y rehabilitación de edificios*, p. 61-67. Santiago de Compostela.
- Cabrera, A. & Nunes, M. (1990). *Olhar o Chão*. Lisboa: Imprensa Nacional - Casa Moeda
- Câmara Municipal de Santarém. 24 de Mai. 2016 <<http://www.cm-santarem.pt/concelho/juntasdefreguesia/Paginas/Alcanede.aspx>>.
- Castro, B. M. S. (2006). *Marcação CE de Agregados e de Pedra Natural* (Dissertação de Mestrado). Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Carrasco, J. M. C. (2008). *A Rota do Mosaico Romano, o sul da Hispânia (Andaluzia e Algarve)*. Faro: Departamento de História, Arqueologia e Património da Universidade do Algarve.
- Carvalho, F.; Midões, C.; Machado, S.; Sampaio, J.; Costa, A.; Lisboa, V. (2011). *Maciço Calcário Estremenho: Caracterização da Situação de Referência*. Lisboa: Laboratório Nacional de Energia e Geologia.
- Consolino, L. C. & Pereira, A. H. A. (2010). "Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização". *Informativo Técnico-Científico. ATCP Engenharia Física*, Brasil. 1 de Mai. 2016 <<http://www.atcp.com.br/>>.
- Couto, R. T. da S. (1990). *Lavras a céu aberto e equipamentos principais* (Tese de Doutoramento). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Decreto-Lei n.º 90/90, de 16 de Março. 15 de Fev. 2016 <[http://www.oern.pt/documentos/legislacao/d\\_dl\\_dr/DL90\\_90.pdf](http://www.oern.pt/documentos/legislacao/d_dl_dr/DL90_90.pdf)>.
- Decreto-Lei n.º 41/2001, de 9 de Fevereiro. 30 de Mar. 2016 <[http://www.riac.azores.gov.pt/NR/rdonlyres/06636A5F-4991-422C-9611-C33B13C5E418/133194/DL\\_41\\_2001.pdf](http://www.riac.azores.gov.pt/NR/rdonlyres/06636A5F-4991-422C-9611-C33B13C5E418/133194/DL_41_2001.pdf)>.

## Referências Bibliográficas

- Decreto-Lei n.º 270/2001 de 6 de Outubro. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. 15 de Fev. 2016 <[http://www.oern.pt/documentos/legislacao/d\\_dl\\_dr/DL270\\_2001.pdf](http://www.oern.pt/documentos/legislacao/d_dl_dr/DL270_2001.pdf)>.
- Decreto-Lei n.º 110/2002, de 16 de Abril. 30 de Mar. 2016 <<http://www.riac.azores.gov.pt/NR/rdonlyres/7FC067F2-64D4-40C0-8814-A735DA76B164/132430/1102002.pdf>>.
- Decreto-Lei n.º 340/2007 de 12 de Outubro. Ministério da Economia e da Inovação. 15 de Fev. 2016 <[https://www.oet.pt/downloads/Decl/DL/DL340\\_2007.PDF](https://www.oet.pt/downloads/Decl/DL/DL340_2007.PDF)>.
- Decreto-Lei n.º 151-B/2013 de 31 de Outubro. Ministério da Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento do Território. 23 de Jan. 2016 <<http://www.culturacores.azores.gov.pt/ficheiros/legislacao/20141230115247.pdf>>.
- Decreto-Lei n.º 47/2014 de 24 de Março. Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas. 23 de Jan. 2016 <<http://www.icnf.pt/portal/icnf/legis/legislacao/2014/decreto-lei-n-o-47-2014-de-24-de-marco-d-r-n-o-58-serie-i>>.
- Decreto-Lei n.º 121/2015, de 30 de junho. 30 de Mar. 2016 <<http://publicos.pt/documento/id67641480/decreto-lei-121/2015>>.
- Decreto-Lei n.º 122/2015, de 30 de junho. 30 de Mar. 2016 <<http://publicos.pt/documento/id67641481/decreto-lei-122/2015>>.
- Decreto-Lei n.º 179/2015, de 27 de Agosto. Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas. 23 de Jan. 2016 <<http://www.icnf.pt/portal/icnf/legis/legislacao/2014/decreto-lei-n-o-47-2014-de-24-de-marco-d-r-n-o-58-serie-i>>.
- Directiva n.º 2011/92/EU, de 13 de Dezembro de 2011. 30 de Mar. 2016 <<http://www.apai.org.pt/m1/1328186720directiva201192ue.pdf>>.
- Directiva 89/106/CE de 21 de Dezembro de 1988 - Produtos de Construção. 17 de Mai. 2016 <<http://www.inci.pt/Portugues/Legislacao/Legislacao/DecLei20074.pdf>>.
- DGEG, 2016. “Cadastro Nacional de Pedreiras”. Direcção Geral de Energia e Geologia. 23 de Jan. 2016 <<http://www.dgeg.pt/>>.
- Dornelas, C.; Castela, I.; Dornelas, L. (2006). *Técnicas de calçada: manual do formando*. Lisboa: Câmara Municipal de Lisboa.
- Ellis, P. M.; Wilson, R. C. L.; Leinfelder, R. R. (1990). “Controls on Upper Jurassic carbonate buildup development in the Lusitanian Basin, Portugal”. *International Association of Sedimentologists Special Publication*, n.º 9, p. 169-202.
- Every Clean – Portugal, 2014. “Limpeza de calçada à Portuguesa”. 20 Nov 2015. <<https://i.ytimg.com/vi/4LzIbnFYulo/maxresdefault.jpg>>.
- Faim, R. L. S. (2014). *Caraterização Geotécnica dos Calcários Dolomíticos das Camadas de Coimbra* (Dissertação de Mestrado, não publicada). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Ferreira, A. (2000). *Dados Geoquímicos de Base de Sedimentos Fluviais de Amostragem de Baixa Densidade de Portugal Continental: Estudo de Factores de Variação Regional*. (Tese de Doutoramento). Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Ferreira, A. R. L. (2015). *Efeito de background local e assinatura geoquímica de anomalias naturais em sedimentos de corrente e solos – aplicação à área envolvente do jazigo de urânio (Nisa, Portugal)* (Dissertação de Mestrado). Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Ferreira, J. A. S. L. (2016). *Caracterização e modelação de reservatórios carbonatados: estudo de caso baseado em análogos do Jurássico Médio da região de Vale Florido, Maciço Calcário Estremenho (MCE)* (Dissertação de Mestrado). Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Ferreira, M. Q. & Antão, A. (2006). “Utilização do “Slake Durability Test” na caracterização da alteração de granitos”. *VII Congresso Nacional de Geologia*. p. 763 – 766, Évora.



## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

- Figueiredo, F. P. O. de O. (2007). *Exploração de Georrecursos I - Exploração a Céu Aberto* (não publicado). Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Figueiredo, P.; Figueiredo, C.; Aires-Barros, L., & Flambó, A. (2004). "Contribuição para o estudo cromático das rochas da capela do palácio da Bemposta". *Proelium – Revista da Academia Militar*, VI série, n.º 1 (2004), p.161-178, Lisboa.
- Fourmaintraux, D. (1976). "Caractérisation des roches: essais de laboratoire. La mécanique des roches appliquée aux ouvrages de génie civil". *Association Amicale des Ingénieurs Anciens Elèves de l'École Nationale des Ponts et Chaussées*, Vol. 2, p. 39-56.
- Geologia de Engenharia, (s. d.). *Apontamentos da disciplina de Geologia de Engenharia*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 15 de Ago. 2016 <[http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/ge\\_apontamentos.htm](http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/ge_apontamentos.htm)>.
- Gimenez, A. M. S. (2012). *Avaliação do Comportamento de Ondas Ultrassónicas no Monumento às Bandeiras* (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Gomes, M. I. S. (2008). *Monitorização do Crescimento de um Biofilme Fotossintético por Análise de Imagem* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Gomes, R. I. P. (2011). *Contributo para a Caracterização Geotécnica dos Gabros da Faixa Beringel – Beja* (Dissertação de Mestrado). Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Gorani, G. (1989). *Portugal, a corte e o país nos anos de 1765 a 1767*. Lisboa: Lisóptima Edições.
- Guerreiro, H. J. P. (2000). *Exploração Subterrânea de Mármore: Aspectos Geotécnicos* (Dissertação de Mestrado). Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Hack R, & Huisman M. (2002). "Estimating the intact rock strength of a rock mass by simple means". *Proceedings 9th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment, 16–20 September*, p. 1971–1977, Durban.
- Henriques, A. M. E.; Moura, A. A. C.; Santos, F. A. (2009). *Manual da Calçada Portuguesa*. Lisboa: Direcção Geral de Energia e Geologia.
- Hidroprojecto (2000). *Estudo Integrado de Impacte Ambiental e de Recuperação Paisagística para as Pedreiras de Atouguia* (não publicado). Instituto Geológico e Mineiro.
- Hoek, E. (2007). *Practical Rock Engineering*. 11 de Jul. 2016 <<https://www.rocscience.com/documents/hoek/corner/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>>.
- Hudson, J. A. & Harrison, J. P. (1997). *Engineering Rock Mechanics: an introduction to the principles*. Oxford: Pergamon.
- Iamaguti, A. P. S. (2001). *Manual de Rochas Ornamentais para Arquitetos* (Dissertação de de Mestrado). Universidade Estadual Paulista, Brasil.
- Inês, N. (2010). *Paleotipologias diagenéticas em formações carbonatadas do Jurássico Médio da Bacia Lusitânica: análise multiescala e aplicações à caracterização de reservatórios* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Instituto Geográfico do Exército. *Carta Militar de Portugal na escala 1:25.000 da Série M 888, folhas 308 (Porto de Mós), 317 (Alcobaça), 318 (Mira de Aire), 327 (Benedita), 328 (Alcanena), 363 (Abrigada), 376 (Alenquer)*. Lisboa: Instituto Geográfico do Exército.
- Ikematsu, P. (2007). *Estudo da Refletância e sua Influência no Comportamento Térmico de Tintas Refletivas e Convencionais de Cores Correspondentes* (Dissertação de Mestrado). Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- ISRM (1979). "Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake durability index properties". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstracts*. Vol. 16, n.º 2, p.141-156.

## Referências Bibliográficas

- ISRM (1985). Suggested Method for Determining Point Load Strength. Pergamon Press, p. 51-60.
- Ivo Alves, E. (2005). *Elementos de Geofísica* (não publicado). Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Jimeno, C. L. (1996). *Manual de Rocas Ornamentales: Prospeccion Explotacion Elaboracion y Colocacion*. Madrid: Entorno Gráfico S.L.
- Junta de Freguesia de Alqueidão da Serra, 2016. 3 de Mai. 2016 <<http://www.jf-alqserra.com/index.php?page=caracterizacao>>.
- Junta de Freguesia de São Bento, 2016. 24 de Mai. 2016 <<http://jfsaobento.wix.com/jfsaobento#!a-freguesia/cntq>>.
- Junta de Freguesia de Reguengo do Fetal, (s. d.) 8 de Ago. 2016 <<http://www.freguesia-reguengodofetal.pt/>>.
- Katz, O.; Reches, Z. & Roegiers, J.C. (2000). "Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt hammer". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 37, n.º 4, p. 723-728.
- Kullberg, J. C.; Rocha R. B.; Soares A. F.; Rey J.; Terrinha P.; Azerêdo A. C.; Callapez P.; Duarte, L.V.; Kullberg M. C.; Martins L.; Miranda J. R.; Alves C.; Mata J.; Madeira J.; Mateus O.; Moreira M. & Nogueira C. R. (2013). *A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. Geologia de Portugal, Volume II – Geologia Meso-cenozoica de Portugal*. Lisboa: Escolar Editora.
- Leinfelder, R. R. (1994). *Karbonatplattformen und Korallenriffe innerhalb siliziklastischer Sedimentationsbereiche (Oberjura, Lusitanisches Becken, Portugal)*. 3 de Fev. 2016 <[http://userpage.fu-berlin.de/leinfelder/palaeo\\_de/leinfelder/rrlprints/leinfelder94b\\_e\\_lrnns.pdf](http://userpage.fu-berlin.de/leinfelder/palaeo_de/leinfelder/rrlprints/leinfelder94b_e_lrnns.pdf)>.
- Machado, B. C. C. A. (2012). *Caracterização das litologias e patologias da Sé de Lamego: Um estudo sobre alteração em monumentos graníticos* (Tese de Doutoramento). Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.
- Maré, F. L. (2011). *História das Infraestruturas Rodoviárias*. (Tese de Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Mantas, V. G. (2012). *As Vias Romanas da Lusitânia*. Mérida: Museo Nacional de Arte Romano.
- Manuppella, G. & Balacó Moreira, J. C. (1984). "Calcários da serra de Ota". *Estudos, Notas e Trabalhos do Serviço de Fomento Mineiro*, Vol. XXVI, fasc. 1-4 (1984), p. 25-34, São Mamede de Infesta
- Marta, P. A. O. S. (2006). *Exploração de Calcário para Calçada Portuguesa – um Georrecurso Educativo para o Secundário* (Tese de Mestrado). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Martins, F. F. & Miranda, T. F. da S. (2010). *Correlações entre algumas propriedades mecânicas de rochas graníticas com vista à escavação de túneis*. Universidade do Minho, Braga.
- Matos, E. (2004). *Lisboa das calçadas*. Lisboa: Câmara Municipal de Lisboa.
- Matos, E. (2012) "A Arte da Calçada à Portuguesa". *Revista Portugalglobal* nº 49, p. 17-19, Lisboa.
- Monteiro, R. I. M. R. (2008) - *Estudo geológico e geotécnico de taludes rochosos em S. Pedro da Afurada (Vila Nova de Gaia): contributos para a avaliação da estabilidade estrutural* (Dissertação de Mestrado). Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto
- Moreiras, S. T. F.; Paraguassú, A. B. & Ribeiro, R. P. (2006). "Rochas Ornamentais: Especificações para Revestimento de Pisos". Florianópolis: *XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído*, p. 4207-4216. 27 de Jul. 2016 <[http://www.infohab.org.br/entac2014/2006/artigos/ENTAC2006\\_4207\\_4216.pdf](http://www.infohab.org.br/entac2014/2006/artigos/ENTAC2006_4207_4216.pdf)>.
- Moura, A. C. (2006). "Especificações para a Pedra Natural (Contributos para a Selecção e para o Dimensionamento)". *Boletim de Minas*, Vol. 41 (2), p.121-159. Lisboa: Direcção-Geral de Geologia e Energia.
- Moura, A. C.; Carvalho, C.; Almeida, I.; Saúde, J.; Ramos, J.; Augustos, J.; Rodrigues, J.; Carvalho, J.; Martins, L.; Matos, M.; Machado, M.; Sobriro, M.; Peres, M.; Martins, N.; Bonito, N.; Henriques, P.;

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

- Sobreiro, S. (2007). *Mármore e calcários ornamentais de Portugal*. Lisboa: Laboratório Nacional de Energia e Geologia.
- Moura, M. M. (2012). *Avaliação da Potencialidade de Rochas Xistosas para Aplicações como Rochas Ornamentais e de Revestimento* (Tese de Doutoramento) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Município de Alenquer. 24 de Mai. 2016 <<http://www.cm-alenquer.pt/custompages/showpage.aspx?pageid=2923353b-10a4-4a23-9102-c1e24b6e647f&m=b106>>.
- Museu Nacional de Arqueologia. "Mosaicos Romanos nas colecções do Museu Nacional de Arqueologia: Ars musiva (as artes e os artífices musivos)". 9 Set. 2016. 14 Abr. 2016 <<http://www.museuarqueologia.pt/documentos/Dados%20didacticos.pdf>>.
- NP EN 1342:2014, Norma Portuguesa. *Cubos e paralelepípedos de pedra natural para pavimentos exteriores - Requisitos e métodos de ensaio (2ª ed.)*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 1925:2000, Norma Portuguesa. *Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade*. Instituto Português da Qualidade. Caparica: Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 1926:2008, Norma Portuguesa. *Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação da resistência à compressão (2ª ed.)*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 1936:2008, Norma Portuguesa. *Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta (2ª ed.)*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 12370:2001, Norma Portuguesa. *Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação da resistência à cristalização de sais*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 12371:2010, Norma Portuguesa. *Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação da resistência ao gelo (2ª ed.)*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 13755:2008, Norma Portuguesa. *Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação da absorção de água à pressão atmosférica (2ª ed.)*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 14157:2007, Norma Portuguesa. *Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação da resistência ao desgaste*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 14579:2007, Norma Portuguesa. *Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação da velocidade de propagação do som*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.
- Paradela, P. L. & Zbyszewski, G. (1971). "Hidrogeologia Geral do Centro e Sul de Portugal". *I Congresso Hispano-Luso-Americano de Geologia Económica. Livro Guia da Excursão*, nº 9. Lisboa: Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos.
- Pedrosa, D. M. F. (2013). *Caracterização de Materiais Pétreos Através do Ensaio por Ultra-Som* (Dissertação de Mestrado) Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Pereira, E. & Medeiros, M. H. F. (2012). "Ensaio de "Pull Off" para avaliar a resistência à compressão do concreto: uma alternativa aos ensaios normalizados no Brasil". *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, Vol. 5, n.º 6, p. 757-780.
- Piauilino, L. S. (2014). *Análise de AVO para caracterização de um reservatório clástico na Bacia Sedimentar do Oeste do Canadá* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal Fluminense. 13 de Jun. 2016 <[http://www.geofisica.uff.br/sites/default/files/projetofinal/2014\\_larissa\\_da\\_silva\\_piauilino.pdf](http://www.geofisica.uff.br/sites/default/files/projetofinal/2014_larissa_da_silva_piauilino.pdf)>.
- Pimenta, J. G. (2008). *Pavimento Urbano: Adequação ao Uso - Reflexões a Propósito do Espaço Público no Contexto do Centro Histórico de Lisboa* (Dissertação de Mestrado). Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

## Referências Bibliográficas

- Pinto, A. C. R. (2006). *Manual de pedra natural para a arquitectura*. Lisboa: Direcção Geral de Geologia e Energia.
- Pinto, A. C. R.; Almeida N. C.; Mestre, V.; Tello, J. M. S. N.; Alho, A. A.; Moura, A. C.; Henriques, A. M. E.; Carvalho, C. I. P. & Ramos, J. M. F. (2006). *Manual da Pedra Natural para a Arquitectura*. Lisboa: Direcção Geral de Geologia e Energia.
- Pinho, A. B. (2003). *Caracterização geotécnica de maciços rochosos de baixa resistência - O flysch do Baixo Alentejo* (Tese de Doutoramento). Universidade de Évora, Évora.
- Projecto de Lei N.º 189/IX – Assegura a Defesa e a Valorização da Calçada de Vidraço à Portuguesa. Assembleia da República, 20 de Dezembro de 2002. 24 de Nov. 2015 <[http://www.pcp.pt/joomla/index.php?option=com\\_content&task=view&id=6876&Itemid=552](http://www.pcp.pt/joomla/index.php?option=com_content&task=view&id=6876&Itemid=552)>.
- Prodystone, 2015. 20 Nov. 2015 <<http://www.prodystone.com/ServicoDetalhes.aspx?id=9>>.
- Ramírez, F. C. (2015). *Detecção de danos em estruturas de concreto por meio de tomografia ultrassônica* (Dissertação de Mestrado) Universidade de São Paulo, São Paulo. 2 de Ago. 2016 <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-27052015-171423/pt-br.php>>.
- Rébola, P. (2011). “Ensaio do Tipo Inicial para Marcação CE da Pedra Natural”. Centro Tecnológico para o Aproveitamento e Valorização de Rochas Ornamentais e Industriais. 19 de Jul. 2016 <[http://www.ordemengenheiros.pt/fotos/dossier\\_artigo/ensaio\\_tipo\\_inicial\\_mce\\_paularebola4045427404da5b1e208fdd.pdf](http://www.ordemengenheiros.pt/fotos/dossier_artigo/ensaio_tipo_inicial_mce_paularebola4045427404da5b1e208fdd.pdf)>.
- Ribeiro, J. M. A. C. (2013). *Aplicação de ultrassons na caracterização de estruturas de betão* (Dissertação de Mestrado) Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Roc2c, 2006. 22 Out. 2015 <<http://roc2c.com/pt/historia-da-calcada/>>.
- Rodriguez-Navarro, C.; Dohne, E. & Sebastian, E. (1999). “Origins of honeycomb weathering: The role of salts and wind”. *GSA Bulletin*, Vol. 111, nº. 8, p. 1250–125.
- Rodrigues, N. E. V. (2013). Apresentações das aulas de Avaliação de Georrecursos (não publicado). Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Rodrigues, S. (2004). *As vias romanas do Algarve*. Faro: Centro de Estudos do Património da Universidade do Algarve / Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Algarve.
- Santarém Andrade, P. G. C. (2004). *Caracterização Geomecânica e Análise da Estabilidade em Maciços Rochosos Anisotrópicos: Taludes do IP3 e da EN234 (Portugal Continental)* (Tese de Doutoramento). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Santarém Andrade, P. G. C. (2015). *Apresentações das aulas de Estabilidade de Taludes* (não publicado). Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Santos, F. J. A. (2004). “Inovação e Competitividade no Sector da Calçada Portuguesa”. *Rochas & Equipamentos*, nº 73, p. 8-28, Lisboa.
- Silva, C. H. C., (2010). *Comportamento Geotécnico dos Filitos do Talude Oeste da Mina Pau Branco*, (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais.
- Silva, L. F. (2002). *A Região de São Brás de Alportel na Antiguidade. Ensaio de geografia histórica*. Tavira: Associação Campo Arqueológico de Tavira.
- Silveira, L. L. L. (2007). *Polimento de rochas Ornamentais: um enfoque tribológico ao processo* (Tese de Doutoramento) Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Simão, J.; Carvalho, C.; Silva, Z. & Moura, A. C. (2010). “Factor de qualidade em rochas ornamentais com base em ensaios mecânicos e envelhecimento artificial”. *Geotecnia*, n.º 119, p. 97-109, Lisboa.
- SMAS Sintra, 2014. *Projecto de Execução N.º 58: Elaboração do Projecto de Remodelação das Redes de Abastecimento de Água, Águas Residuais Domésticas e Pluviais em São Pedro de Sintra* (não publicado). Serviços Municipalizados de Água e Saneamento de Sintra.

## Caracterização Físico-Mecânica de Calcários Utilizados na Calçada Portuguesa

- Soares, A. A. O. (2014). *Revitalização do Castelo de Almourol* (Dissertação de Mestrado) Instituto Politécnico de Tomar, Tomar.
- Sousa, L. M. O. (2006). “Granito Amarelo Real: Características gerais e contribuição para o ordenamento da exploração na serra da Falperra (NE de Portugal)”. *Boletim de Minas*, Vol. 41 (2), p.161-174. Lisboa: Direcção-Geral de Geologia e Energia.
- Sousa, L. M. O. (2012). *Os granitos de Vila Pouca de Aguiar como factor de desenvolvimento regional: uma abordagem multidisciplinar*. Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- Sossai, F. J. M. (2006). *Caracterização Tecnológica de rochas Ornamentais*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Brasil.
- Soutinho, P. (2016). Vias Romanas em Portugal – Itinerários. 23 de Mar. 2016 <<http://www.viasromanas.pt/vrinfo.html>>.
- Souza, J. C.; Filho, J. L. R.; Barros, L. M. S. C.; Lira, B. B.; Silva, S. A., & Riek, F. E. (2008). “Análise Colorimétrica De Rochas Ornamentais”. *Estudos Geológicos*, Vol. 18 (1), p.55-64.
- Suguio, K. (2003). *Geologia Sedimentar*. São Paulo: Editora Blucher.
- Tourenq, C. & Archimbaud, C. (1974). “Proprietes de Calcaires”. *Bulletim liaison Laboratories des Ponts-et-Chaussées*, n.º 73, p. 171–178.
- União das Freguesias de Arrimal e Mendiga. 25 de Jun. 2016. Wikipédia. 24 de Mai. 2016 <[https://pt.wikipedia.org/wiki/União\\_das\\_Freguesias\\_de\\_Arrimal\\_e\\_Mendiga](https://pt.wikipedia.org/wiki/União_das_Freguesias_de_Arrimal_e_Mendiga)>.
- Vallejo, L. I. G. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- Velho, J. & Moura, A. (2012). *Recursos Geológicos de Portugal*. Coimbra: Palimage.
- VISA Consultores (2003). *Adaptação ao Decreto-Lei N.º 270/2001, de 6 de Outubro da Pedreira de Calcário “Outeiro da Seia” n.º 4866* (não publicado). Lisboa.
- VISA Consultores (2011). *Estudo de Impacte Ambiental: Projecto de Ampliação da Pedreira “Outeiro da Seia”* (não publicado). Lisboa.
- Zbyszewski, G. & Assunção, C. (1965). *Carta Geológica de Portugal na Escala 1/50.000 e Notícia Explicativa da Folha 30-D Alenquer*. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal.
- Zbyszewski, G.; Manuppella, G.; Veiga Ferreira, O.; Mouterde, R.; Ruget-Perrot, C.; Torre de Assunção, C. (2000). *Carta Geológica de Portugal na Escala 1/50.000 e Notícia Explicativa da Folha 27-A Vila Nova de Ourém*, 2ª ed. Lisboa: Instituto Geológico e Mineiro.
- Zbyszewski, G.; Manuppella, G.; Veiga Ferreira, O. (2006). *Carta Geológica de Portugal na Escala 1/50.000, 2ª ed. e Notícia Explicativa da Folha 27-C Torres Novas*. Lisboa: Departamento de Geologia, Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação.