



Rute Isabel Pinto Gomes
Licenciada em Engenharia Geológica

Contributo para a caracterização geotécnica dos gabros da faixa Beringel – Beja

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Geológica (Geotecnia)

Orientadora: Ana Paula Fernandes da Silva, Prof.^a Auxiliar, FCT/UNL
Co-orientadora: Sofia M.^a Mesquita Soares, Prof.^a Adjunta, ESTIG/IPBEJA

Júri

Presidente: Doutor Joaquim António dos Reis Simão, Prof. auxiliar – FCT/UNL
Vogais: Doutora M.^a Matilde M. Oliveira C. Horta Costa e Silva, Prof.^a auxiliar – IST/UTL
Doutora Eng.^a Ana Paula Fernandes da Silva, Prof.^a auxiliar – FCT/UNL
Mestre Sofia Maria Mesquita Soares, Prof.^a adjunta – ESTIG/IPB



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2011

Contributo para a caracterização geotécnica dos gabros da faixa Beringel – Beja

Copyright © Rute Isabel Pinto Gomes, 2011

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

AGRADECIMENTOS

A realização de qualquer trabalho com uma componente prática implica que se enfrentem situações que dificilmente se ultrapassam sozinho. Este trabalho não é exceção e deste modo procuro agradecer a todos aqueles que permitiram a sua realização. Posto isto, expressos os meus profundos e sinceros agradecimentos:

À Professora Ana Paula Silva, pela amizade, incentivo e paciência demonstrada ao longo do último ano, pela confiança demonstrada em diversas etapas que se converteram em motivação para fazer mais e melhor, assim como pelo fornecimento de documentação e da revisão crítica deste trabalho.

À Dra^a Sofia Soares, pela troca de documentação, esclarecimento de dúvidas mais pertinentes, revisão do trabalho e pelo apoio e motivação prestado ao longo de todo o processo, mas sobretudo pela prestabilidade em diversas situações.

Ao Departamento das Ciências da Terra da FCT - UNL, pela possibilidade de utilizar o laboratório de Geologia de Engenharia e de Microscopia, assim como, respetivamente, o material disponível para a realização dos ensaios e observação das lâminas delgadas.

Ao Departamento de Minas e Georrecursos do IST, na pessoa da Prof^a Matilde Costa e Silva, pelo empréstimo dos transdutores, para o ensaio de propagação de ultrassons.

À empresa BETOTESTE, na pessoa do engenheiro Pedro Couceiro, pelo acesso às instalações para realizar todos os ensaios de resistência à compressão uniaxial (RCU), e deformabilidade, assim como disponibilidade e prestabilidade.

Ao LEMO, na pessoa do Dr. Diogo Teles, pela disponibilidade e esclarecimento de dúvidas quanto ao funcionamento da prensa servo-controlada, para o ensaio RCU e deformabilidade.

Ao Prof Joaquim Simão, pelo esclarecimento de dúvidas de petrologia, assim como pelo empréstimo de equipamento pessoal para fotografar as lâminas delgadas.

A todos os meus colegas e amigos que, de um modo mais ou menos evidente, contribuíram para a realização deste trabalho, nomeadamente à Tatiana Ribeiro, por tudo e mais alguma coisa, à Maria Brás, pela ajuda na tradução e pelo apoio demonstrado, à Joana Cruz e ao Rui Almeida pela

companhia e ajuda no laboratório, à Elisabete Raposo pelo apoio nas horas mais desesperantes. A outros colegas que me acompanharam ao longo do Mestrado: Mariana Silva, Pedro Sousa, Mário Cândido e Sara Rocha.

Ao João, por toda a ajuda, paciência e amparo ao longo dos últimos anos, nas questões mais técnicas nas áreas que eu menos dominava, mas sobretudo por me apoiar sempre e me fazer acreditar que as coisas se concretizam.

Ao meu irmão, pelos momentos de cumplicidade e pela motivação ao longo dos anos, e por permitir que acreditasse que era possível atingir e finalizar esta importante fase da minha vida.

Ao meu Pai e à minha Mãe, pelo apoio que me deram durante toda a minha vida, mas sobretudo pelos sacrifícios que fizeram, que permitiram que concluísse esta etapa do meu percurso académico.

A todos, o meu mais profundo e sincero MUITO OBRIGADA!

RESUMO

A presente dissertação pretende contribuir para a caracterização geotécnica dos gabros, rochas intrusivas máficas, cujo conhecimento a nível internacional ainda é escasso, pois trata-se de uma litologia abundante na crosta oceânica, mas que é pouco vulgar encontrar sob a forma de afloramentos. Em Portugal, este tipo de rochas encontra-se no Complexo Subvulcânico de Sines e, em maior extensão, na Sequência Gabróica Bandada do Complexo Ígneo de Beja; contudo e até ao presente, só foram estudados do ponto de vista geotécnico as rochas respeitantes ao Complexo de Sines.

Neste contexto, avaliaram-se as principais propriedades geotécnicas de um conjunto de provetes (mais de uma centena), obtidos a partir de uma campanha de amostragem realizada na faixa Beringel – Beja, e que foram posteriormente submetidos a ensaios de laboratório.

O trabalho inicia-se por uma caracterização das propriedades geotécnicas das rochas intactas avaliadas nesta investigação, passando pela caracterização genérica das rochas gabróicas e, ainda, pelo enquadramento geológico da formação amostrada, que integra o Complexo Ígneo de Beja.

Apresenta-se, em seguida, a metodologia adotada para os ensaios de laboratório e discutem-se os resultados obtidos, incluindo correlações entre algumas daquelas propriedades.

Finalmente, sintetizam-se as principais conclusões obtidas e tecem-se considerações sobre a validade dos resultados.

Palavras-chave: Caracterização geotécnica; propriedades geotécnicas; gabro; Beja

ABSTRACT

The goal of this thesis is to contribute to gabbros physical and mechanical characterization. In fact, the international geotechnical knowledge of this mafic intrusive rock is still insufficient worldwide. Despite being an abundant lithology of the ocean crust, it is not very common to find it as an outcropping shape. In Portugal, these kinds of rocks can be found in the Sines Subvolcanic Complex and, in far more extension, at the Layered Gabbroic Sequence of the Beja Igneous Complex. However, and up until now, only the rocks belonging to the Sines' Complex have been studied in terms of their engineering properties.

In this context, this essay evaluates the main geotechnical properties of a group of samples (over one hundred), sampled at the Beringel-Beja area and submitted to several lab tests.

The work starts by the geotechnical properties assessment of intact rocks, followed by a generic characterization of the gabbros and, then, by the geologic framing of the formation sampled, which integrates the Beja Igneous Complex.

It follows the methodology adopted for the lab tests as well as the presentation and discussion of the results obtained, including the correlations between some of the index properties assessed.

Finally, the work synthesizes the main conclusions achieved, as well as some considerations on the validity of the results.

Key-words: Geotechnical characterization; Geotechnical properties; gabbros; Beja

ÍNDICE DE MATÉRIAS

AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO	v
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABELAS	xv
LISTA DE SIGLAS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	xvii
LISTA DE SIMBOLOS.....	xix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO	1
1.2 OBJECTIVOS.....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DA ROCHA INTACTA.....	5
2.1 ROCHA INTACTA E CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS.....	5
2.2 PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE ROCHAS	9
2.3 PROPRIEDADES INTRÍNSECAS.....	11
2.3.1 Teor em água.....	11
2.3.2 Porosidade.....	13
2.3.3 Peso volúmico e densidade	14
2.3.4 Dureza ao resalto	16
2.3.5 Velocidade de propagação de ultrassons.....	17
2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS	20
2.4.1 Resistência.....	20
2.4.2 Deformabilidade.....	23
2.5 AMOSTRAGEM E REPRESENTATIVIDADE DE RESULTADOS.....	28
2.5.1 Representatividade	29
2.5.2 Escala	30
2.5.3 Velocidade.....	31

2.5.4	Normas	31
3	ROCHAS GABRÓICAS	33
3.1	CLASSIFICAÇÃO DAS ROCHAS ÍGNEAS.....	33
3.2	GABROS	40
3.3	OCORRÊNCIAS DE GABROS.....	42
3.4	COMPLEXO ÍGNEO DE BEJA.....	46
3.4.1	Enquadramento geológico e geomorfológico.....	46
4	CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL.....	53
4.1	AMOSTRAGEM EFECTUADA9	53
4.1.1	Ponto 1	54
4.1.2	Ponto 4	56
4.2	SELECÇÃO E PROCESSAMENTO DAS AMOSTRAS	58
4.3	CARACTERIZAÇÃO DOS GABROS ENSAIADOS	61
4.4	ENSAIOS REALIZADOS.....	63
4.4.1	Teor em água.....	64
4.4.2	Porosidade e peso volúmico	65
4.4.3	Velocidade de ultrassons.....	66
4.4.4	Dureza ao ressalto	68
4.4.5	Resistência à tração indireta	69
4.4.6	Resistência à compressão uniaxial e deformabilidade.....	71
5	RESULTADOS OBTIDOS E SUA DISCUSSÃO	75
5.1	ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.....	75
5.1.1	Características físicas.....	75
5.1.2	Características dinâmicas	76
5.2	ENSAIOS DESTRUTIVOS	77
5.2.1	Resistência à tração brasileiro.....	77
5.2.2	Resistência à compressão uniaxial	78
5.2.3	Deformabilidade.....	79

5.3	CORRELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES ÍNDICE	83
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
	ANEXOS	99

ANEXOS 1 - Descrição dos provetes e respetivas dimensões

ANEXOS 2 - Resultados dos ensaios de porosidade e peso volúmico

ANEXOS 3 - Resultados dos ensaios para avaliação da dureza ao ressalto, martelo de Schmidt, tipo L

ANEXOS 4 - Resultados dos ensaios de ultrassons

ANEXOS 5 - Resultados dos ensaios de tração brasileira

ANEXOS 6 - Resultados dos ensaios de compressão uniaxial e deformabilidade

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Exemplo de um maciço fraturado, Barragem de Odelouca	6
Figura 2.2 - Diversos sistemas de classificação para a rocha intacta no que respeita à resistência	7
Figura 2.3 - Classificação dos diferentes tipos de rochas baseada na relação ente o módulo de Young e a RCU	8
Figura 2.4 - Esquematização do interior de um martelo de Schmidt durante o ensaio	17
Figura 2.5 - Gama de velocidades para as ondas P e S em algumas rochas ígneas	19
Figura 2.6 - Modelos de comportamentos tensão - deformação	25
Figura 2.7 - Curva de tensão-extensão obtida do ensaio de compressão uniaxial	27
Figura 3.1 - Formação de rochas ígneas: zonas de convergência e de divergência	33
Figura 3.2 - Intrusão magmática, vulcanismo associado e alguns exemplos de rochas resultantes de várias velocidades de arrefecimento dos magmas	34
Figura 3.3 - Classificação básica de rochas ígneas.....	37
Figura 3.4 - Resumo das classificações de rochas ígneas segundo índices de granularidade, de cor e de acidez.....	38
Figura 3.5 - Diagrama QAPF para rochas ígneas plutónicas com mais de 10% de minerais félsicos e menos de 90% de minerais máficos, baseada na classificação da IUGS	39
Figura 3.6 - Diagrama da nomenclatura IUGS para rochas gabróicas, baseado em proporções modais de plagioclase, olivina, ortopiroxena e clinopiroxena na rocha.....	41
Figura 3.7 - Bandado gabróico na formação do ofiolito de Semail em Omã.	42
Figura 3.8 - Ilustração esquemática da Intrusão Bandada de <i>Skaergaard</i> , na Gronelândia	44
Figura 3.9 - Rede diques sieníticos em gabros no maciço eruptivo de Sines	45
Figura 3.10 - A Zona de Ossa-Morena (ZOM) localizada entre a Zona Centro Ibérica (CIZ) e a Zona Sul Portuguesa (ZSP) e principais características tectonoestratigráficas.....	47
Figura 3.11 - Secções transversais interpretativas do final da fase de obducção.....	48
Figura 3.12 - Mapa geológico do Domínio de Évora-Beja	48
Figura 3.13 - Coluna litológica sintética do sector Ferreira do Alentejo – Beringel, do compartimento ocidental da LGS.....	52
Figura 4.1 - Imagem de satélite da área em estudo e dos dois locais amostrados.....	53
Figura 4.2 - Imagem de satélite da área de amostragem do Ponto 1	54
Figura 4.3 - Aspeto do local de amostragem do Ponto 1	55
Figura 4.4 - Roseta das diaclases, executada no programa Dip, dos taludes do Ponto 1	55
Figura 4.5 - Imagem de satélite da área de amostragem do Ponto 4	56
Figura 4.6 - Aspeto do local de amostragem do Ponto 4	57

Figura 4.7 - Maciço rochoso no Ponto 4.....	57
Figura 4.8 - Roseta das diaclases, executada no programa Dips, dos taludes do Ponto 4	58
Figura 4.9 - Caroteadora no laboratório e carotagem de um bloco	59
Figura 4.10 - Tarolos resultantes do caroteamento dos blocos.....	60
Figura 4.11 - Provetes do Ponto 1 divididos em grupos segundo os critérios referidos.....	61
Figura 4.12 - Amostra de mão dos gabros observadas à lupa	62
Figura 4.13 - Análise micropetrográfica do gabro do ponto 1	62
Figura 4.14 - Análise micropetrográfica do gabro do ponto 4	63
Figura 4.15 - Ensaio de determinação da porosidade e peso volúmico.....	65
Figura 4.16 - Aparato para a medição das velocidades das ondas acústicas.....	67
Figura 4.17 - Medição da dureza ao ressalto com o martelo de Schmidt.....	69
Figura 4.18 - Proвете montado na prensa para o ensaio de RTB.....	70
Figura 4.19 - Disposição da colagem dos extensómetros nos provetes de RCU.....	72
Figura 4.20 - Curva tensão-deformação.....	72
Figura 4.21 - Determinação gráfica dos módulos de elasticidade	73
Figura 5.1 - Curvas tensão-extensão dos provetes do ponto 1 - grupo1, obtidas do ensaio RCU.....	79
Figura 5.2 - Curvas tensão-extensão dos provetes do ponto 4 - grupo 1, obtida do ensaio RCU.....	80
Figura 5.3 - Curvas tensão-extensão dos provetes do ponto 4 - grupo 2, obtida do ensaio RCU.....	80
Figura 5.4 - Comparação direta entre módulos de elasticidade dinâmicos e estáticos.....	82
Figura 5.5 - Comparação direta entre coeficientes de Poisson dinâmicos e estáticos	83
Figura 5.6 - Correlação exponencial entre alguns valores de porosidade e RCU para provetes do ponto 1 e 4.....	84
Figura 5.7 - Correlação linear entre alguns valores de dureza ao ressalto (R_L) e RCU para provetes do ponto 1 e 4	85

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação de rocha intacta a partir da RCU de acordo com o RMR e a BGD	8
Tabela 2.2 - Propriedades geotécnicas de rochas intactas e alguns ensaios para a sua determinação	11
Tabela 2.3 - Valores típicos de porosidade nalguns tipos de rochas ígneas	14
Tabela 2.4 - Valores típicos de peso volúmico em alguns tipos de rochas ígneas	16
Tabela 2.5 - Gama de valores de velocidades de propagação das ondas longitudinais para algumas rochas ígneas	18
Tabela 2.6 - Valores de RCU para algumas rochas ígneas intactas sãs	23
Tabela 2.7 - Classificação do coeficiente de Poisson proposta por Gercek	26
Tabela 2.8 - Valores de módulos de elasticidade dinâmico e estático e de coeficientes de Poisson para alguns tipos de rochas ígneas	27
Tabela 3.1 - Classificação de rochas ígneas segundo critérios texturais.....	36
Tabela 3.2 - Algumas intrusões gabróicas bandadas importantes.....	43
Tabela 3.3 - Valores de algumas propriedades geotécnicas para o gabro de Sines	46
Tabela 4.1 - Resumo das recomendações de várias normas quanto ao número necessário e geometria dos provetes nos ensaios RCU, RTB e determinação da porosidade e densidade	59
Tabela 4.2 - Resumo das principais características mineralógicas e petrográficas do gabro do ponto 1	62
Tabela 4.3 - Resumo das principais características mineralógicas e petrográficas do gabro do ponto 4	63
Tabela 5.1 - Resumo dos resultados dos ensaios de porosidade e massa volúmica efetuados nos quatro grupos de amostras ensaiados.....	75
Tabela 5.2 - Resumo dos resultados das medições para avaliar a dureza ao resalto em seis blocos de gabro.	76
Tabela 5.3 - Resumo dos resultados dos ensaios para determinação das ondas acústicas P e S em gabros no laboratório.....	76
Tabela 5.4 - Resumo dos resultados calculados para os parâmetros elásticos dinâmicos.....	77
Tabela 5.5 - Resumo dos resultados obtidos na resistência à tração brasileiro	78
Tabela 5.6 - Resumo dos resultados da RCU em gabros.....	78
Tabela 5.7 - Resumo dos cálculos para determinação dos módulos de elasticidade estático dos gabros	79
Tabela 5.8 - Resumo dos cálculos para determinação do coeficiente de Poisson estático e da relação entre o módulo de deformabilidade e o valor médio de RCU	79

Tabela 6.1 - Recomendações da ISRM e normas ASTM nos ensaios realizados na dissertação.....	88
Tabela 6.2 - Resumo das propriedades intrínsecas dos gabros de Beja ensaiados	89
Tabela 6.3 - Resumo das propriedades mecânicas dos gabros de Beja ensaiados.....	89
Tabela 6.4 - Resumo das correlações preliminares obtidas para os gabros de Beja	90

LISTA DE SIGLAS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A – feldspatos alcalinos

An – anortite

ASTM – *American Society of Testing and Materials*

BGD – *Basic Geotechnical Description*

BSI – *British Standards Institution*

CEGSA – Centro de Estudos de Geologia e Geotecnia de Santo André

CEN – *Comité Européen de Normalisation*

CIB – Complexo Ígneo de Beja

CICEGE – Centro de Investigação em Ciências e Engenharia Geológica

F – feldspatóides

FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologias

IAEG - *International Association for Engineering Geology and the Environment*

ID-TIMS - *thermal ionization mass spectrometry*

IGM – Instituto Geológico e Mineiro

IP2 – Itinerário principal nº 2

IP8 – Itinerário principal nº 8

IPQ – Instituto Português de Qualidade

ISO – *International Standards Organisation*

ISRM – *International Society of Rock Mechanics*

IUGS – *International Union of Geological Sciences*

LGB – Sequência Gabróica Bandada

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LNEG – Laboratório Nacional de Energia E Geologia

M – minerais máficos

N X – nicóis cruzados

N// - nicóis paralelos

N121 – Estrada Nacional 121

NP EN – Normas Portuguesas

P – plagioclases

PGE – elementos do grupo da platina

PUNDIT – *Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indication Tester*

Q – quartzo

RCU – Resistência à Compressão Uniaxial

R_L – número de ressalto

RMR – *Rock Mass Rating*

RTB – resistência à tração brasileiro

RTH – *Rock Testing Handbook*

SiO₂ – sílica

UNL – Universidade de Nova de Lisboa

USACE – *United States Army Corps of Engineers*

V_p – velocidade das ondas de compressão ou ondas longitudinais ou ainda ondas P

V_s - velocidade das ondas de transversais ou ondas S

ZOM – Zona de Ossa-Morena

ZSP – Zona Sul-Portuguesa

LISTA DE SIMBOLOS

Alfabeto latino

A – área

Al – alumínio

Au – ouro

c – coesão

Ca – cálcio

Cr – crómio

Cu – cobre

D – diâmetro

E – módulo de Young ou módulo de elasticidade

E_d – módulo de Young ou módulo de elasticidade dinâmico

F_c – força compressiva aplicada

Fe – ferro

F_t – força de tração aplicada

g – aceleração da gravidade

G – densidade das partículas sólidas

h - altura

H_2O – água

K – potássio

L – comprimento

m_d – massa da amostra seca

Mg – magnésio

m_{sat} – massa do provete saturado

m_{sub} – massa do provete submerso

m_w – massa da amostra antes de ir à estufa

n – porosidade

n_0 – porosidade aberta

n_e – porosidade eficaz ou acessível à água

Na – sódio

Ni – níquel

Pb – chumbo

Rb – rubídio

Sr – estrôncio

t – espessura

u – tensão intersticial

U – urânio

V – vanádio

V – volume da rocha

V_p – volume dos poros da rocha

V_t – volume total da rocha

W_{sat} – peso saturado da amostra

W_{seco} – peso seco da amostra

Alfabeto grego

ε - extensão

ε_{ax} – extensão axial

ε_r – extensão radial

ϕ – ângulo de atrito da descontinuidade

γ – peso volúmico

φ – ângulo de atrito interno

ν – coeficiente de Poisson

ν_d – coeficiente de Poisson dinâmico

ω – teor em água

ρ – densidade

ρ_a – massa volúmica aparente

ρ_w – massa volúmica da água

σ – tensão

σ' – tensão normal efetiva

σ_c – resistência à compressão uniaxial

σ_n – tensão normal

σ_p – resistência de pico ou última

σ_r – resistência residual

σ_t – resistência à tração

σ_y – tensão de cedência

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

A caracterização geotécnica permite o zonamento geotécnico de um dado maciço, nomeadamente rochoso, avaliando-se a sua aptidão para a implantação de uma obra geotécnica (adaptado de Costa e Silva *et al.*, 2001). É uma prática essencial em qualquer obra de engenharia que se realize atualmente, sendo particularmente relevante no caso de obras geotécnicas que impliquem grandes escavações, a céu aberto ou mineiras.

Quando se trabalha em maciços rochosos esta caracterização é de especial relevância, uma vez que a interação com massas de rochas recortadas por discontinuidades impõe perigos diversos derivados, por exemplo, do deslizamento de blocos de rocha em resultado da descompressão do maciço. O estudo da rocha intacta corresponde apenas a uma parte dessa caracterização.

Uma caracterização geotécnica adaptada ao tipo de terreno e ao tipo de obra permite otimizar não só a respetiva conceção, mas também a ulterior construção, tornando-a mais económica e segura, nomeadamente ao antecipar a escavabilidade do maciço e/ou a sua capacidade resistente, possibilitando também a adequação das eventuais medidas de reforço, evitando-se potenciais atrasos, custos adicionais ou incidentes durante a construção.

Contudo, ela foi durante algum tempo, e muitas vezes ainda é, uma prática desvalorizada e considerada como um atraso nos trabalhos e um gasto desnecessário, sendo o terreno conseqüentemente mal caracterizado e os respetivos parâmetros, a adotar em sofisticados modelos de cálculo, grosseiras aproximações da realidade. No entanto, quando esta atividade é executada adequadamente, a caracterização geotécnica tem custos mínimos, comparados com o valor total da obra, sobretudo quando esta sofre atrasos e/ou alterações significativas devido a imprevistos resultantes de uma caracterização deficiente ou inexistente.

Portanto, uma adequada caracterização geotécnica de maciços rochosos é imprescindível para o desenvolvimento de um projeto, sendo objeto de estudo por parte de inúmeros geotécnicos e engenheiros especialistas em Mecânica das Rochas.

Neste sentido, têm sido desenvolvidas ao longo dos anos sistemas que permitem classificar e descrever os maciços rochosos de modo a que a estimativa da respetiva qualidade possa ser inequívoca perante geólogos de engenharia ou engenheiros, minimizando eventuais erros que possam ocorrer em consequência de eventuais mal entendidos. No intuito de diminuir a complexidade, criaram-se sistemas de descrição/classificação dos maciços com um pequeno número

de descritores geológicos e geotécnicos, entre os quais sobressaem a Descrição Geotécnica Básica – BGD (ISRM, 1981) e a classificação geomecânica de Bieniawski (1973; 1989), essencialmente de determinação/avaliação expedita, sem descurar o objetivo final para o qual foram desenvolvidas. Quase todos estes sistemas consideram certos parâmetros do material rocha intacto como representativos/significativos para a avaliação empírica do comportamento do maciço a que pertencem, o que em casos de anisotropia e heterogeneidade mais acentuada dos maciços, acarreta sempre uma certa imprecisão.

A metodologia de classificação é composta por duas etapas principais, a saber (adaptado de Costa e Silva *et al.*, 2001):

- a) Caracterização – identificação e determinação de parâmetros geológicos e geotécnicos do maciço rochoso (descontinuidades e rocha) e seu zonamento;
- b) Estabelecimento da classificação – atribuição de diferentes pesos aos parâmetros geotécnicos da fase anterior, de acordo com uma dada chave.

A identificação e determinação dos parâmetros de uma dada zona geotécnica de um maciço rochoso requerem o conhecimento relativo das diversas descontinuidades do maciço, das propriedades físicas do material rocha e das características mecânicas de ambas (adaptado de Deere e Miller, 1966).

As propriedades físicas dos blocos de rocha intacta e o número e natureza das descontinuidades que delimitam os blocos individuais influenciam as características resistentes, deformacionais e hidráulicas do maciço rochoso. Assim, ainda que as descontinuidades estejam sempre presentes em maciços rochosos, na forma de planos ou superfícies que separam blocos de rocha intacta, é prática investigar inicialmente as propriedades do material intacto na introdução ao estudo do comportamento do maciço.

Na presente dissertação não se irá debater o comportamento e classificação de maciços rochosos *in situ* e das suas inerentes descontinuidades, mas apenas centrar-se numa fração daquela primeira etapa – a caracterização das propriedades geotécnicas da rocha intacta.

1.2 OBJECTIVOS

A presente dissertação insere-se numa linha de investigação do Centro de Investigação em Ciência e Engenharia Geológica (CICEGE), da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Universidade Nova

de Lisboa (UNL), no âmbito da qual está em fase adiantada de elaboração uma Tese de doutoramento em Engenharia Geológica.

Nesse contexto, foi proposto à autora desenvolver uma pesquisa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica (Geotecnia) que tem como principal objetivo contribuir para a caracterização geotécnica dos gabros de uma zona situada a poente de Beja e a nascente da falha da Messejana (também designada de Odemira – Ávila), que integram a atualmente designada Sequência Gabróica Bandada (LGB) do Complexo Ígneo de Beja (CIB), investigando as respetivas propriedades físicas, dinâmicas e mecânicas. Pretende-se ainda desenvolver algumas correlações preliminares entre algumas daquelas características índice.

Para o efeito, foram recolhidos um conjunto de blocos de gabros na área alvo, na envolvente do Itinerário Principal nº8 (IP8) entre Beringel e Beja, que foram devidamente identificados e acondicionados e, ulteriormente, transportados para o laboratório de Geologia de Engenharia da FCT – UNL. Ali foram processados com recurso a uma caroteadora de diâmetro NX para obtenção de um conjunto de tarolos e, destes, talharam-se mais de uma centena de provetes. Após seleção, estes foram ulteriormente submetidos a diversos ensaios de laboratório para a caracterização das propriedades geotécnicas daquela rocha intacta.

A descrição dos ensaios realizados, bem como os resultados obtidos e a sua discussão, integram o corpo desta dissertação.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este documento, composto por seis capítulos, inicia-se por esta introdução, onde se circunscreve sucintamente o tema investigado, bem como se estabelecem os objetivos em prossecução e se descreve a respetiva organização.

No segundo capítulo revêem-se alguns conceitos relativos à caracterização geotécnica de rochas intactas; esclarecem-se alguns conceitos relativos à terminologia associada às propriedades geotécnicas utilizadas como base da maioria das classificações de maciços rochosos, assim como se listam os principais ensaios laboratoriais vulgarmente utilizados na sua avaliação. Avançam-se ainda algumas considerações relativas à amostragem de rocha e representatividade dos resultados.

No terceiro capítulo analisam-se os gabros no contexto das rochas ígneas, no que respeita à sua génese e respetivas condições paleogeográficas e tectónicas, e os principais afloramentos estudados

em todo o mundo e em Portugal. Inclui-se ainda o enquadramento geográfico e geológico da área estudada.

No quarto capítulo descreve-se a amostragem desenvolvida e a ulterior caracterização experimental realizada em laboratório, com especial ênfase na normalização e recomendações disponíveis e adotadas. É igualmente relatado o processamento dos blocos de gabros para obtenção de provetes.

No quinto capítulo sintetizam-se os valores de referência para as diferentes propriedades geotécnicas analisadas, estabelecem-se algumas correlações entre as várias propriedades índice e discutem-se os resultados obtidos.

Por último, no capítulo seis, tecem-se as principais conclusões do trabalho desenvolvido.

Nos Anexos 1 a 6, incluem-se os registos dos resultados obtidos em todos os ensaios de laboratório efetuados.

As imagens ou fotografias não referenciadas são da responsabilidade da autora, com exceção da fotografia da Figura 4.7, que foi gentilmente cedida pela Mestre Sofia Soares, do Instituto Politécnico de Beja.

2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DA ROCHA INTACTA

2.1 ROCHA INTACTA E CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS

A rocha intacta define-se como um sólido policristalizado, consistindo de um agregado natural de minerais, cujas propriedades dependem das propriedades físicas dos seus constituintes e do tipo de ligação entre eles (Deere e Miller, 1966). Pode ser descrita tanto do ponto de vista geológico como geotécnico. No primeiro caso a origem e os minerais contidos são de primordial importância, assim como a sua textura e eventuais mudanças que possam ter ocorrido desde a sua formação. Neste contexto, o nome da rocha fornece uma indicação da sua génese, composição mineralógica e textura (ISRM, 1981; Bell, 2007). Do ponto de vista geotécnico, a descrição da rocha geralmente deve incluir uma descrição básica do material, assim como a sua ocorrência no afloramento e uma estimativa da sua área de extensão e contactos geológicos (IAEG, 1981; ISRM, *op. cit.*).

As propriedades geotécnicas a analisar, essenciais para a sua identificação e antecipação do seu comportamento são obtidas tanto *in situ* como em laboratório. Quando é possível obter uma amostra de rocha representativa, as suas propriedades podem ser avaliadas em laboratório. Caso não seja possível obter amostras de qualidade para estes fins, as propriedades são obtidas com maior rigor através de ensaios de campo realizados à superfície, dentro de furos de sondagens ou em escavações.

As características da rocha como a cor, mineralogia, textura, estrutura, presença de alteração/meteorização entre outras, e as respetivas propriedades geotécnicas a avaliar são identificadas e medidas, e posteriormente descritas, usando uma terminologia normalizada (ISRM, 1981). As propriedades podem ser a resistência, a deformabilidade e a condutividade hidráulica, entre outras.

Segundo Peck *et al.* (1974), se os ensaios para a classificação forem selecionados adequadamente, materiais rochosos com propriedades índice semelhantes, independentemente das suas origens geológicas, são prováveis de exibir comportamentos geotécnicos semelhantes.

Uma lista de propriedades geotécnicas de uma amostra de rocha em laboratório pode permitir a classificação das suas aplicações relacionadas, principalmente, com o comportamento da *rocha* em si, em oposição às interações entre o *maciço rochoso* e o seu sistema de descontinuidades. Contudo, tal não significa que as propriedades do material rocha intacto devam ser menosprezadas quando se avalia o comportamento mecânico de um maciço rochoso fraturado, Figura 2.1.



Figura 2.1 - Exemplo de um maciço fraturado, Barragem de Odelouca

Como referido e de um modo geral, os sistemas de classificações geotécnicas são aplicados a zonas do maciço consideradas homogéneas em termos da sua resposta a uma dada solicitação que lhe seja imposta, sendo cada uma estudada separadamente. Os limites entre estas zonas geralmente correspondem a características estruturais importantes, como falhas ou mudanças litológicas, e/ou de intensidade de meteorização, podendo dividir-se o maciço em subzonas menores caso ocorram alterações significativas no espaçamento de descontinuidades ou nas características dum mesmo tipo de rocha (Hoek, 2006). Os parâmetros obtidos em laboratório para a caracterização da rocha intacta permitem descrever estas zonas homogéneas do maciço que são posteriormente avaliadas com os distintos sistemas de classificação geotécnica.

Segundo Vallejo (2011) e relativamente às classificações geotécnicas, a grande variedade de propriedades das rochas e as limitações dos métodos e processos para as determinar constituem as principais dificuldades, assim como o estado de meteorização da rocha intacta resultante da ação dos agentes atmosféricos que, reduzindo a sua capacidade resistente, consiste em mais uma dificuldade na seleção dos parâmetros a estudar.

Foram propostas algumas classificações que apresentavam como parâmetros a resistência do material rochoso e os módulos de elasticidade. A resistência do material rochoso está incluída nos parâmetros de classificação da maioria dos sistemas de classificações de maciços rochosos, Figura 2.2. É um parâmetro essencial, pois a resistência da rocha intacta constitui a resistência limite máxima do maciço rochoso. A resistência à compressão uniaxial (RCU) pode ser, indiretamente,

estimada em campo através do índice de compressão pontual (*point-load index*) ou da dureza ao resalto com o esclerómetro (ou martelo de Schmidt) do tipo L ou N, e diretamente, em laboratório, através do ensaio de compressão em prensa para obtenção dos valores efetivos.

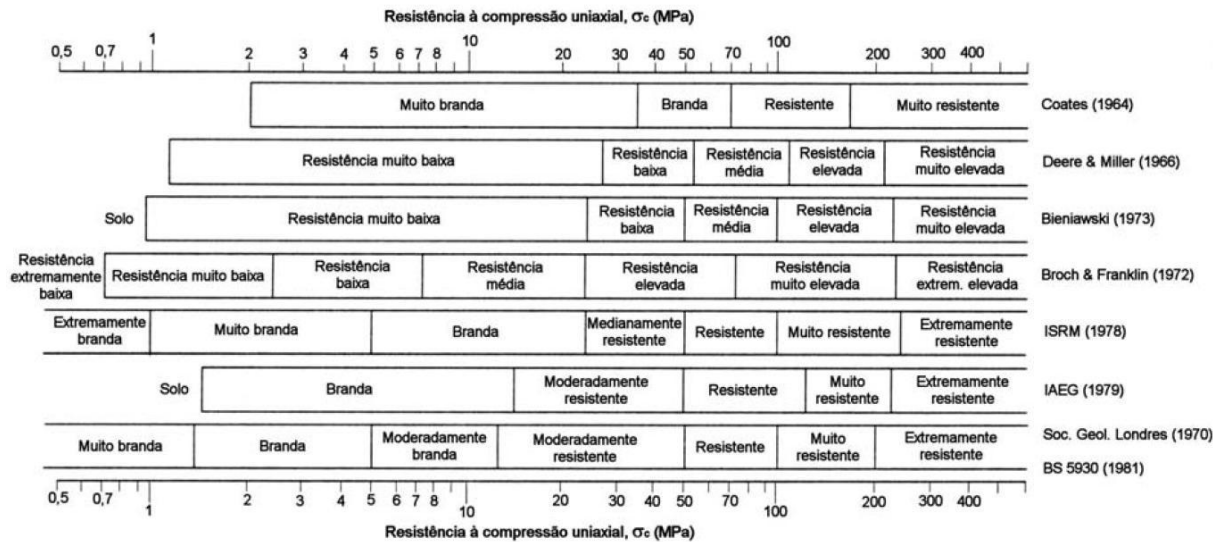


Figura 2.2 - Diversos sistemas de classificação para a rocha intacta no que respeita à resistência (Pinho, 2003)

A classificação de Bieniawsky (1973), designada de Rock Mass Rating (RMR), é uma das mais conhecidas e usadas atualmente, e foi alvo de modificações ao longo dos anos à medida que surgiam novos casos de estudo, reformulando-se em conformidade com normas e procedimentos internacionais, mantendo sempre os mesmos parâmetros básicos (Bieniawsky, 1989), onde se inclui a resistência da rocha intacta.

A descrição BGD foi desenvolvida pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM, 1981), com o propósito de criar uma forma empírica de descrever objetivamente as várias zonas constituintes de um dado maciço rochoso, através de informação recolhida em afloramentos ou da observação de tarolos de sondagens, conjugada com ensaios expeditos.

Este método adota uma linguagem simbólica muito simples, que permite uma avaliação muito expedita do maciço, não se tratando de uma descrição exaustiva do maciço rochoso, sendo muitas vezes complementada com informação adicional mais detalhada (ISRM, 1981).

A classificação qualitativa de rochas pode ser feita a partir do grau de meteorização da rocha intacta, dando uma ideia das características geotécnicas ou mecânicas. O aumento na intensidade de

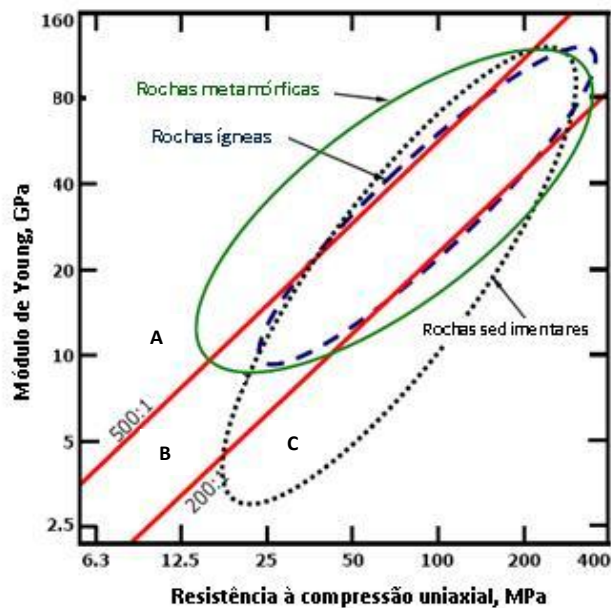
meteorização traduz-se num aumento da porosidade, da condutividade hidráulica e da deformabilidade do material rochoso e, inversamente, reduz a sua resistência.

A RCU de uma zona do material rochoso resulta do valor médio de resistência de um conjunto de amostras recolhidas em pontos da zona a avaliar, em função do seu estado de meteorização.

Alguns exemplos de intervalos de valores de RCU para diversos tipos de rochas, nomeadamente ígneas, estão listados na Tabela 2.1 e Figura 2.3.

Tabela 2.1 - Classificação de rocha intacta a partir da RCU de acordo com o RMR e a BGD (adaptado de ISRM, 1981; Vallejo e Ferrer, 2011)

RMR – Bieniawski (1973)		Exemplos	BGD – ISRM (1981)				
RCU (MPa)	Resistência		Resistência		Símbolo	RCU (MPa)	
<1	Solo		Muito baixa	Baixa	S _{1,2}	S ₁	< 6
1 – 5	Muito baixa	Sal-gema, lutite, limonite, marga, tufo calcário, carvão	Baixa	Moderada		S ₂	6 – 20
5 – 12,5			Baixa		Xisto, ardósia	Alta	S ₃
12,5 – 25	Média	Rochas metamórficas xistentas, mármore, granito, gneiss, arenitos, calcário poroso		Alta			S ₄
25 – 50			Alta		Rochas ígneas e metamórficas duras, arenitos muito cimentados, calcite	Muito alta	S ₅
50 – 100	Muito alta	Quartzitos, gabros, basaltos					
100 – 200							
> 200	Muito alta	Quartzitos, gabros, basaltos					
> 250							



A – Elevado rácio entre módulos; B – Rácio entre módulos médio; C – Baixo rácio entre módulos

Figura 2.3 - Classificação dos diferentes tipos de rochas baseada na relação entre o módulo de Young e a RCU (Silva, 2010)

Outro parâmetro utilizado em classificações geotécnicas é a razão entre o módulo de Young (E) e a RCU da rocha (σ_c). A classificação que propôs este parâmetro pela primeira vez foi avançada por Deere e Miller (1966). Os autores afirmavam que as rochas podiam ser classificadas usando os valores reais de resistência à compressão uniaxial e módulos de Young determinados em laboratório ou usando valores aproximados obtidos de correlações de propriedades índice (Deere e Miller, 1966). O valor deste cociente, que geralmente varia de acordo com a litologia, situando-se entre 200 e 500 para a maioria das rochas.

2.2 PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE ROCHAS

A análise da bibliografia da especialidade permitiu verificar que existe uma significativa diversidade de opiniões entre os autores quanto aos vários tipos de propriedades geotécnicas a considerar nas rochas intactas, se bem que todos concordem que aquelas propriedades dependem das propriedades físicas, também designadas de intrínsecas, dos materiais que a constituem. Ainda que algumas propriedades estejam inequivocamente definidas, como o caso das mecânicas, a resistência e a deformabilidade, que são universalmente consideradas e refletem o comportamento das rochas, quando sujeitas a determinadas solicitações, outras definições deixam espaço para algumas dúvidas, como é o caso de propriedades índice, intrínsecas e físicas.

De modo a simplificar o estudo realizado e evitar ambiguidades ao longo do trabalho, as propriedades geotécnicas serão estudadas segundo a classificação avançada por Hunt (2005), pois foi o autor cuja nomenclatura pareceu mais lógica exibindo uma organização mais coerente com a restante bibliografia e os conhecimentos adquiridos ao longo do percurso académico.

Deste modo, aquele autor define como propriedades geotécnicas, para além das mecânicas, as seguintes (Tabela 2.2, adaptado de *op. cit.*):

- Propriedades intrínsecas – incluem as características fundamentais do material e fornecem a base para a sua identificação; consideradas por muitos autores como físicas, incluem o peso volúmico, porosidade acessível à água e o teor em água, entre outras;
- Propriedades índice – definem algumas características consideradas nas chaves de algumas classificações geotécnicas, mas que também servem para obter correlações com outras propriedades para fins de engenharia a fim de antever o comportamento do material.

Recorrendo às propriedades índice da rocha intacta é possível estabelecer uma classificação primária, com fins geotécnicos, por exemplo, uma que relacione diretamente as características resistentes e deformacionais da rocha, como se definiu na secção anterior.

Os objetivos das propriedades índice são os seguintes (Hawkins, 1998):

- Aplicar as classificações geotécnicas a maciços rochosos;
- Estimar a tensão de recobrimento através do peso volúmico da rocha (γ) e da profundidade;
- Estimar a escavabilidade da rocha com base na velocidade das ondas P (V_p) ou na dureza ao ressalto (R_L) determinada pelo martelo de Schmidt tipo L (esclerómetro);
- Estimar a resistência de maciços rochosos necessária para analisar a sua estabilidade, por exemplo em túneis, recorrendo a classificações geomecânicas.

Para uma propriedade índice ser útil, tem que ter as seguintes três características (Deere, 1963 *in* Deere e Miller, 1966):

- Tem que ser uma propriedade usada em geotecnia na resolução de problemas;
- O ensaio para a determinação da propriedade deve ser simples, económico e expedito;
- Os resultados do ensaio devem ser reprodutíveis, dentro de certos limites, por diferentes operadores em diferentes locais usando equipamento e procedimentos normalizados.

É preciso salientar que a determinação das propriedades índice não é um substituto de uma caracterização detalhada das rochas (Zhang, 2005) pois, como já foi referido, para tal é necessário ter em conta outras características, tais como a composição mineralógica e o arranjo dos minerais (textura).

Englobam as propriedades físicas e mecânicas das rochas e determinam-se através de ensaios relativamente expeditos. A Tabela 2.2 inclui um resumo das propriedades geotécnicas e dos principais ensaios laboratoriais utilizados na sua determinação.

Tabela 2.2 - Propriedades geotécnicas de rochas intactas e alguns ensaios para a sua determinação (adaptado de Hunt, 2005)

Propriedades	Parâmetro de engenharia	Ensaio laboratoriais mais frequentes
Intrínsecas ou físicas	Teor em água	Determinação do teor em água
	Porosidade	Determinação usando métodos de absorção rápida e pesagem
	Densidade	Determinação por pesagem e medições com a craveira Determinação por técnicas de saturação e pesagem
	Peso volúmico	
	Dureza / durabilidade	Ao ressalto, ao desgaste, à riscagem, etc.
Mecânicas	Resistência não confinada (uniaxial)	Resistência à compressão uniaxial Resistência à compressão pontual Resistência à tração direta Resistência à tração indireta – Ensaio brasileiro
	Resistência confinada (triaxial)	Resistência à compressão triaxial
	Módulo de Young ou de elasticidade Coeficiente de Poisson	Resistência à compressão uniaxial Resistência à compressão triaxial
Dinâmicas	Velocidade de propagação das ondas elásticas (P e/ou S)	Caracterização por ultrassons
Hidráulicas	Condutividade hidráulica	Permeâmetros

2.3 PROPRIEDADES INTRÍNSECAS

Um índice é útil apenas se as propriedades forem reproduzíveis de um laboratório para o outro e puderem ser medidas por um método rápido e barato. Segue-se uma análise da relevância de algumas características geotécnicas inferidas das propriedades que foram mencionadas anteriormente, tendo em conta o tipo de rocha em estudo neste trabalho – os gabros.

2.3.1 Teor em água

O teor em água (w) de uma amostra está relacionado com a sua porosidade, de acordo com a expressão (Goodman, 1989):

$$n = \frac{w.G}{1+w.G} \quad (2.1)$$

onde, n – porosidade;

w – teor em água;

G – densidade das partículas sólidas.

De certa forma, reflete como o material se comporta perante diferentes condições ambientais. É conhecido por influenciar a curva tensão – deformação devido ao seu efeito em algumas rochas, na deformabilidade, na resistência à compressão confinada e no comportamento após o pico. Por esta razão é recomendado, por exemplo pela ISRM, que em certas rochas o teor em água seja medido como uma parte integrante da resistência à compressão (Hudson e Harrison, 1997).

Algumas rochas, em particular as que possuem um elevado teor em minerais argilosos (ou gesso), podem sofrer dissecação quando expostas. A rocha *in situ* pode possuir um elevado mas estável teor em água, porém quando exposta, após escavação, as suas propriedades podem alterar-se à medida que seca e pode tornar-se friável, desagregando-se ao menor esforço aplicado. Analogamente, estes tipos de rochas podem estar saturados em escavações e, simultaneamente, sujeitas a ações mecânicas como resultado do processo de escavação, levando ao seu desgaste. A rocha pode, então, esboroar-se e desfazer-se perante a aplicação de pequenas tensões. Nas rochas plutónicas os minerais argilosos são de génese secundária e, portanto, surgem apenas em amostras meteorizadas e/ou alteradas.

Outro efeito relacionado com esta propriedade é a tendência para a expansibilidade de rochas quando ocorrem variações do teor em água, gerando-se tensões adicionais, como por exemplo por trás do revestimento de túneis. Em alguns casos as tensões geradas podem ser semelhantes às tensões adicionais devido ao campo de tensões *in situ*, e levar à rotura.

Se os poros da rocha se encontrarem interconectados e os fluidos que os percorrem estiverem sob pressão, esta tensão pode-se subtrair, ou uma parte dela, à componente da tensão normal, obtendo-se assim a designada tensão efetiva. Se a pressão exercida pela água, a pressão intersticial, aumentar significativamente, a tensão efetiva pode diminuir ao ponto de ocorrer a rotura. No caso das rochas, o conceito de tensão efetiva pode-se aplicar para materiais como arenitos, mas é inapropriado em rochas plutónicas maciças (Hudson e Harrison, 1997).

2.3.2 Porosidade

A porosidade de uma rocha consiste na relação entre os vazios ou poros da rocha (V_p) e o volume total da rocha (V_t). É representada pelo parâmetro adimensional n :

$$n = \frac{v_p}{v_t} \quad (2.2)$$

onde, n – porosidade;

v_p – volume dos poros da rocha;

v_t – volume total da rocha;

mas habitualmente apresenta-se sob a forma de percentagem.

A porosidade de uma rocha resulta de vários processos geológicos, físicos e químicos e varia para diferentes tipos de rochas, Tabela 2.3. Muda significativamente inclusive no mesmo tipo de rocha devido a distintos fatores, como a distribuição do tamanho do grão, a sua forma, profundidade e pressão, diminuindo esta propriedade com o aumento destes dois últimos fatores (Zhang, 2005).

Os valores de porosidade podem variar entre os 0% e 90%, sendo as rochas sedimentares carbonatadas bioclásticas e as rochas vulcânicas as que apresentam os valores mais elevados, enquanto as rochas ígneas e metamórficas, quando não alteradas/meteorizadas, apresentam a menor gama de valores de porosidade. Em rochas ígneas a porosidade é geralmente inferior 1 - 2%, exceto no caso de o material se encontrar meteorizado. Com o avanço do processo de meteorização, a porosidade tende a aumentar até 20% ou mais, chegando a igualar os valores de rochas sedimentares carbonatadas bioclásticas (Goodman, 1989; Vallejo e Ferrer, 2011).

Nas rochas cristalinas, ígneas e metamórficas, uma grande proporção do volume de poros corresponde a roturas planares na matriz rochosa, que têm o nome de fissuras ou microfissuras (Goodman, 1989). Esta é a propriedade que mais afecta as características resistentes e mecânicas das rochas, sendo inversamente proporcional à resistência e à densidade e diretamente proporcional à deformabilidade do material, podendo a existência de vazios dar origem a estas zonas de debilidade (Vallejo e Ferrer, 2011). É por isso que a medição da porosidade pode ser um índice de qualidade significativo nas rochas ígneas (adaptado de Goodman, 1989).

Para as rochas não meteorizadas também existe uma correlação direta universal entre a porosidade e as propriedades mecânicas como a resistência à compressão uniaxial e o módulo de elasticidade, mas estas relações geralmente são marcadas por uma enorme dispersão (Goodman, 1989).

Tabela 2.3 - Valores típicos de porosidade nalguns tipos de rochas ígneas (adaptado de Vallejo e Ferrer, 2011)

ROCHA	POROSIDADE (%)
Andesito	10 - 15
Basalto	0,1 - 2
Dolerito	0,1
Gabro	0,1 - 0,2
Granito	0,5 - 1,5
Riolito	4 - 6

Nas rochas é frequente os poros não estarem interconectados, pelo que a porosidade real será maior que a porosidade eficaz, também conhecida por porosidade acessível à água, que é a relação entre o volume de poros interconectados e o volume da amostra. É representada pelo parâmetro n_e e pode obter-se através da relação entre os pesos seco e saturado da amostra (Vallejo e Ferrer, 2011):

$$n_e = \frac{W_{sat} - W_{seco}}{\gamma_w \cdot V} \quad (2.3)$$

onde, n_e – porosidade eficaz;

W_{sat} – peso saturado da amostra;

W_{seco} – peso seco da amostra;

γ_w – peso volúmico da água;

V – volume da amostra.

A porosidade pode ser avaliada em amostras de rocha, segundo várias técnicas. No entanto, nem todos os métodos são adequados para medições em rochas duras, com porosidades inferiores a certos valores (Goodman, 1989). Os métodos mais utilizados para a determinação da porosidade nestes casos devem ser os seguintes:

1. Avaliação da densidade;
2. Medição do volume do sólido e do volume de ar nos poros através da lei de *Boyle*.

No presente trabalho os valores de porosidade obtiveram-se através da medição da densidade, e serão apresentados no âmbito do capítulo 4.

2.3.3 Peso volúmico e densidade

O peso volúmico, γ , e a densidade, ρ , de uma rocha dependem dos seus componentes e definem-se como o peso/massa por unidade de volume, apresentando-se, respetivamente, em unidades de

força (Newton) ou massa (kg) por volume (m^3). Há tendência para considerar o mesmo valor para peso volúmico e para a densidade, mas trata-se de uma imprecisão, uma vez que a última corresponde à massa volúmica, estando muitas vezes representado na bibliografia geotécnica o termo “densidade” quando se referencia o peso volúmico com unidades em força e não de massa:

$$\gamma = \rho \cdot g = \frac{100 \text{ kg}}{m^3} \cdot \frac{9,8 \text{ m}}{s^2} = \frac{9,800 \text{ N}}{m^3} \quad (2.4)$$

onde, γ – peso volúmico (N/m^3);

ρ – densidade (kg/m^3);

g – aceleração da gravidade.

As rochas, ao contrário dos solos, apresentam uma grande diversidade de valores de peso volúmico. O seu conhecimento é importante em estudos de engenharia civil ou de exploração mineira; por exemplo (Goodman, 1989):

- O peso volúmico de uma rocha condiciona as tensões litostáticas a que ela vai estar submetida quando esta se comporta como uma viga, numa escavação; um teto em rocha de peso volúmico elevado implica uma diminuição no tempo de auto-sustentação do maciço, condicionante da sua segurança;
- Um agregado de betão com peso volúmico maior que a média pode implicar que seja necessário um menor volume de agregado, mas um agregado mais leve que o habitual pode significar menores tensões num betão que tenha sido aplicado no sustimento do teto de uma estrutura.

É relativamente simples medir o peso volúmico de uma rocha basta, somente, cortar os extremos de um tarolo de rocha de modo a que fiquem planos e paralelos, calcular o seu volume através da medição das suas dimensões e pesá-lo. Tendo em vista as possíveis variações de importância da norma, a densidade deve ser medida rotineiramente em estudos de rocha.

Na tabela 2.4 encontram-se alguns valores de peso volúmico para diferentes rochas ígneas intactas.

Uma vez que uma rocha é composta tanto por grãos (matriz de material sólido) como por vazios, é necessário distinguir entre diferentes densidades que são relacionadas com diferentes partes ou componentes da rocha. A densidade de uma rocha depende da sua composição mineral, da sua porosidade e do material que preenche os seus vazios. Como já foi afirmado, a porosidade de uma

rocha pode ser calculada a partir do conhecimento do seu peso volúmico, o que pressupõe que se conhece a densidade dos grãos de minerais que a constituem.

Tabela 2.4 - Valores típicos de peso volúmico em alguns tipos de rochas ígneas (Vallejo e Ferrer, 2011)

Rocha	Peso volúmico (kN/m ³)
Andesito	22 – 23,5
Basalto	27 - 29
Diorito	27 – 28,5
Dolerito	29
Gabro	30 - 31
Granito	26 - 27
Riolito	24 - 26

Como descrito anteriormente, a porosidade decresce com o aumento da profundidade enquanto a densidade aumenta com ela (Zhang, 2005). Para rochas no subsolo, à medida que aumenta a profundidade aumenta também a sua compacidade, provocando uma redução da porosidade. Este comportamento é responsável pelo um aumento de densidade nas rochas com o aumento de recobrimento (Peng e Zhang, 2007).

2.3.4 Dureza ao ressalto

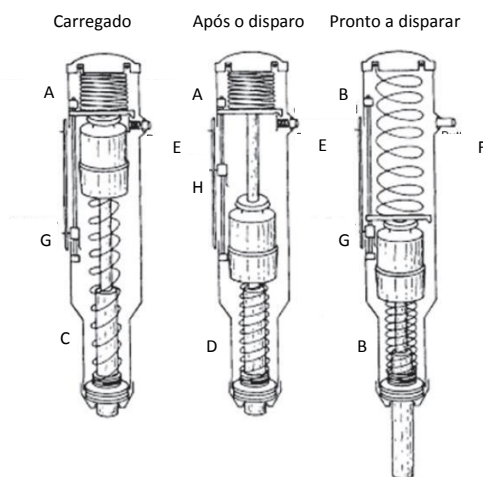
De um modo geral, a dureza de uma rocha, entre outras propriedades, depende do tipo e da quantidade de minerais que a constituem e da força de ligações existente entre eles. Não se trata de uma propriedade fundamental do material, mas mais de um conceito quanto ao comportamento do material. Deste modo, a medição quantitativa da dureza depende do tipo de ensaio realizado (adaptado de ISRM, 1978a).

A dureza ao ressalto é obtida em ensaios que endentam uma amostra de rocha por ação de um espigão, onde qualquer comportamento elástico ou plástico que resulte do impacto deste na superfície rochosa reduz a energia elástica disponível para o seu ressalto. A altura de ressalto do espigão é interpretada como a correspondente dureza ao ressalto (ISRM, 1978a).

O esclerómetro portátil, ou martelo de Schmidt, é o equipamento laboratorial que geralmente avalia a dureza ao ressalto. Trata-se de um instrumento que consiste num pequeno espigão de ponta diamantada ligado a uma mola – Figura 2.4, que ao ser empurrado sobre a amostra, mede a correspondente altura de ressalto, tida como uma medição empírica da dureza ao ressalto, traduzida pelo número de ressalto, R. Devido à pequena área da ponta do espigão e à natureza heterogénea da

maioria das rochas, é necessário conduzir um grande número de medições para obter um valor médio da dureza ao ressalto.

Esta propriedade permite estimar um intervalo dentro do qual se encontra a resistência à compressão uniaxial da rocha ensaiada, através do recurso a várias publicações da especialidade contendo estudos que desenvolveram correlações entre o valor de R e RCU para diferentes tipos litológicos como as referidas por Aydin e Basu (2009).



A – Mola completamente comprimida; B – Mola ligeiramente comprimida; C – Mola distendida; D – Mola em repouso;
E – Botão para dentro; F – Botão para fora;
G – Indicador bloqueado no zero; H – Indicador bloqueado no registo do ressalto máximo

Figura 2.4 - Esquemática do interior de um martelo de Schmidt durante o ensaio (Aydin e Basu, 2009)

2.3.5 Velocidade de propagação de ultrassons

A velocidade dos ultrassons está intimamente relacionada com as propriedades geotécnicas e tem sido usada como uma das mais principais propriedades índice. Ao atravessar uma rocha, a velocidade de propagação das ondas acústicas (P e S) varia em função da densidade da rocha e das suas propriedades elásticas. A sua determinação fornece, indiretamente, informações sobre algumas características, nomeadamente a porosidade.

Teoricamente, a velocidade com que as ondas de ultrassons são transmitidas ao longo da amostra de rocha dependem exclusivamente das suas propriedades elásticas e da sua densidade. Na prática, uma rede de fissuras na amostra acumula um efeito dominante e, neste caso, a velocidade acústica pode fornecer uma medida indireta do grau de fissuração do provete, comparando com os seus

minerais constituintes e a sua porosidade (Goodman, 1989). A velocidade propagação das ondas nas rochas aumenta com o acréscimo de pressão, devido à colmatação de vazios ou de microfissuras. O efeito da pressão na velocidade das ondas é menor para rochas mais densas devido possuírem menos vazios (Zhang, 2006).

A velocidade das ondas de compressão ou longitudinais, V_p , utiliza-se como um índice de classificação pois o seu valor é indicativo da qualidade da rocha, correlacionando-se linearmente com a resistência à compressão uniaxial, σ_c . Para as rochas em geral, esta velocidade varia entre 1 000 e 6 000 m/s, mas para rochas alteradas e meteorizadas obtêm-se valores inferiores 900 m/s. Assim, ainda que um granito possa apresentar valores até 6 000 m/s, a velocidade de propagação reduz-se proporcionalmente à intensidade de alteração/meteorização, de metade a um terço e, caso se encontre muito decomposto, os valores podem ser inferiores a 700-800 m/s (Vallejo e Ferrer, 2011). A Tabela 2.5 mostra gamas de valores para as velocidades das ondas P em alguns tipos de rochas ígneas mais comuns.

Tabela 2.5 - Gama de valores de velocidades de propagação das ondas longitudinais para algumas rochas ígneas (Vallejo e Ferrer, 2011)

Rocha	Velocidade das ondas P V_p (m/s)
Basalto	4 500 – 6 500
Diabase	5 500 – 7 000
Dolerito	4 500 – 6 500
Gabro	4 500 – 6 500
Granito	4 500 – 6 000

A velocidade de propagação das ondas de corte ou transversais, V_s , é de aproximadamente dois terços da velocidade das ondas P (V_p), Figura 2.5, e estas velocidades estão relacionadas com a resistência e a deformabilidade do material. Através delas é possível calcular os módulos de deformabilidade elástica dinâmicos: módulo de elasticidade - E_d e coeficiente de Poisson - ν_d .

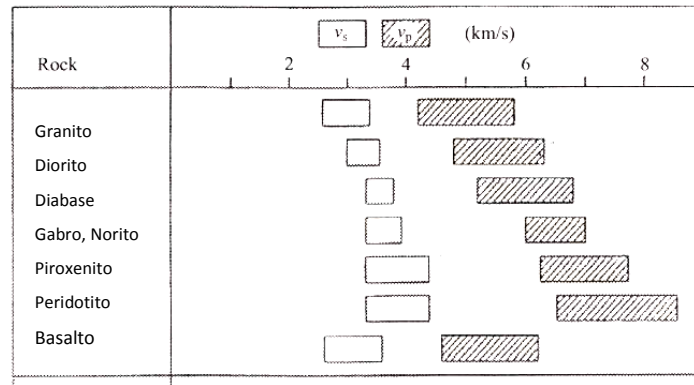


Figura 2.5 - Gama de velocidades para as ondas P e S em algumas rochas ígneas (Sehön, 1996 in Zhang 2005)

Estes módulos dinâmicos obtêm-se das expressões seguintes:

$$E = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (2.5)$$

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2V_p^2 - V_s^2} \quad (2.6)$$

onde, E – módulo de elasticidade ou de Young (Pa);

ρ – massa volúmica (kg/m^3);

V_s – Velocidade de propagação das ondas S (m/s);

V_p – Velocidade de propagação das ondas P (m/s);

ν_d – coeficiente de Poisson.

Os valores dos módulos de elasticidade dinâmicos são geralmente superiores aos correspondentes módulos estáticos obtidos em ensaio de resistência à compressão uniaxial, uma vez que a aplicação de tensões de baixa magnitude, resultam num comportamento da rocha puramente elástico (Vallejo e Ferrer, 2011).

Ainda que se verifique relação linear entre a velocidade propagação das ondas P e a deformabilidade de rochas, o coeficiente de Poisson não possui uma relação bem definida com a velocidade das ondas compressivas.

2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

2.4.1 Resistência

A resistência é definida como a tensão limite que uma rocha consegue suportar sob um determinado conjunto de condições de deformação. A resistência de pico ou última, σ_p , é a máxima resistência que uma rocha consegue suportar e é atingida para uma deformação específica conhecida como deformação de pico. A resistência residual, σ_r , é o valor mais baixo de resistência de certas rochas quando há considerável deformação após o pico, depois de se exceder a resistência última (Vallejo e Ferrer, 2011).

Porém, a resistência de uma rocha não é um valor único. Pode-se falar, na realidade, de diversos tipos de resistência, a saber:

- Não confinada ou confinada;
- À compressão ou à tração (flexão).

Na rocha intacta, a resistência depende do tipo de rocha e de características como a variabilidade mineralógica, a distribuição do tamanho dos grãos e a presença de microfendas/microfissuras no interior de cada tipo de rocha. A um nível mais mecânico, a resistência provém da coesão e das forças de atrito mobilizadas na matriz rochosa. A coesão, c , é a ligação entre as partículas de minerais que compõem a rocha e o ângulo de atrito interno, φ , entre os grãos de minerais. Para a maioria das rochas, este ângulo varia entre 25° e 45°.

Aqueles parâmetros condicionam a resistência ao corte da rocha intacta.

Para além dos seus valores de coesão e ângulo de atrito, propriedades intrínsecas da rocha, depende de fatores externos como a magnitude das tensões atuantes, os ciclos de carga e descarga que a rocha foi submetida, a presença de água nos poros ou da taxa de aplicação do carregamento. Até em rochas aparentemente isotrópicas e homogêneas, os valores de c e φ podem variar, dependendo do grau de cimentação, de variações na sua composição, ou ainda do seu estado de alteração/meteorização. É por estas razões que a resistência não é um valor intrínseco e, portanto, é importante conhecer o intervalo de valores e as suas variações para rochas em certas condições.

Quando é aplicada uma determinada força ou carga, se a tensão gerada exceder a resistência do material rochoso, atinge-se uma deformação inaceitável e ocorre a rotura. A rotura ocorre quando a rocha não suporta as forças aplicadas e as tensões alcançam um valor máximo correspondente à

resistência de pico do material. No entanto, esta é uma explicação muito simplista, pois nem todas as rochas se comportam desta maneira e a rotura na rocha intacta é um processo complexo.

A rotura/fracturação é a formação de planos de separação dentro da rocha quando a coesão entre partículas se quebra e se formam novas superfícies. Durante o processo, perdem-se forças de coesão e permanecem apenas as de atrito. A rotura ocorre quando fraturas planas, que se geram quando se perdem as forças de coesão, deslizam umas sobre as outras. A direção destas superfícies de rotura depende de (adaptado de Vallejo e Ferrer, 2011):

- Da direção segundo a qual as forças são aplicadas;
- Da presença de anisotropia no material rochoso, tanto ao nível microscópico (orientação preferencial de minerais, presença de microfendas orientadas) como ao nível macroscópico.

É expectável que se desenvolvam fraturas planas numa direção paralela à da aplicação do carregamento, no entanto a menor resistência ao corte obtém-se segundo a direção em que se exerce a maior tensão de corte, que forma um certo ângulo com a direção de aplicação do carregamento e é função do ângulo de atrito interno da rocha ($\frac{\pi}{2} \mp \phi$). Em teoria, numa rocha intacta, isotrópica, a resistência será sempre a mesma caso seja aplicado o mesmo estado de tensão para as mesmas condições de pressão, de teor em água e de temperatura.

Geralmente em geotecnia, os ensaios para a determinação da resistência em rochas intactas são realizados em laboratório, em pequenas amostras de forma cilíndrica, obtidas de tarolos de sondagens ou por carotagem, em laboratório, de blocos recolhidos no campo.

A medição da resistência faz-se através dos seguintes ensaios (adaptado de Price, 2009):

a) Não confinados:

- Resistência à compressão uniaxial, que avalia o esforço máximo que um provete de rocha, em regra cilíndrico, não confinado, suporta;
- Resistência à tração, que é a tensão máxima que o material consegue sustentar quando sujeito a tração uniaxial, direta ou indireta, antes de ocorrer a rotura. O ensaio de tração direto não é considerado um ensaio expedito;

b) Confinados:

- Resistência à compressão triaxial, que é a tensão na rotura de uma amostra confinada; é usualmente alcançada colocando a amostra em compressão axial crescente enquanto está contida lateralmente por pressões laterais que a envolvem. Não se trata de um ensaio expedito e é dele que se obtém o valor de coesão, c , e o ângulo de atrito, ϕ , da rocha.

A resistência à compressão uniaxial (RCU) é dada pela expressão (Vallejo, 2004):

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A} \quad (2.7)$$

onde, σ_c – resistência à compressão uniaxial;

F_c – força compressiva aplicada;

A – área de aplicação da força;

A resistência à tração é calculada de acordo com a expressão (3.8):

$$\sigma_t = \frac{F_t}{A} \quad (2.8)$$

onde, σ_t – resistência à tração;

F_t – força de tração aplicada;

A – área de aplicação da força.

As unidades de resistência são força/área. A unidade do Sistema Internacional é N/m^2 , mas recentemente tem-se usado a unidade Pascal, sobretudo em resistência à compressão, sendo 1 Pascal (Pa) = 1 N/m^2 .

Na rocha intacta, a resistência à compressão é a propriedade mais característica e medida com maior frequência (Vallejo e Ferrer, 2011), pois é fácil de obter amostras para ensaiar em laboratório, contrastando com a medição da resistência em maciços rochosos que não pode ser medida diretamente. O valor da resistência à compressão uniaxial fornece indicações sobre as propriedades mecânicas das rochas.

O valor da resistência à tração para rocha intacta normalmente varia entre 5% a 12% do valor da resistência à compressão uniaxial, sendo de 12% para a maioria das rochas frágeis e aproximadamente 5% para rochas brandas (Vallejo e Ferrer, 2011).

Na Tabela 2.6 encontram-se alguns valores de resistência à compressão uniaxial e à tração para alguns tipos de rochas ígneas sãs.

Tabela 2.6 - Valores de RCU para algumas rochas ígneas intactas sãs (Vallejo e Ferrer, 2011)

Rocha intacta	Resistência à compressão uniaxial (MPa)		Resistência à tração (MPa)
	valores médios	gama de valores	
Andesito	210 - 320	100 - 500	7
Basalto	80 - 200	60 - 350	5 - 25
Diabase	240 - 350	130 - 356	55
Diorito	180 - 245	120 - 335	8 - 30
Dolerito	200 - 300	100 - 350	15 - 35
Gabro	210 - 280	180 - 300	14 - 30
Granito	70 - 200	50 - 300	7 - 25
Tufo	-	10 - 46	1 - 4

Os parâmetros de resistência à compressão e resistência à tração não confinados são os parâmetros mais amplamente utilizados em análises geomecânicas (Peng 1998b, Peng *et al.* 2002a, Peng *et al.* 2002c in Peng e Zhang, 2007).

Em rochas porosas intactas, a resistência é reduzida pela pressão dos poros que atua contra a resistência normal que resiste à rotura, cumprindo os princípios da tensão efetiva (Vallejo e Ferrer, 2011):

$$\sigma'_n = \sigma_n - u \quad (2.9)$$

onde, σ'_n – tensão normal efetiva;

σ_n – tensão normal total;

u – tensão intersticial.

Apenas rochas porosas permeáveis, onde a água se pode infiltrar, são afectadas e os restantes tipos de rochas podem-se considerar como praticamente secas, embora em condições onde a água esteja presente, a saturação seja apenas uma questão de tempo.

2.4.2 Deformabilidade

As tensões geradas pela aplicação de forças a uma rocha induzem deformação e, caso estas ultrapassem um certo valor limite aceitável, a rotura, dependendo da resistência da rocha e de outras condições externas ao próprio material rochoso.

A deformabilidade é a propriedade que uma rocha tem de alterar a sua forma, ou até mesmo o seu volume, em resposta à atuação de forças que geram um deslocamento dos grãos que as suportam.

Em função da intensidade da gama de esforços aplicados, a forma como são aplicados e as características mecânicas da rocha, as deformações serão permanentes ou reversíveis (elásticas).

Um deslocamento muito pequeno é difícil de medir, por isso a deformação é expressa através da comparação entre o estado original e o estado deformado, não apresentando portanto unidades. A deformação longitudinal é definida como a diferença de comprimentos entre duas partículas em dois estados mecânicos diferentes. A deformação volumétrica, ou dilatação, é o rácio entre a mudança de volume de um corpo e o seu volume original (Vallejo e Ferrer, 2011).

Enquanto a tensão se refere às condições da rocha num determinado momento e depende das forças aplicadas, a deformação compara condições em dois momentos e refere-se apenas à configuração dos corpos.

O comportamento tensão - deformação de um corpo é definido pela relação entre a tensão aplicada e a correspondente deformação resultante. Descreve como se deformou e como o comportamento do material rochoso varia à medida que a carga é aplicada, ou seja, como varia a resistência do material para quantidades específicas de deformação, considerando:

- O comportamento antes de ocorrer a rotura;
- Como ocorreu a rotura;
- O comportamento depois de ocorrer a rotura.

Todas estas condições são estudadas em ensaios de laboratório onde forças compressivas aplicadas são registadas, bem como as correspondentes deformações; em seguida elabora-se a curva tensão – deformação para o ensaio que varia em função do tipo de rocha. Se a resistência de pico for excedida, ou seja o valor de deformação exceder o de pico, pode ocorrer o seguinte (Vallejo e Ferrer, 2011):

- a. A resistência da rocha reduz-se drasticamente e pode chegar a atingir valores nulos; isto representa o comportamento frágil, curva 1 da Figura 2.6, que implica uma perda de resistência da rocha quase instantânea com quase nenhuma, ou mesmo nenhuma, deformação associada. É típico de rochas duras, de resistência elevada, como gabros ou granitos são;
- b. A resistência da rocha diminui até um certo valor, após se alcançar uma significativa deformação. Este é o comportamento dúctil – frágil, curva 2 da Figura 2.6, ou comportamento semi-frágil, que ocorre quando os componentes da fábrica da rocha se rearranjam, por exemplo para se dar o corte de fissuras;

- c. A deformação continua a aumentar sem perda de resistência (a resistência mantém-se constante após uma deformação de larga escala). Este é conhecido como o comportamento dúctil, curva 3 da Figura 2.6, e é observado em certos materiais onde durante a rotura o *fabric* está continuamente a ser remobilizado, como por exemplo no sal-gema.

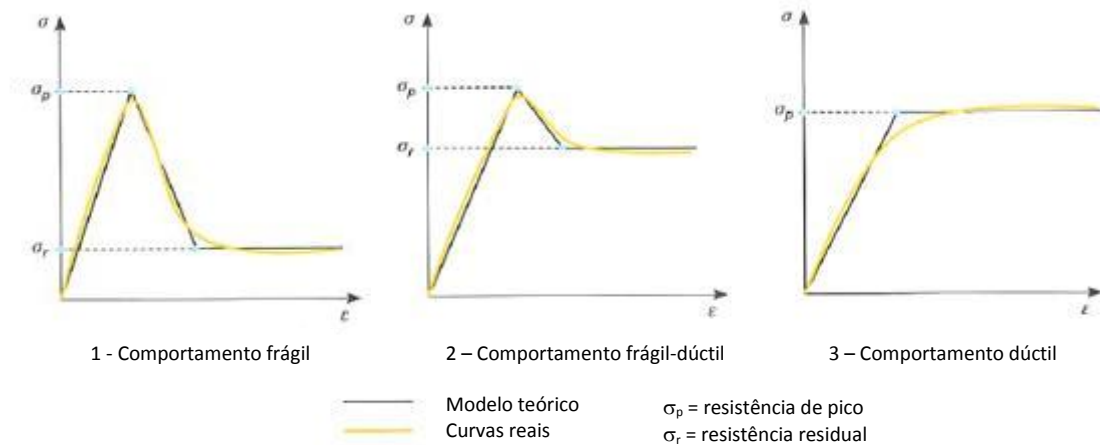


Figura 2.6 - Modelos de comportamentos tensão - deformação (adaptado de Vallejo e Ferrer, 2011)

O comportamento frágil é caracterizado pela diferença significativa entre a resistência de pico e a resistência residual, uma vez que ocorre uma súbita perda de resistência. Inversamente, no comportamento dúctil não existe esta diferença entre resistências, existindo um valor de tensão a partir da qual, sem que esta aumente, se acumulam deformações.

Se num ensaio de laboratório uma força axial compressiva for gradualmente aplicada a um provete de rocha, não confinado, irá produzir uma correspondente deformação axial que pode ser medida, nomeadamente por extensómetros instalados no provete, e convertidos em extensão axial. A curva tensão-extensão pode ser então obtida do correspondente registo de valores durante o ensaio. Antes de se atingir a resistência de pico, o ramo ascendente da curva normalmente demonstra, para a maioria das rochas, uma relação linear entre aquelas medições, isto é, o comportamento é elástico. No domínio elástico, a extensão é proporcional à resistência e satisfaz a relação:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_{ax}} \quad (2.10)$$

onde, E – módulo de elasticidade ou de Young (unidades de força);

σ – tensão aplicada (unidades de força);

ε_{ax} – extensão axial, isto é segundo a direção da força aplicada (adimensional).

Assim, o módulo de *Young* define a relação linear elástica entre a ação aplicada e a correspondente extensão verificada segundo a direção de aplicação daquela.

O coeficiente de Poisson, Tabela 2.7, é outra constante que define o comportamento elástico do material rochoso, e descreve a relação entre a extensão transversal e a correspondente extensão axial do provete:

$$\nu = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_{ax}} \quad (2.11)$$

onde, ν – coeficiente de *Poisson* (adimensional);

ε_r – extensão radial;

ε_{ax} – extensão axial.

Tabela 2.7 - Classificação do coeficiente de Poisson proposta por Gercek (2007)

Categoria	Coeficiente de Poisson
Muito baixo	$0 \leq \nu < 0,1$
Baixo	$0,1 \leq \nu < 0,2$
Médio	$0,2 \leq \nu < 0,3$
Elevado	$0,3 \leq \nu < 0,4$
Muito elevado	$0,4 \leq \nu < 0,5$

Ambas as constantes são obtidas do ensaio de resistência à compressão uniaxial, Figura 2.7, desde que o provete seja dotado de extensómetros axiais e radiais, e definem as características de deformação elástica da rocha em condições estáticas. Uma rocha dura, com comportamento frágil, apresenta maior módulo de *Young* e menor coeficiente de *Poisson* do que uma rocha branda, com comportamento dúctil.

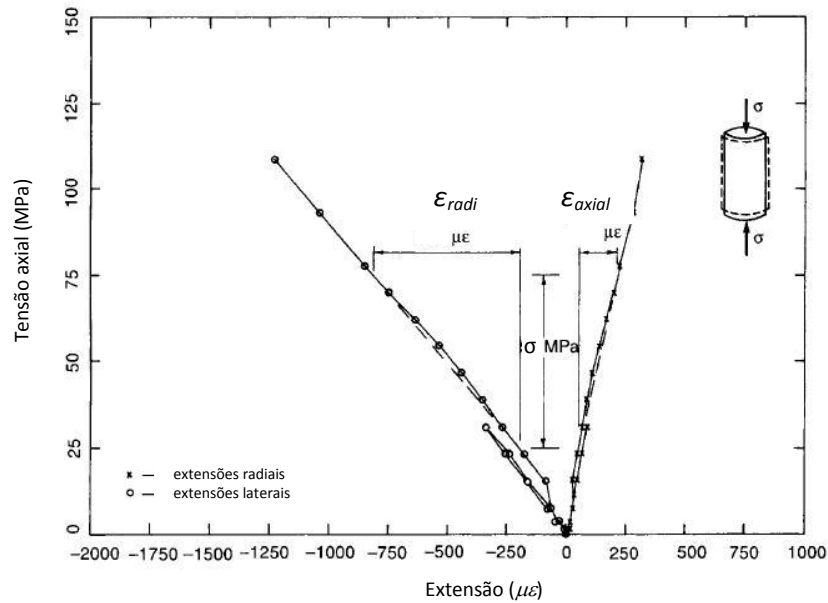


Figura 2.7 - Curva de tensão-extensão obtida do ensaio de compressão uniaxial (Sabatini *et al.*, 2002)

Como se referiu anteriormente, os valores de E e ν também se podem obter a partir das velocidades das ondas elásticas V_p e V_s medidas no ensaio de velocidade de ultra-sons em laboratório, apresentando o módulo de *Young* dinâmico valores superiores ao do módulo estático ($E_d > E$), como se pode confirmar pela Tabela 2.8. De um modo geral, estes parâmetros apresentam uma ampla gama de valores, por vezes muito ampla, que se deve à grande variedade de propriedades de que dependem, tais como porosidade, estrutura mineralógica, cimentação dos minerais, e ao carácter anisótropo de certas rochas.

Tabela 2.8 - Valores de módulos de elasticidade dinâmico e estático e de coeficientes de Poisson para alguns tipos de rochas ígneas (adaptado de Vallejo e Ferrer, 2011)

Rocha intacta	Módulo de elasticidade (GPa)		Coeficiente de Poisson ν
	estático, E	dinâmico, E_d	
Andesito	30 – 40	-	0,23 – 0,32
Basalto	32 – 100	41 – 87	0,19 – 0,38 (0,25)
Diorito	2 – 17	25 – 44	-
Gabro	10 – 65	-	0,12 – 0,20
Granito	17 – 77	10 – 84	0,1 – 0,4 (0,18 – 0,24)

Contudo verifica-se que, após um certo nível de deformação, a rocha não consegue manter um comportamento elástico e atinge-se um ponto a partir do qual começa a ocorrer uma deformação plástica e a relação linear entre a tensão e a extensão correspondente, já não é mais válida. Este é o ponto de cedência, assinalado pela inflexão na curva de tensão – extensão, a que corresponde um valor de resistência representado por σ_y . Abaixo deste ponto a rocha ainda consegue aguentar

consideráveis deformações, antes de se atingir a sua resistência última. Em rocha frágil, σ_y e σ_p ou são valores muito próximos ou podem coincidir, mas tal não acontece no comportamento dúctil. A diferença entre estes valores é muito importante no estudo do comportamento de certo tipo de rochas, pois indicam a capacidade que a rocha tem de suportar mais ações uma vez excedido o seu limite elástico, antes de ocorrerem deformações incontroláveis.

Uma vez excedido o limite elástico, a deformação da rocha é permanente, mesmo após a remoção da ação.

O comportamento elástico ou plástico depende das propriedades intrínsecas de resistência da rocha e das condições em que as ações são aplicadas, especialmente o valor da pressão de confinamento e da temperatura, e da presença de água a preencher os poros. O efeito da pressão de confinamento numa rocha pode fazer com que o seu comportamento passe de frágil para dúctil, mas este aspeto extravasa o âmbito das propriedades índice abordadas nesta dissertação.

2.5 AMOSTRAGEM E REPRESENTATIVIDADE DE RESULTADOS

Os ensaios de laboratório são necessários para determinar as propriedades das rochas intactas e, como já se sublinhou, constituem um aspeto importante dos estudos no âmbito da Mecânica das Rochas. As reações do maciço rochoso a um processo geotécnico dependem, em parte, do comportamento geotécnico do material rocha que integra o maciço.

O comportamento do material é determinado através de ensaios em que a intenção é sujeitar as amostras de rocha, quer às condições em que se encontravam no subsolo, quer às mudanças previstas para essas condições em consequência da intervenção geotécnica a implementar.

Esta intenção raramente é conseguida, nomeadamente por razões de ordem prática, uma vez que os ensaios devem ser realizados num espaço de tempo muito mais curto do que aquele em que ocorrem as mudanças derivadas da intervenção geotécnica.

O tipo e número de ensaios a realizar em provetes de rocha depende, sobretudo, da finalidade do estudo; o tamanho, número e procedência das amostras a ensaiar depende do problema geotécnico a resolver e de condicionamentos económicos e normativos. Estes ensaios não fornecem as propriedades dos maciços rochosos, mas sim valores que podem ser extrapolados ou correlacionados com algumas das suas propriedades fundamentais. A sua vantagem é que são mais acessíveis do que os ensaios de campo e podem realizar-se em grande número e em condições variáveis. Acresce ainda que alguns parâmetros obtidos em laboratório, como a resistência à

compressão uniaxial ou as constantes elásticas, entre outros, constituem parte integrante de algumas classificações de maciços rochosos, como indicado no início deste capítulo.

No entanto, os ensaios de laboratório e os resultados que se obtêm a partir deles apresentam uma série de limitações quando se pretende extrapolar os dados à escala do maciço rochoso, relacionadas com os alguns aspetos que se irão caracterizar nas secções seguintes e que advém, não só da amostragem, mas também do próprio procedimento laboratorial a implementar nos diversos provetes. É bem sabido que muitos materiais exibem um efeito de escala em termos de resistência, com amostras pequenas a apresentarem resistências maiores do que outras de dimensões maiores. Os ensaios *in situ* apresentam genericamente o mesmo tipo de limitações, ainda que em menor grau: os resultados só são aplicáveis à zona ensaiada, no entanto a sua maior vantagem é que se realizam sobre o próprio maciço rochoso, sendo necessariamente maior o volume abarcado no ensaio.

Deste modo, é prudente considerar o efeito da geometria das amostras, das condições de carregamento e ambientais na curva tensão – extensão, pois é necessário compreender os efeitos destas variáveis de modo a ser possível prever o comportamento do material rochoso em condições que podem diferir daquelas em que a amostra foi testada em laboratório.

As condições das amostras a ensaiar também são de grande importância para a precisão do ensaio, que será influenciado por eventuais falhas resultantes da extração e preparação das amostras. Em particular, diferenças do teor em água entre o material *in situ* e o ensaiado, têm uma grande influência nos resultados dos ensaios. Para além destes fatores, o modo como o ensaio é realizado também é muito importante.

2.5.1 Representatividade

As amostras de rocha que se ensaiam correspondem a pontos isolados do maciço rochoso, não sendo representativas de todo o âmbito em estudo, nem da variabilidade de fatores existentes na natureza que condicionam os comportamentos dos materiais. Neste contexto, é essencial realizar um número de ensaios estatisticamente representativo.

A fim de mitigar a variabilidade, os provetes a ensaiar devem ser inspecionados e descritos, procedendo-se em seguida ao seu agrupamento em conjuntos que possam ser considerados homogêneos face a um conjunto de descritores do material rocha considerados para o efeito.

Por outro lado, as condições ambientais em que se encontram as rochas no campo, nomeadamente pressão constante, temperatura, composição química da água intersticial, entre outros, são difíceis de reproduzir em laboratório.

As condições das amostras a ensaiar também são de grande importância para a precisão do ensaio, que será influenciado por eventuais falhas resultantes da extração e preparação das amostras. Em particular, diferenças do teor em água entre o material *in situ* e o material ensaiado, têm uma grande influência nos resultados finais. Para além destes fatores, o modo como o ensaio se desenrola também é muito importante. Se a estes aspetos se juntar a influência de um conjunto de fatores relacionados com a execução dos ensaios, compreendem-se as limitações e dificuldades associadas à caracterização das propriedades dos maciços rochosos a partir de ensaios em laboratório.

2.5.2 Escala

Ensaiam-se pequenas porções de material, a partir das quais se pretende a caracterização e a previsão de comportamento de áreas mais amplas. A diferença de escalas e comportamentos reais implica a utilização de fatores de conversão ou correção para extrapolar os resultados à escala do maciço rochoso.

Estudos evidenciam que existe uma relação entre as dimensões das amostras ensaiadas e a aproximação ao valor real da propriedade do maciço em estudo. Quanto maior for aquela, maior será a aproximação a esse valor real que se tenta avaliar, ou seja melhor é a exatidão do resultado obtido.

No que respeita aos provetes, têm sido adotadas geometrias específicas para eles de forma a obterem-se resultados mais fiáveis em determinados ensaios. É conhecido que, muitos materiais, exibem um efeito de escala em termos de resistência, com amostras pequenas a apresentarem resistências maiores que outras de maiores dimensões.

Por exemplo, no ensaio de resistência à compressão uniaxial, a amostra geralmente é um cilindro sólido. A distribuição de tensão dentro da amostra é tal que a rotura que ocorre sobre igual carga, uniformemente exercida pela prensa de ensaio, não é a esperada para amostras cuja relação comprimento – diâmetro seja inferior a 2:1. No entanto, para um mesmo volume, quando esta

relação se apresenta superior a três, a resistência à compressão uniaxial diminui devido à esbeltez dos provetes.

Acresce ainda a influência muito significativa do tamanho do maior grão de mineral que compõe a rocha nas dimensões do provete de ensaio, de modo a permitir uma uniforme distribuição das tensões ao longo do provete durante os ensaios, nomeadamente de resistência.

Para além de tudo isso, convém que os provetes de ensaio tenham idealmente características que se possam considerar homogêneas no número de provetes a ensaiar. Por exemplo, para serem descritos como amostras de rocha intacta não devem apresentar fissuras abertas.

2.5.3 Velocidade

Os processos de deformação e rotura reproduzem-se em laboratório geralmente em alguns minutos, enquanto na natureza eles resultam de condições e ações com duração de largos períodos de tempo.

A taxa de carregamento durante o ensaio tem um efeito considerável no valor de resistência à rotura obtida (Price and Knill, 1966 *in* Price, 2009). Praticamente todas as taxas de carregamento aplicadas em laboratório são muito maiores que as suscetíveis de serem aplicadas numa obra geotécnica, pelo que, em certa medida, todos os valores são falsos.

Normalmente a taxa de carregamento que é adotada é a mais morosa que pode ser usada nas circunstâncias em estudo. Muitas vezes as normas de ensaio ou recomendações disponíveis sugerem taxas a adotar, a fim de se poderem efetuar correlações e comparações entre valores obtidos.

2.5.4 Normas

Os resultados dos ensaios também podem variar de acordo com o procedimento aplicado e esta variação podem ter relevância geotécnica. Para garantir que os resultados de ensaios de diferentes laboratórios são comparáveis, estes são realizados seguindo padrões ou normas estabelecidas por organismos nacionais ou internacionais, que na área desta dissertação incluem:

- a Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas, ISRM - *International Society of Rock Mechanics*;
- a *American Society of Testing and Materials*, ASTM;
- a *British Standards Institution*, BSI;

- a *International Standards Organisation*, ISO;
- ou ainda, mais recentemente, o *Comité Européen de Normalisation*, CEN, e a instituição portuguesa correspondente, o Instituto Português da Qualidade, IPQ.

Nem todos os ensaios estão normalizados e para ensaios muito específicos as normas variam, ainda que ligeiramente, de país para país, daí a importância de anotar nos registos de ensaio e em trabalhos escritos, a norma utilizada e a razão porque foi adotada.

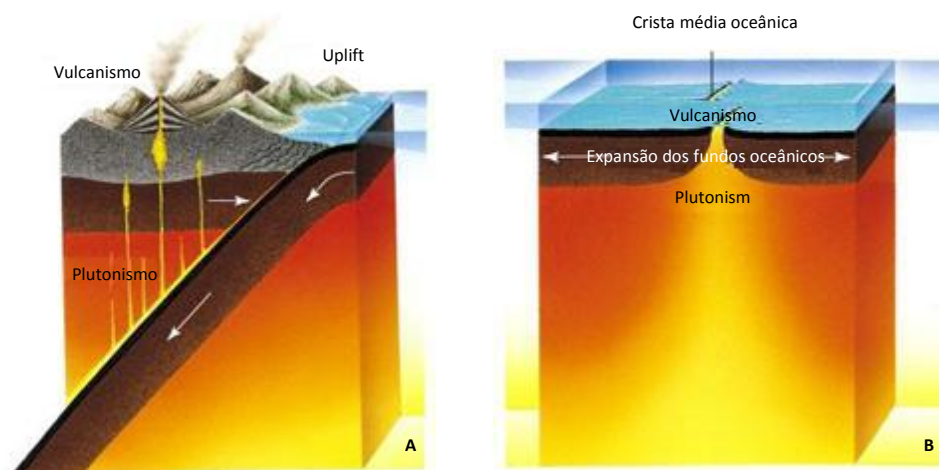
Alguns dos aspetos acima discutidos serão retomados no âmbito do capítulo 4, a propósito da descrição da componente experimental realizada nesta dissertação.

3 ROCHAS GABRÓICAS

3.1 CLASSIFICAÇÃO DAS ROCHAS ÍGNEAS

As rochas ígneas, do latim, *ignis*, que significa “fogo”, formam-se da cristalização de magmas, um material rochoso quente e parcialmente fundido que se origina em profundidade na crosta ou no manto superior. Estas rochas são consideradas os registos da evolução térmica da Terra e a sua origem está intimamente associada aos movimentos das placas tectónicas, desempenhando um importante papel no desenvolvimento dos fundos oceânicos, na origem de sistemas montanhosos e na evolução dos continentes (Hambling e Christiansen, 2003), compondo grande parte da crosta terrestre (Tarbuck e Lutgens, 1999).

As rochas ígneas encontram-se em muitas zonas do globo, mas na verdade formam-se apenas em alguns ambientes relativamente restritos. No continente, por exemplo, a maioria das rochas ígneas têm origem em zonas de convergência de placas, em particular em zonas de subducção, onde intrusões magmáticas alimentam vulcões sobrejacentes (Fig 3.1a). As rochas ígneas não são muito comuns na plataforma continental, mas podem formar associações com plumas do manto. Para além disto, a crosta oceânica é quase na totalidade rocha ígnea formada num rift oceânico (Figura 3.1b) (Hambling e Christiansen, 2003).



A – Limite convergente: subducção das placas oceânicas. A placa que mergulha apresenta zonas de fusão do manto em cunha no seu bordo superior, nalguns casos, mais junto à superfície na zona de mergulho
 B – Limite divergente: ascensão de magma e expansão dos fundos oceânicos

Figura 3.1 - Formação de rochas ígneas: zonas de convergência e de divergência (Grotzinger et al, 2007)

A origem do magma, de um modo geral, ocorre devido ao fenómeno de fusão parcial. Este sucede porque, quando uma rocha, que é constituída por vários minerais, é submetida a elevadas

temperaturas, a sua fusão vai ocorrer a um ritmo diferenciado uma vez que os diferentes minerais fundem a temperaturas distintas. Quando, por variadas razões, o processo é interrompido, o magma então formado não é inteiramente líquido, mas sim a combinação de materiais líquidos, sólidos e gasosos. Ao arrefecer, irá transportar os minerais da rocha mãe, que não se chegaram a fundir inteiramente, acabando por fazer parte da constituição da nova rocha em formação.

O magma, movendo-se lentamente, tende a emergir através do manto e da crosta, pois como a maior parte dos fluidos, é menos denso que o sólido do qual foi originado, ascendendo também devido à sua fluatuabilidade. O magma pode penetrar na rocha sobrejacente por injeção nas fracturas, formando um doma na rocha sobrejacente ou fundindo e assimilando a rocha que invade (Hambling e Christiansen, 2003). A ascensão do magma pode ser interrompida, quando este atinge um equilíbrio de densidade com a rocha adjacente ou quando a rocha sobrejacente oferece resistência suficiente que impede a sua progressão, gerando-se rochas intrusivas, como é o caso do gabro. Quando o magma abre caminho até à superfície através de fissuras vulcânicas e fendas, ocorre um dos fenómenos ígneos mais conhecidos, uma erupção vulcânica, e as rochas resultantes designam-se de extrusivas (Hambling e Christiansen, 2003). Na figura 3.2 pode observar-se a localização simplificada das rochas ígneas intrusivas e extrusivas.



Figura 3.2 - Intrusão magmática, vulcanismo associado e alguns exemplos de rochas resultantes de várias velocidades de arrefecimento dos magmas (Grotzinger et al, 2007)

As rochas ígneas intrusivas são visíveis à superfície terrestre porque ocorrem fenómenos de *uplift* na crosta terrestre e as rochas sobrejacentes sofrem denudação (Tarbuck e Lutgens, 1999).

Atualmente, as classificações das rochas ígneas baseiam-se em três tipos de análises (Gill, 2010):

- Análise de critérios texturais e estruturais – índices de granularidade;
- Análise de proporções mineralógicas – índices de cor;
- Análise da composição química – índices de acidez.

Análises de critérios texturais

O termo “textura”, quando aplicado a rochas ígneas, é usado para descrever a aparência geral de uma rocha com base no tamanho, forma e arranjo das ligações entre minerais. É uma característica importante porque revela muito sobre o ambiente no qual ocorreu a formação da rocha, permitindo que se façam inferências quanto à origem do material rochoso de um modo muito expedito (Tarbuck e Lutgens, 1999).

A textura das rochas ígneas é afetada pelos seguintes fatores ligados ao magma:

- A sua taxa de arrefecimento;
- O seu teor em sílica;
- A quantidade de gases que tem dissolvidos.

No entanto, a taxa de arrefecimento é talvez o fator mais expressivo, uma vez que controla o maior ou menor crescimento dos cristais. Arrefecimentos mais lentos promovem o desenvolvimento de redes cristalográficas maiores, o que se reflete no aparecimento de cristais em menor número mas mais desenvolvidos.

Analogamente, arrefecimentos mais rápidos não permitem o desenvolvimento de uma extensa rede cristalográfica originando inúmeros núcleos de cristais muito pouco evoluídos, que formam uma massa sólida de minúsculos cristais interligados.

Se o arrefecimento for muito rápido pode nem haver tempo de se desenvolver uma rede cristalográfica, não ocorrendo cristalização, formando-se rochas constituídas por matéria vítrea, podendo ou não conter alguns cristais anteriormente formados (Tarbuck e Lutgens, 1999).

Quanto ao grau de cristalinidade, as rochas ígneas podem ser:

- Holocristalinas – quando são inteiramente formadas por cristais;
- Hemicristalinas – quando formadas por cristais e parte vítrea;
- Vítreas – quando formadas por matéria vítrea.

De um modo geral, quanto à granularidade (tamanho médio dos grãos constituintes da rocha), as rochas ígneas podem ser:

- Fanerítica – quando apresenta uma textura granular homogénea, onde é possível distinguir os grãos de minerais.
- Afanítica – quando apresenta uma massa granular homogénea, mas os grãos de minerais são indistinguíveis.

A Tabela 3.1 complementa a informação quanto à textura das rochas ígneas.

Tabela 3.1 - Classificação de rochas ígneas segundo critérios texturais (adaptado de Gill ,2010)

Amostra de mão		Textura	Lâmina delgada	Exemplos
Grãos identificáveis a olho nu	Grão grosseiro	Fanerítica	> 5 mm	Gabro
Grãos identificáveis com lupa de bolso	Grão médio		1 – 5 mm	Diorito
Grãos indistinguíveis macroscopicamente	Grão fino		< 1 mm	Microgranito
Grãos indistinguíveis macroscopicamente		Afanítica		Basalto
Formada total ou parcialmente por matéria vítrea		Vítrea ou Hialina		Obsidiana

Análise de proporções mineralógicas

As rochas ígneas são compostas sobretudo por minerais silicatados. Por sua vez, os minerais que compõem estas rochas são definidos pela composição química do magma a partir do qual cristalizaram. À medida que o magma arrefece e solidifica, a combinação dos elementos químicos que o compõem (SiO₂, H₂O, Al, Ca, Na, K, Mg, Fe, etc.) formam dois grandes grupos de minerais silicatados.

Os silicatos de cores escuras (ferromagnesianos) são minerais ricos em ferro e/ou magnésio e tipicamente pobres em sílica. Os minerais ferromagnesianos mais comuns na crosta terrestre são olivina, piroxena, anfíbola e biotite e devido à sua cor escura são chamados de minerais máficos.

Os silicatos de cores claras são mais ricos em potássio, sódio e cálcio do que ferro e magnésio, e formam um grupo de minerais ricos mais ricos em sílica que os minerais máficos. Este grupo inclui minerais como quartzo, moscovite e feldspatos, e são chamados de minerais félsicos devido às suas cores claras.

As rochas ígneas podem ser compostas predominantemente por minerais máficos ou félsicos, ou ainda por misturas destes dois tipos de minerais com várias combinações e teores. A composição em minerais máficos (M) é também um indicativo do índice de cor da rocha, sendo utilizado nas análises expeditas em campo.

Quanto à cor, as rochas ígneas podem ser classificadas, Figura 3.3 (Le Maitre, 2005):

- Hololeucocratas – cor clara, compostas sobretudo por minerais félsicos: $0 < M < 10\%$;
- Leucocratas – cor clara onde predominam os minerais félsicos: $10 < M < 35\%$;
- Mesocratas – cor intermédia e de composição intermédia de minerais félsicos e máficos: $35 < M < 65\%$
- Melanocratas – cor escura onde predominam os minerais máficos: $65 < M < 90\%$;
- Ultramáficas – cor escura, compostas sobretudo por minerais máficos: $90 < M < 100\%$.

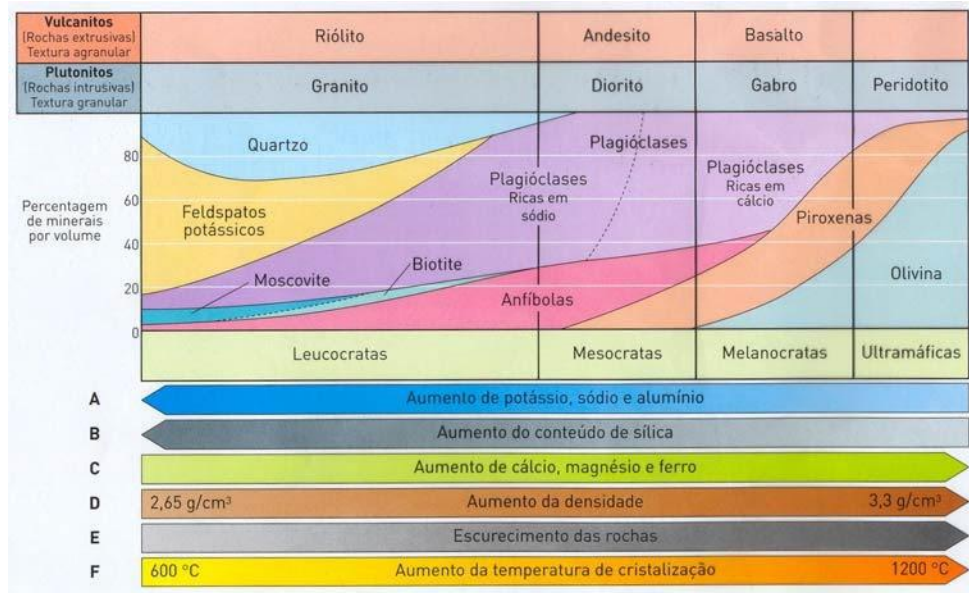


Figura 3.3 - Classificação básica de rochas ígneas (Simão, 2010)

Os gabros são em geral classificados como rochas melanocratas, com se verifica na fig 3.3, no entanto a designação de leucogabros, referida neste trabalho, é utilizada para definir gabros com percentagens mais altas de minerais félsicos, em particular de plagioclases.

Análise da composição química

A distinção mais comum para as rochas ígneas é aquela que se baseia no teor em sílica (SiO_2) da rocha, rotulando as rochas em função do seu grau de acidez. O teor em sílica é determinado apenas através de análises em laboratório, não sendo viável o uso desta classificação através da análise da amostra em mão ou em lâmina delgada (Gill, 2010).

Quanto ao teor em sílica, as rochas ígneas podem ser classificadas como, Figura 3.4 (Gill, 2010):

- Ácidas – consideradas sobressaturadas em sílica, que certamente apresentam quartzo livre na sua constituição: $\text{SiO}_2 > 63\%$;
- Intermédias – consideradas saturadas em sílica: $52 < \text{SiO}_2 < 63\%$;

- Básicas – consideradas como subsaturadas em sílica, têm fraca probabilidade de apresentarem quartzo livre, visível em amostra de mão: $45 < \text{SiO}_2 < 52\%$;
- Ultrabásicas – composta sobretudo por minerais básicos: $\text{SiO}_2 < 45\%$.

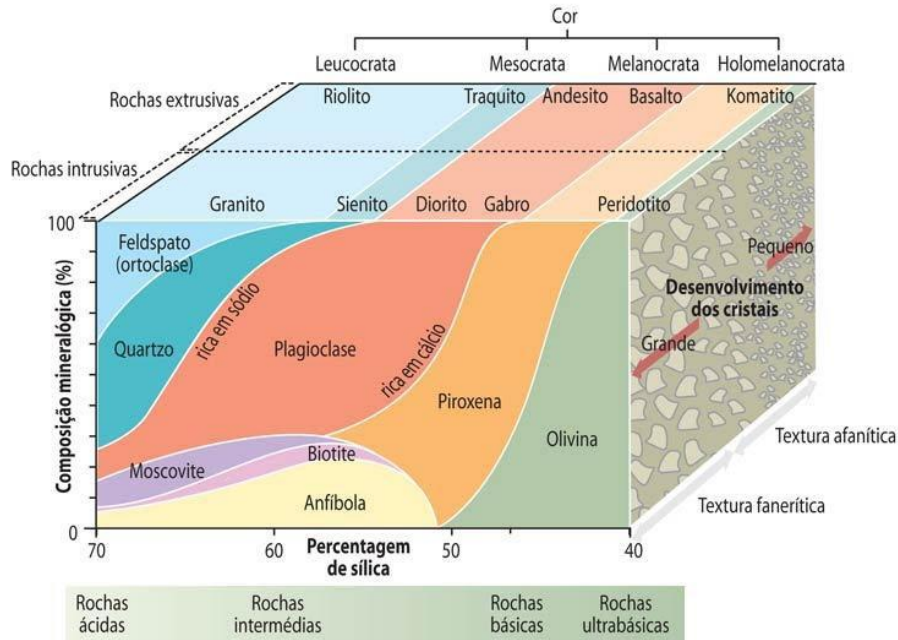


Figura 3.4 - Resumo das classificações de rochas ígneas segundo índices de granularidade, de cor e de acidez (Simão, 2010)

Da análise da composição química de uma rocha ígnea é possível estabelecer uma classificação modal normativa, como a classificação recomendada pela *International Union of Geological Sciences* (IUGS), que se baseia na concentração modal de cinco minerais essenciais: quartzo (Q), feldspatos alcalino (A), plagioclases (P), feldspatóides (F) e minerais máficos (M). Este sistema de classificação é aplicável a rochas plutónicas e vulcânicas usando grupos de minerais essenciais nas extremidades de diagramas triangulares ou em forma de diamante, Figura 3.5 (Streckeisen, 1976; LeBas and Streckeisen, 1991; LeMaitre, 2002 in Heferen e O'Brien, 2010).

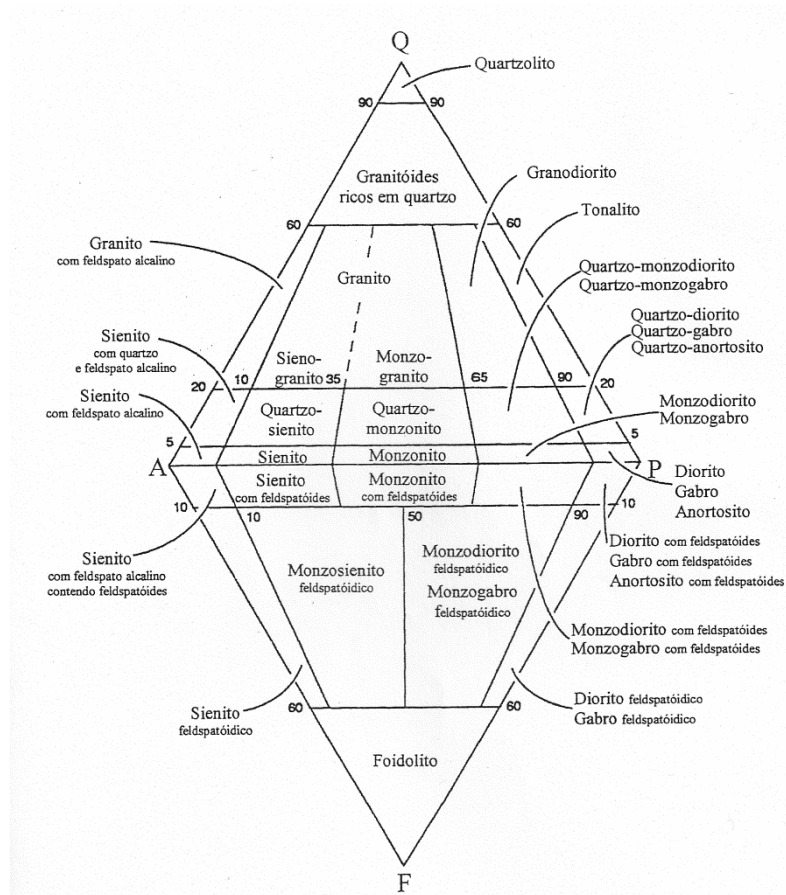


Figura 3.5 - Diagrama QAPF para rochas ígneas plutônicas com mais de 10% de minerais félsicos e menos de 90% de minerais máficos, baseada na classificação da IUGS (Streckeisen, 1976; LeMaitre, 2002 adaptado por Simão, 2010)

Dos três tipos de análises abordados anteriormente que permitem classificar de diferentes maneiras as rochas ígneas, os índices de cor e os índices de acidez são os que estão mais relacionados, pois a composição mineralógica de uma rocha está intimamente relacionada com a composição do magma que a originou, que por sua vez depende da sua composição química. Desta forma, estas duas classificações de rochas ígneas andam muitas vezes associadas, sobretudo para as rochas que se encontram nas extremidades dos espectros, Figura 3.4.

Por sua vez, como já foi referido, um magma com uma determinada composição química pode originar rochas de texturas diferentes, ainda que quimicamente idênticas e vice-versa, Figura 3.4.

3.2 GABROS

Na secção anterior ressalta que o gabro é uma rocha ígnea intrusiva, de grão grosseiro e composição mineralógica equivalente ao basalto, representando magma de composição basáltica que cristalizou lentamente em profundidade. Apresentará em regra uma cor verde escura, cinzenta escura, cinzenta esverdeada escura a preta e é composto sobretudo por piroxenas e plagioclases cálcicas (Tarbuck e Lutgens, 1999).

Não é uma rocha muito abundante na crosta continental, onde está presente em algumas intrusões, mas constitui, sem dúvida, uma grande percentagem da crosta oceânica, onde grandes porções do magma encontrado em reservatórios subterrâneos que em tempos alimentaram fluxos basálticos, eventualmente solidificaram em profundidade e formaram gabros (Tarbucks e Lutgens, 1999).

A maioria dos magmas máficos tem origem da fusão parcial da rocha ultramáfica peridotito, o constituinte principal do manto superior. Estudos laboratoriais confirmam que a fusão parcial desta rocha, pobre em sílica, origina magma de composição basáltica (Tarbuck e Lutgens, 1999).

Na análise mineralógica, Figura 3.6, um gabro pode, sumariamente, apresentar (Gill, 2010):

- Minerais essenciais – a sua presença determina o nome a atribuir à rocha
 - Augite (clinopiroxena);
 - Plagioclases cálcicas (Anortite, An > 50%);
- Principais minerais tipo - a sua presença não afeta o nome de raiz da rocha, mas permite a sua subdivisão através de qualificadores:
 - Enstatite (ortopiroxena);
 - Olivina;
 - Nefelina, analcite (feldspatóides);
 - Quartzo;
 - Horneblenda (anfíbola);
- Minerais acessórios comuns - presentes na rocha, geralmente em pequenas quantidades, mas dizem pouco sobre as suas características químicas essenciais
 - Minerais opacos (cromite, magnetite, ilmenite, sulfureto);
 - Apatite e zircão;
- Minerais de secundários - que se formaram após a cristalização completa do magma, substituindo minerais originais:
 - Serpentina substituindo olivina;
 - Clorite e uralite substituindo piroxena;
 - Sericite substituindo plagioclase e/ou feldspatóides;

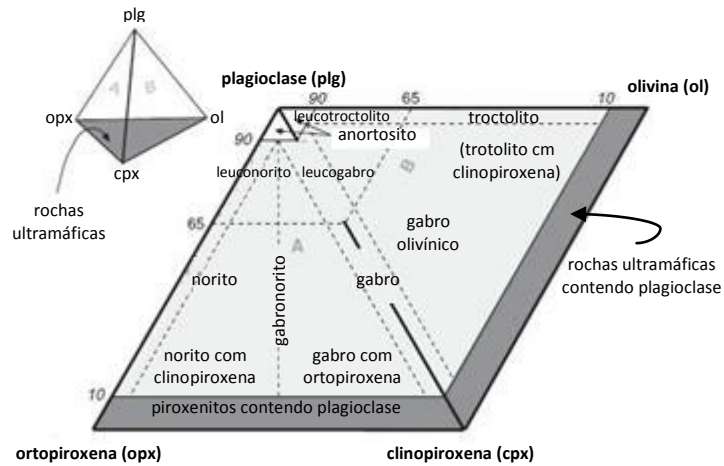


Figura 3.6 - Diagrama da nomenclatura IUGS para rochas gabróicas, baseado em proporções modais de plagioclase, olivina, ortopiroxena e clinopiroxena na rocha (Gill, 2010)

Os gabros (assim como os basaltos) e os magmas que os originam podem ser divididos em categorias como toleítico ou alcalino, a saber:

- Gabro toleítico contém, para além de augite, enstatite modal (ortopiroxena); também se pode encontrar quartzo intersticial secundário, indicando uma fusão levemente sobressaturada em sílica, ou alternativamente olivina;

Gabros alcalinos para além de olivina contêm pequenas quantidades de feldspatóides (nefelina ou analcite), indicando cristalização de um magma subsaturado em sílica; ainda se pode encontrar pequenas quantidades de hornblenda e biotite.

Muitas das grandes intrusões de gabros, excedendo algumas centenas de metros na sua menor dimensão, exibem uma arquitetura interna, química e mineralógica designada de bandado (*layering*) – que preserva muitos detalhes da história da cristalização do respetivo magma e regista, indiretamente, a evolução química da sua composição. Esta organização interna consiste numa acumulação em camadas, de espessura centimétrica a métrica, que diferem em proporções relativas de minerais (composição modal) numa extensão que é visível em afloramento no campo. Estas podem variar entre uma simples sucessão de finas bandas ricas em minerais ferromagnesianos, até camadas que estão muito bem graduadas internamente. Podem variar de camadas holomelanocratas na base para mesocratas ou leucocráticas no topo, ou seja, empilhadas umas diretamente sobre as outras ou intercaladas com gabro homogéneo (Gill, 2010).

Complexos ofiolíticos, como o ofiolito de Semail em Omã, Figura 3.7, incluem tipicamente rochas gabróicas bandadas e ultramáficas, que representam cumulados formados em câmaras magmáticas axiais abaixo de centros de expansão oceânica, ambos em cristas médias oceânicas ou bacias de tipo *back-arc*, acima de zonas de subducção. Amostras de gabros também já foram recolhidas em algumas zonas de fratura oceânica e em núcleos de complexos oceânicos extensionais (Ildefonse *et al.*, 2007 in Gill, 2010).

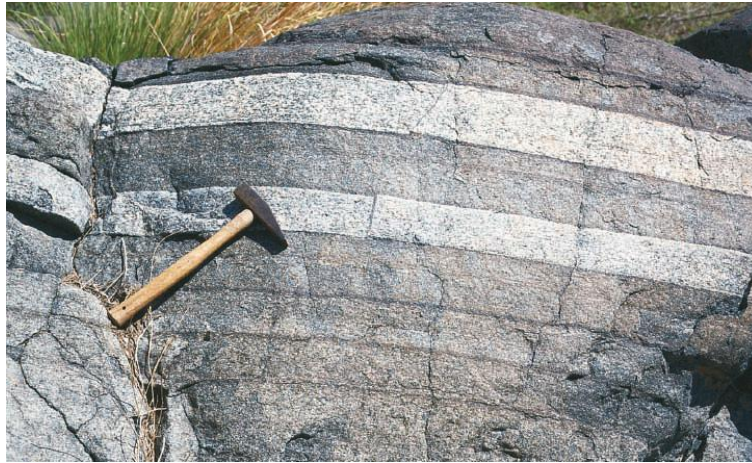


Figura 3.7 - Bandado gabróico na formação do ofiolito de Semail em Omã (Hambling e Christiansen, 2003).

3.3 OCORRÊNCIAS DE GABROS

Por todo o mundo as intrusões de gabros parecem exibir uma variedade de geometrias, dependendo, em parte, da escala da intrusão. Intrusões gabróicas de tamanho moderado podem apresentar formas afuniladas alargadas, em forma de bacia, diques gigantes ou diques afunilados em perfil cruzado, Tabela 3.2. As maiores intrusões básicas – ultrabásicas tendem a formar lapólitos, como é o caso do Complexo de *Bushveld*, na África do Sul. No entanto, para uma significativa proporção de importantes complexos máficos/ultramáficos, a forma original é obscurecida por falhamento, deformação tectónica, intrusões posteriores ou mais frequentemente por depósitos de cobertura recentes. Assinala-se a importância das mineralizações associadas a estes Complexos do ponto de vista mineiro.

Tabela 3.2 - Algumas intrusões gabróicas bandadas importantes (adaptado de Gill, 2010)

FORMA	EXEMPLOS	IDADE (Ma)	AMBIENTE TECTÓNICO	ROCHA TIPO ASSOCIADAS ÀS ROCHAS GABRÓICAS	DEPÓSITOS MINERAIS
Forma afunilada	<i>Skaergaard</i> , Gronelândia (Este)	55	Margens passivas associadas a plumas mantélicas	Ferrodiorito	Au, Elementos do grupo da platina (PGE)
	<i>Kiglapait</i> , Labrador (Canadá)	1300	Anorogénico	Sienito	
Lapólito ou em forma de bacia	<i>Fongen - Hyllingen</i> , Noruega	430	Sin-orogénico	Quartzo-sienito	
	<i>Bushveld</i> , África do Sul	2060	Possível grande província ígnea de Hatton	Cumulados ultramáficos, ferrodiorito	PGE, Cr, V, Cu, Ni
	<i>Windimurra</i> , Austrália (Oeste)	2800	Faixa de rochas verdes do Arcaico	Cumulados ultramáficos, leuconorite gabróico, etc.	PGE, V
Dique gigante	<i>Tugtûtoq</i> , Gronelândia (Sul)	1163	Rift continental	Sienito (diques compósitos)	
Diques afunilados em perfil cruzado	<i>Muskox</i> , Canadá	1270	Rift continental/ grandes províncias ígneas	Cumulados ultramáficos	PGE, Cu, Ni, Cr
	<i>Great Dyke</i> , Zimbabwe	2575	Rift continental/ grandes províncias ígneas	Cumulados ultramáficos	PGE, Cu, Ni, Cr
Outras formas de intrusão menos clara	<i>Eastern Layered Intrusion</i> , Rum, Hébridias - Escócia	60	Margens passivas associadas a plumas mantélicas	Peridotitos feldespáticos	
	<i>Stillwater</i> , Montana (USA)	2700	Possivelmente relacionado com subducção	Cumulados ultramáficos	PGE, Cu, Ni, Cr

Das intrusões gabróicas bandadas referidas na Tabela 3.2, a Intrusão Gabróica Bandada de *Skaergard*, na Gronelândia, é a que apresenta mais elementos em comum com a tipologia gabróica do Complexo Ígneo de Beja, em estudo nesta dissertação, referida na secção seguinte.

Esta intrusão gabróica é um exemplo clássico de intrusões bandadas básicas e deve a sua importância ao facto de resultar da cristalização completa de um único corpo de magma fechado numa câmara magmática. Os principais componentes da intrusão, que permitem perceber em que condições ocorreu o arrefecimento da câmara magmática, são os seguintes, Figura 3.8 (Hall, 1996):

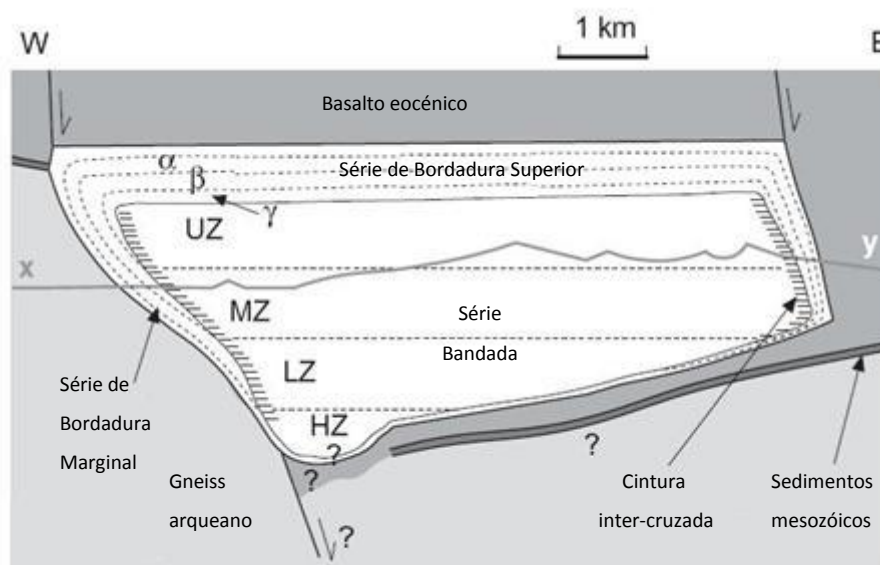
- Série de Bordadura Marginal, arrefecida próximo do contacto externo, composta por gabro olivínico toleítico de grão fino;
- Série Bandada, constituindo o corpo da intrusão e consistindo em gabro bandado ritmicamente. O bandado rítmico consiste na alternância de bandas escuras e claras, onde as primeiras são ricas em olivina, piroxena e magnetite, e as últimas em plagioclase. Apresentam alguns centímetros de espessura e podem repetir-se inúmeras vezes ou podem ocorrer apenas esporadicamente. Características notáveis são as laminações ígneas,

representadas pela orientação preferencial de minerais tubulares (como feldspatos) e várias texturas cumuladas bem desenvolvidas;

- Série de Bordadura Superior, consistindo de gabros de grão grosseiro com bandado horizontal pouco desenvolvido, provavelmente cristalizado do teto da câmara magmática para baixo, durante a fase de desenvolvimento das séries bandadas principais, como evidencia a presença de blocos desta série na Série Bandada;
- Granófiros são encontrados em pequenos corpos, no topo da intrusão, sob a forma de melanogranófiros, que ocorrem entre a Série de Bordadura Superior; de granófiros ácidos de *Tinten*, uma soleira intrudida na Série de Bordadura Superior; e os granófiros transacionais de *Sydtoppen*, também intrudidos na Série de Bordadura Superior.

A variação críptica da Série Bandada revela uma cristalização fracionada, pois ainda que as rochas pareçam semelhantes, a sua composição em massa de bandas claras e escuras, vai-se alterando gradualmente ao longo da altura da intrusão, de gabro a ferrodiorito.

A intrusão de *Skaergaard* tem um valor único como fonte de informação, pois aparenta representar a cristalização completa de um único corpo de magma que não foi contaminado ou reabastecido, e a sua composição inicial é a do magma basáltico mais comum (Hall, 1996).



UZ – Zona superior; MZ – Zona mediana; LZ – Zona inferior; HZ – “Zona oculta” (não exposta)

Figura 3.8 - Ilustração esquemática da Intrusão Bandada de *Skaergaard*, na Gronelândia (Gill, 2010)

Em Portugal, para além do Complexo Ígneo de Beja que será descrito na secção seguinte, no qual se inserem os gabros em estudo neste trabalho, é possível encontrar gabros em quantidade significativa no Maciço Eruptivo de Sines.

O maciço eruptivo de Sines situa-se na orla litoral alentejana, a 158km de Lisboa, e a meia distância entre Sintra e Monchique. Grande parte do maciço encontra-se submersa, mas estudos permitiram definir que apresenta uma forma elíptica com orientação E-W de eixo maior (Canilho, 1972). Contacta, a Norte, com calcários do Jurássico superior, metamorfizando-os; a Sul, é intrusivo em xistos do Carbónico, originando orla de corneanas pelíticas. A idade, obtida pelo método de Rb-Sr, é de 72 ± 3 Ma o que o situa no Cretácico superior (Canilho e Abranches, 1982 *in* Canilho, 1989). A razão isotópica inicial do Sr sugere que a intrusão teria tido origem no manto superior, não tendo sido contaminada por rochas da crosta continental (Canilho, 1989).

É constituído predominantemente por rochas gabro-dioríticas, que formam os maiores afloramentos, e envolvem ainda sienitos, também muito importantes no maciço. Estas rochas são cortadas por numerosos filões ácidos e básicos, Figura 3.9. Os sienitos são mais recentes, pois contactam com os gabros por meio de brecha de cimento sienítico com elementos gabróicos. O método de Rb-Sr confirma esta informação, atribuindo ao gabro 78 Ma e ao sienito 67 Ma (Canilho, 1972). A relação entre as rochas intrusivas e as extrusivas levam a considerá-las cogenéticas (Canilho, 1989).



Figura 3.9 - Rede diques sieníticos em gabros no maciço eruptivo de Sines

(fonte:<http://www.alentejolitoral.pt/Downloads/Ambiente/Recursos%20geol%C3%B3gicos/A%20geologia%20no%20litoral%20do%20Alentejo.pdf>, consultado em Setembro 2011)

Este conjunto de rochas gabróicas tem sido amplamente estudado para fins de engenharia, nomeadamente pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e pelo Centro de Estudos de Geologia e Geotecnia de Santo André (derivado do antigo Gabinete da Área de Sines).

Tabela 3.3 - Valores de algumas propriedades geotécnicas para o gabro de Sines (LNEC, 1974)

	Identificação da mostra	Velocidade propagação ultra-sons (m.s ⁻¹)	Módulo de elasticidade (kgf.cm ⁻² x10 ³)	Tensão de rotura (kgf.cm ⁻²)	Coefficiente de Poisson	Peso específico aparente (g. cm ⁻³)	Porosidade (%)
Rocha de aspecto são, cinzenta escura	SD ₁	6560	1026	1600	0,27	3,06	0,00
	SD ₃₋₁	6240	861	1938	0,28	2,90	0,10
	SD ₃₋₂	6260	860	1663	0,26	2,89	0,16
	SD ₃₋₃	6220	927	1876	0,27	2,91	0,13

3.4 COMPLEXO ÍGNEO DE BEJA

3.4.1 Enquadramento geológico e geomorfológico

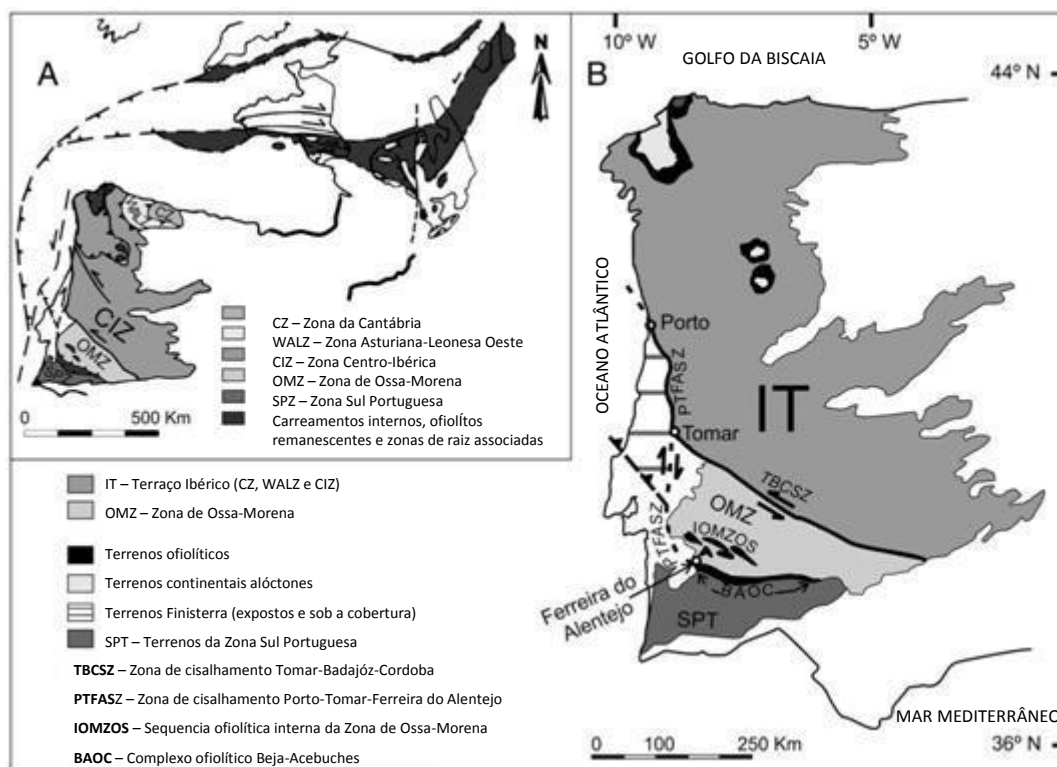
Os gabros investigados na presente dissertação integram a Sequência Gabróica Bandada de Beja (LGS), uma das três unidades que integram o Complexo Ígneo de Beja (CIB).

O CIB consiste numa larga faixa intrusiva, curva, de aproximadamente 100 km de extensão por 20 km de largura, que se estende entre Vendas Novas e Serpa, fazendo a fronteira SW, em Portugal, da Zona de Ossa-Morena, ZOM (Jesus *et al.*, 2003; Pedro *et al.*, 2005; Ribeiro *et al.*, 2010). É constituído por diferentes maciços de rochas intrusivas, geneticamente relacionados com a subducção varisca que se desenvolveu entre a ZOM e a Zona Sul-Portuguesa (ZSP), aos quais se associam, especialmente, episódios de atividade vulcânica (Andrade *et al.*, 1991, 1992 *in* Pedro *et al.*, 2005).

O Maciço Hespérico, Fig 3.10 A, consiste num fragmento de soco varisco, com formações de idades compreendidas entre o Precâmbrico e o Paleozóico superior (Pedro *et al.*, 2005), correspondendo a ZOM a uma das suas zonas tectonoestratigráficas, com características estruturais, metamórficas, magmáticas e sedimentares peculiares, cuja evolução geodinâmica não se encontra, ainda, unanimemente estabelecida (Pedro *et al.*, 2006b).

Embora não seja unanimemente aceite, em termos gerais é possível definir dois ciclos tectónicos para a ZOM, um cadomiano e um varisco (Pedro *et al.*, 2005). A orogenia Cadomiana foi responsável pela acreção da ZOM ao autóctone Hespérico (Neoproterozóico tardio – Paleozóico inferior), enquanto, que da orogenia Varisca resultaram as maiores fases de deformação, estruturas e eventos metamórficos e magmáticos observáveis nesta zona, formando-se uma nova faixa magmática varisca

durante a colisão com a ZSP (Pedro *et al.*, 2005 e Tornos e Chiaradia, 2004). Desta colisão, Figura 3.11, resultou o Complexo Ofiolítico de Beja – Acebuches, materializado numa sutura varisca cuja génese está relacionada com os processos de subducção/obdução, vergentes para Norte, vigentes no bordo SW da ZOM, zona de cisalhamento da Ibéria (*op. cit.*). Junto ao bordo SW da Zona de Ossa-Morena, Figura 3.12, individualiza-se o Domínio de Évora-Beja e, dentro deste, o CIB.

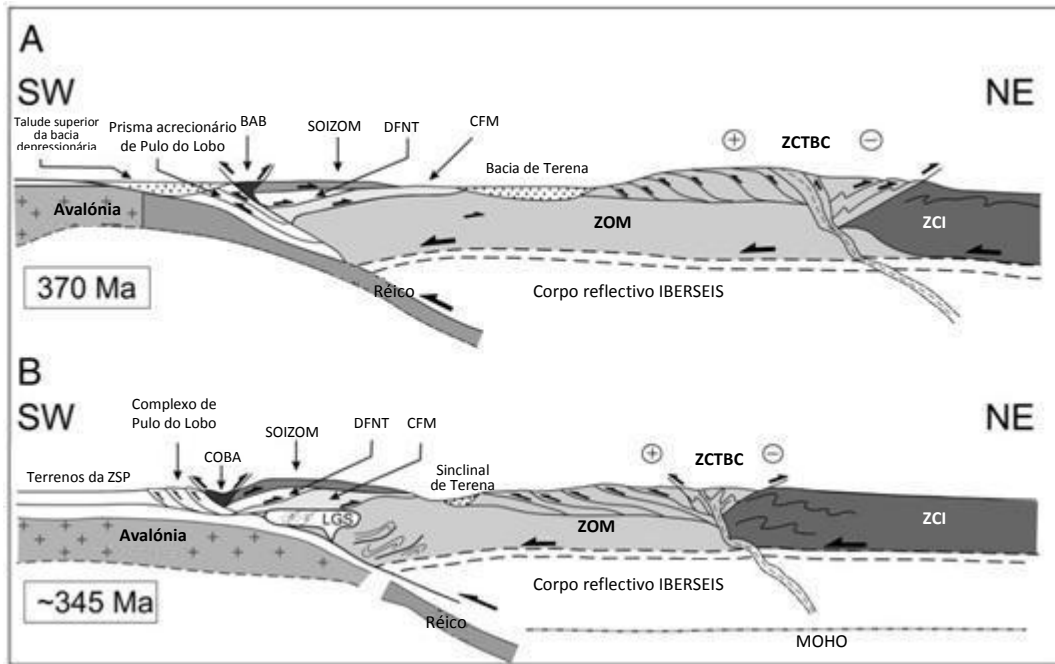


Legenda: (A) Subdivisão do Maciço Ibérico e correlação das suturas Variscas na Europa Ocidental. (B) Representação esquemática dos principais terrenos no SW dos Variscidos Ibéricos

Figura 3.10 - A Zona de Ossa-Morena (ZOM) localizada entre a Zona Centro Ibérica (CIZ) e a Zona Sul Portuguesa (ZSP) e principais características tectonoestratigráficas (adaptado de Ribeiro *et al.*, 2010)

A formação deste último permanece, no entanto, um tanto controversa (Jesus *et al.*, 2007b). Em considerações anteriores, o início do desenvolvimento do CIB previa-se que tivesse resultado da elevação de derivados do magma, desencadeada durante a subducção ativa da litosfera oceânica derivada da colisão entre ZOM-ZSP no pré-Fameniano (Oliveira *et al.*, 1986; Munhá *et al.*, 1989; Santos *et al.*, 1990; Quesada *et al.*, 1994 *in op. cit.*). Mais recentemente, Pin *et al.* (*in op.cit.*) sugeriu que a implantação da unidade gabróica do CIB teve lugar num cenário extensional (provavelmente, transtensional) *ca.* 350 Ma como indicado pelas unidades *U-Pb ID-TIMS* dos zircões. Ambas as perspetivas têm consequências significativas na interpretação da evolução geodinâmica da região,

exigindo assim dados geocronológicos e interpretação de informações multidisciplinares relativas à fronteira ZOM-ZSP (*op. cit.*).



Legenda:

Temperaturas elevadas: (A) ≈ 370 Ma e (B) ≈ 345 Ma

BAB – Bacia em *back-arc*; SOIZOM – Sequência ofiolítica interna da Zona d Ossa-Morena; DFNT – Duplexes de Finisterra; CFM – Complexo Filonítico de Moura; ZCTBC – Zona de cisalhamento Tomar – Badajoz – Córdoba; ZCI – Zona Centro Ibérica; IBERSEIS - Perfil sísmico de reflexão profundo do SW da Ibéria.

Figura 3.11 - Secções transversais interpretativas do final da fase de obducção (Ribeiro *et al.*, 2010)

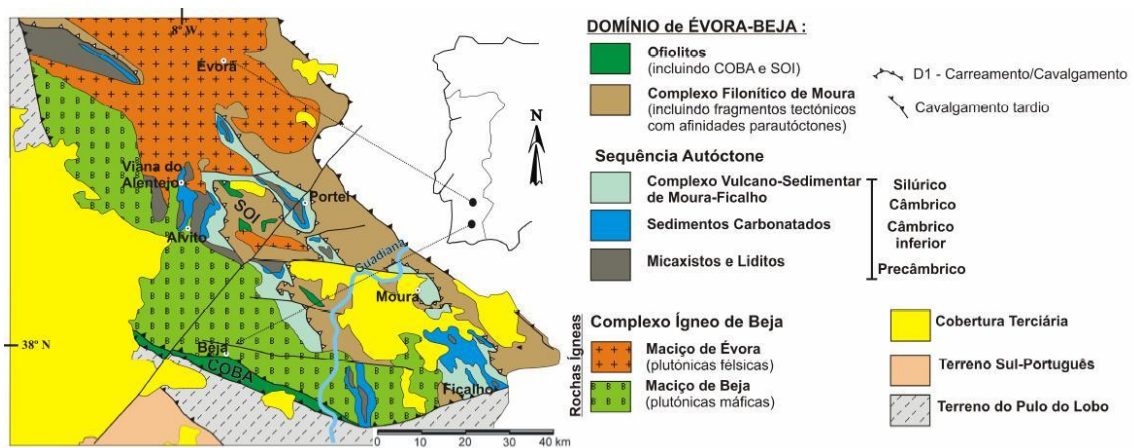


Figura 3.12 - Mapa geológico do Domínio de Évora-Beja (adaptado de Araújo *et al.*, 2005 in Pedro *et al.*, 2006a)

O CIB instalou-se ao longo do bordo SW da ZOM (Fonseca, 1995 in Pedro *et al.*, 2005) entre o Devónico médio-superior e o Carbónico (Conde e Andrade, 1974; Santos *et al.*, 1987; Dallmeyer *et al.*, 1993 in Pedro *et al.*, 2005).

Do exposto, e unanimemente aceite, é a evidência de que o CIB constitui o registo de uma importante atividade magmática sin-orogénica, varisca, que durou mais de 25–30 Ma (Jesus *et al.* 2003c) e compreende três unidades principais: 1) A **Sequência Gabróica Bandada** (LGS) de Beja, composta por um amplo espectro de gabros olivínicos, bordejados por dioritos heterogéneos resultantes de contaminação crustal e/ou processos de mistura de magmas, que se instalou durante as fases iniciais do magmatismo varisco de colisão (*ca.* 355-345 Ma, Jesus *et al.*, 2007 b?); 2) O **Complexo Cuba-Alvito**, mais evoluído, essencialmente constituído por (grano-) dioritos e raros domínios gabróicos, sem presença de bandado, formado entre *ca.* 335-330 Ma a *ca.* 320 Ma; e 3) O **Complexo de Pórfiros de Baleizão**, mais recente, uma intrusão rasa há *ca.* 300 Ma, tardia, envolvendo vários tipos de rochas porfíricas introduzidas em níveis crustais muito superficiais (Jesus *et al.*, 2003, 2005a, 2005b, 2006b, 2007a; Mateus *et al.*, 2010).

A Sequência Gabróica Bandada pode ser dividida em dois compartimentos principais, separados pela zona de desligamento da Messejana, também conhecida por zona de falha Odemira-Ávila (Jesus *et al.*, 2006a). O compartimento poente, muito maior, situado entre nascente de Torrão e oeste de Beringel, tem sido o mais estudado nos últimos anos e compreende diferentes sucessões de rochas gabróicas bandadas (Jesus *et al.*, 2007b). No compartimento nascente, entre oeste de Beringel e Serpa, o bandado magmático dificilmente é observado à escala meso e macroscópica e são mais comuns evidências de assimilação crustal, como registado por evoluídas composições isotópicas de Sr-Nd e por uma grande abundância de rochas ricas em anfíbolos (*ib.*), às vezes sob a forma de fenocristais.

Em termos gerais, a direção do bandado magmático varia entre WSW-ESSE a NW-SE, inclinando 25º-30º para SSW-SW, ainda que localmente possam ocorrer ligeiros desvios resultantes de perturbações induzidas por fluxos magmáticos ou por deformações mecânicas a zonas de cisalhamento semi-frágil contíguas causando reajustamentos estruturais significativos nestas zonas, especialmente as de rumo geral WNW-ESSE, mas também, localmente, as de direção geral NNW-SSE (Jesus *et al.*, 2006a e Mateus *et al.*, 2010).

A abundância de informação sobre o compartimento Oeste da LGS parece derivar do facto de este compartimento apresentar um potencial metalogénico e, conseqüentemente, económico, mais interessante, justificado este, por estudos detalhados no século XX que indicavam a presença de importantes mineralizações nesta área associadas à LGS. Dados geofísicos e geoquímicos obtidos pelo Instituto Geológico e Mineiro (IGM) atual Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG),

seguido de critérios resultantes de estudos posteriormente desenvolvidos no sector NW da LGS, indicavam que na zona de Odivelas e Ferreira do Alentejo o potencial metalogénico seria importante (Jesus *et al.*, 2003).

Segundo Mateus (2010), levantamentos geológicos de detalhe empreendidos recentemente entre Torrão e Beringel no compartimento ocidental da LGS, em conjunto com novos dados petrográficos, mineralógicos e geoquímicos, permitiram diferenciar melhor esta unidade. As fácies gabróicas aflorantes foram agrupadas em *Séries* e se necessário subdivididas em *Grupos*, tendo em conta a ciclicidade modal e as variações de natureza geoquímica observadas nas diferentes fácies, registando a evolução consequente de cada novo influxo de magma na(s) câmara(s) magmática(s) num dado momento, conforme se infere da interação entre vários processos como a cristalização fracionada, a acumulação de minerais e mistura com o líquido silicatado residual, ficando deste modo representados ciclos magmáticos distintos, resultantes de influxos repetidos do líquido silicatado (Jesus *et al.*, 2006a e Mateus *et al.*, 2010). Assim, os contactos entre as *Séries* (e em menor escala entre os *Grupos*) equivalem a variações mais ou menos subtis das características mineralógicas e geoquímicas. A definição dos limites reais entre as séries será algo problemática, uma vez que as transições entre estas se realizam de modo gradual (Mateus *et al.*, 2010).

Foram distinguidas para nascente e por sector geográfico, as seguintes *Séries*:

- Sector Soberanas – séries Soberanas I e II: a série Soberanas I desenvolve para Sul um domínio de (leuco-) troctolitos com textura coronítica grosseira. A série Soberanas II compreende (leuco-)noritos de grão fino e leucogabros, sendo o contacto entre estas duas séries tectónico (Jesus *et al.*, 2006a).
- Sector Odivelas – séries Odivelas I e II: na série Odivelas I consiste sobretudo em leucogabros olivínicos que nas secções inferiores incluem zonas enriquecidas com cumulos de magnetite e ilmenite. A série Odivelas II é uma sucessão rítmica de leucogabros olivínicos e gabros olivínicos, com camadas descontínuas de anortositos na secção mais elevada (Jesus *et al.*, 2005b e 2006a).
- Sector Ventoso – Série Odivelas III: compreende uma sequência rítmica de camadas bem definidas de (leuco) gabros olivínicos, piroxenitos e gabros piroxeníticos com inclusões disseminadas de sulfuretos de Ferro, Níquel, Cobre e Cobalto. (Jesus *et al.*, 2006a).
- Sector Ferreira do Alentejo – Beringel – séries Beringel I e II: A série Beringel I exhibe uma sequência composta sobretudo por gabros piroxeníticos e leucogabros olivínicos. Na série Beringel II encontra-se uma sucessão rítmica de piroxenitos/gabros piroxeníticos e

leucogabros olivínicos, apresentando para o topo da sequência menores níveis de anortositos. A sucessão termina com um gabro piroxenítico de grão grosseiro anexando uma subfáteis de cumulos. Este sector é limitado a SW por um complexo grupo de rochas pertencentes ao Grupo de Bordadura (Jesus *et al.*, 2006a) (Figura 3.13).

- Sector Ferreira do Alentejo – Beringel – Grupo de Bordadura: Inclui anortositos heterogéneos que tipicamente limitam fragmentos de rochas gabróicas heterométricas, parcialmente digeridas e variavelmente retrogradadas. Entre os últimos, os troctolitos são os mais perceptíveis. (Jesus *et al.*, 2006a) (Figura 3.13).

Esta evolução acima descrita, documentada pela sucessão das cinco *Séries*, caracteriza-se por reciclagem do líquido silicatado (recarga/taxas de cristalização variáveis), envolvendo preenchimento magmático recorrente da(s) câmara(s); o *Grupo de Bordadura* corresponderá ao último e mais evoluído influxo de magma do compartimento ocidental do LGS, fornecendo provas para uma possível ligação entre os eventos magmáticos iniciais (de *ca.* 355 Ma até *ca.* 345 Ma) com a instalação de gabro-diotrito (de *ca.* 335-340 Ma até *ca.* 320 Ma) durante o evento de colisão tardia (Jesus *et al.*, 2006a e Mateus *et al.*, 2010). A constituição e o arranjo interno da *Sequência Gabróica Bandada*, prosseguindo desde *ca.* 355 Ma a *ca.* 345Ma, denota uma génese necessariamente dependente da evolução geodinâmica experimentada pelo bordo SW da ZOM durante o início da colisão continental Varisca (Mateus *et al.*, 2010).

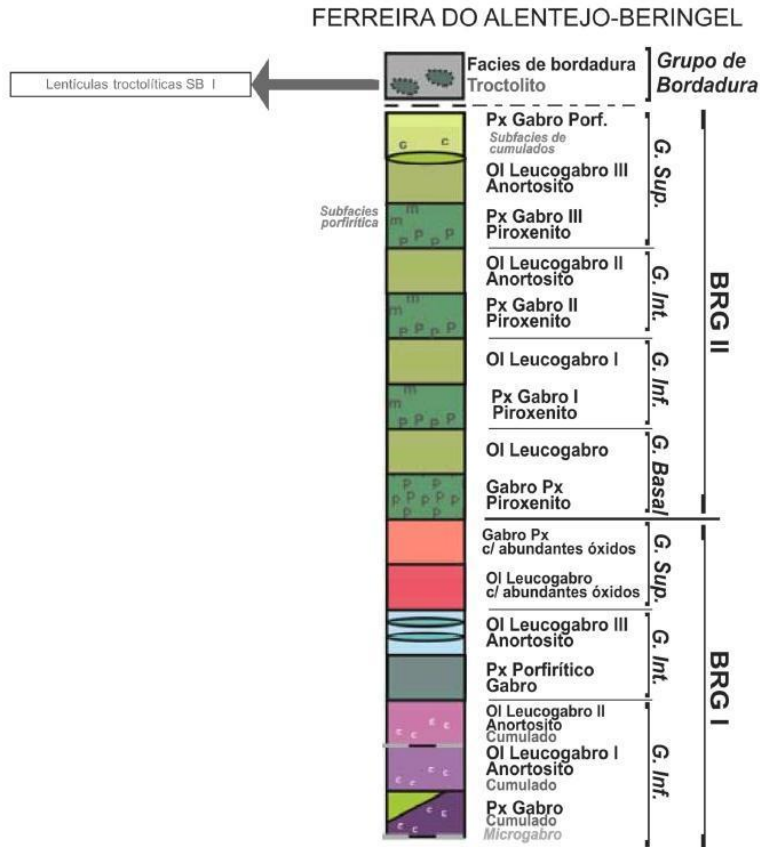


Figura 3.13 - Coluna litológica sintética do sector Ferreira do Alentejo – Beringel, do compartimento ocidental da LGS (adaptado de Jesus *et al.*, 2006a e Mateus *et al.*, 2010)

A síntese dos dados atualmente disponíveis para o compartimento do CIB localizado entre Torrão e Beringel (compartimento Oeste) revela que a complexa evolução documentada pela sucessão das cinco *Séries* é, presumivelmente, passível de extrapolação para a restante parte da *Sequência Gabróica Bandada* (Mateus *et al.*, 2010).

Deste modo, e considerando apenas os dados em bibliografia à data em que este trabalho está a ser realizado, assume-se que para a área em estudo, situada no compartimento a nascente da zona de falha da Messejana, se irá encontrar uma situação litológica análoga.

4 CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo descrevem-se os locais de amostragem de gabros, bem como o processamento e seleção das amostras para submeter a ensaios. Seguem-se os procedimentos laboratoriais adotados e as normas selecionadas para os tipos de ensaios realizados, a saber: determinação do teor em água, porosidade e peso volúmico, velocidade de ultra-sons, dureza ao ressalto, resistência à tração brasileiro (RTB), resistência à compressão uniaxial (RCU) e deformabilidade.

À exceção dos ensaios de resistência à compressão uniaxial, todos os ensaios referidos foram realizados no Laboratório de Geologia de Engenharia da FCT-UNL. As lâminas delgadas de rocha e a respetiva observação micropetrográfica foram executadas no Laboratório de Microscopia da FCT-UNL.

4.1 AMOSTRAGEM EFECTUADA

As amostras foram recolhidas, sob a forma de blocos, durante visitas de campo à região situada a poente da cidade de Beja, cujo propósito era o reconhecimento de potenciais zonas de amostragem e descrição do maciço rochoso onde estas se encontravam inseridas, Figura 4.1.

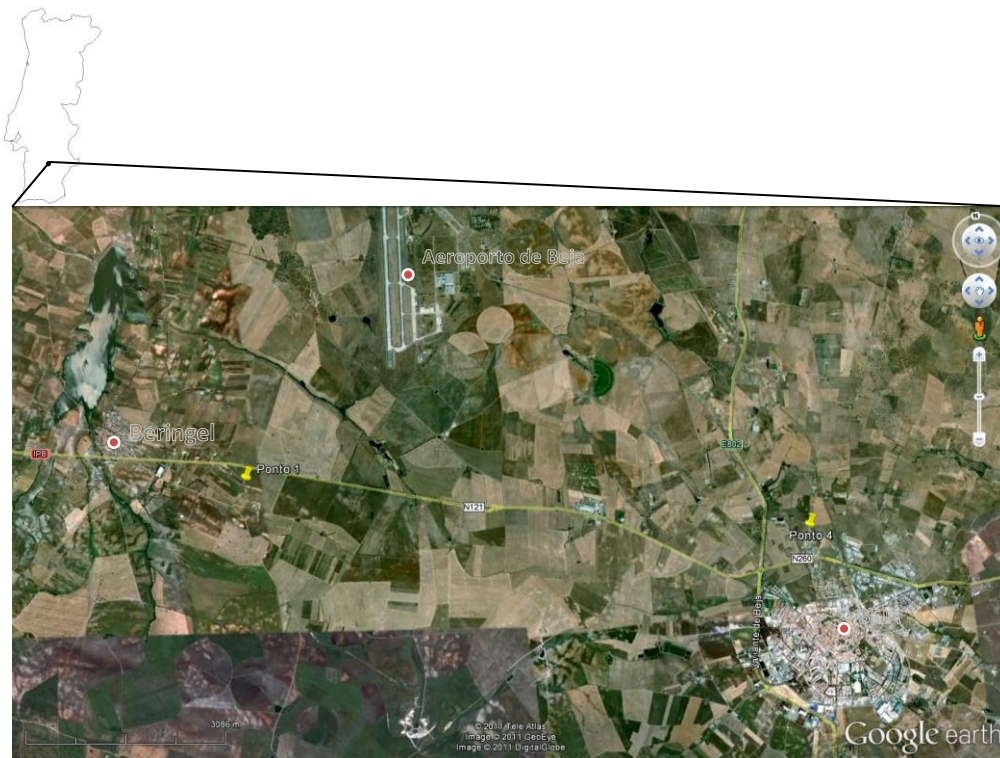


Figura 4.1 - Imagem de satélite da área em estudo e dos dois locais amostrados (adaptado de Google Earth, 2011)

O relevo da região caracteriza-se por ser pouco acidentado, integrado na extensa planície alentejana, ou peneplanície, interrompida por serras de fraca altitude (Feio, 1951), o que dificultou a deteção de cortes para amostragem de blocos.

A área amostrada, entre a cidade de Beja e a freguesia de Beringel, encontra-se a cerca de 11 km para Oeste daquela cidade, acompanhando o desenvolvimento da Estrada Nacional 121 (N121), no prolongamento do IP8. Foram selecionados cerca de cinco áreas-alvo, designadas de ponto 1 a ponto 5, mas destas, apenas a primeira e quarta revelaram poder fornecer os materiais em quantidade e com a qualidade pretendida para a investigação.

Estas zonas de amostragem, identificadas como Ponto 1 e Ponto 4, são caracterizadas em seguida.

4.1.1 Ponto 1

O Ponto 1 localiza-se a cerca de dois quilómetros a nascente de Beringel, a Sul da N121, numa zona plana, onde se estava a proceder à escavação para um canal de adução entre albufeira da barragem de Pisão, a Norte, para a barragem dos Cinco Reis, a Sul, Figura 4.2. O canal apresenta na zona um desenvolvimento quase Norte-Sul.



Figura 4.2 - Imagem de satélite da área de amostragem do Ponto 1 (adaptado de Google Earth, 2011)

O maciço rochoso apresenta uma pequena cobertura, decimétrica, de gabro decomposto (W_5) e, imediatamente abaixo, a cerca de um metro de profundidade, onde foram recolhidos os blocos, encontrava-se pouco alterado a são, W_{1-2} Figura 4.3.



Diâmetro da conduta ca. 2 m

Figura 4.3 - Aspeto do local de amostragem do Ponto 1

A análise da roseta (Figura 4.4) das principais diaclases cujas atitudes foram medidas nos taludes do local, permite verificar que maciço se encontra muito fraturado, predominando uma família com uma orientação preferencial Norte-Sul.

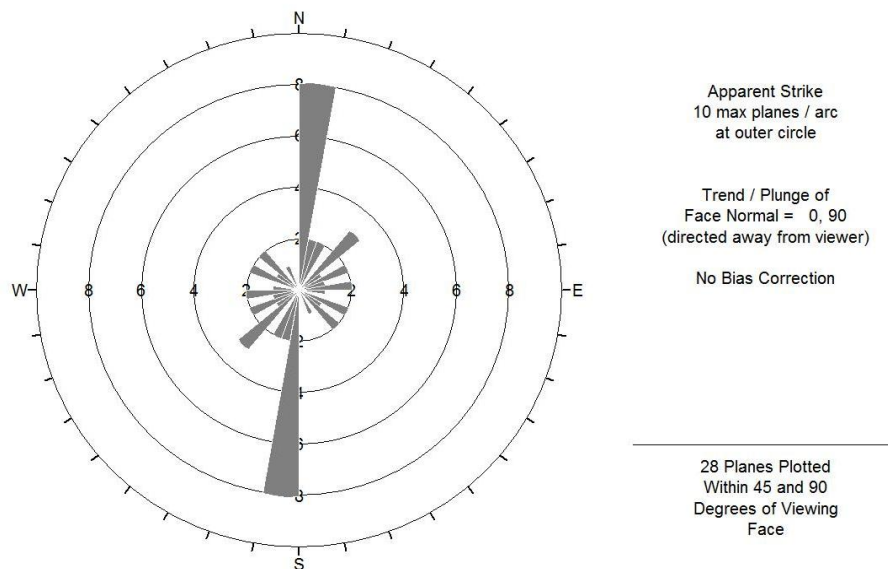


Figura 4.4 - Roseta das diaclases, executada no programa Dip, dos taludes do Ponto 1

4.1.2 Ponto 4

O Ponto 4 localiza-se a norte do centro urbano de Beja e da N121 e a Oeste da Variante de Beja (IP2), numa depressão onde se explorou uma saibreira em tempos, Figura 4.5.



Figura 4.5 - Imagem de satélite da área de amostragem do Ponto 4 (adaptado de Google Earth, 2011)

O maciço rochoso encontra-se subaflorante, existindo apenas uma decimétrica camada de aterro à superfície. O gabro apresenta-se pouco alterado (W_2) e com algumas zonas medianamente alteradas (W_3) e fraturas próximas, F_4 , Figuras 4.6 e 4.7.



Figura 4.6 - Aspeto do local de amostragem do Ponto 4



Figura 4.7 - Maciço rochoso no Ponto 4 (cedida por Sofia Soares)

A roseta de diaclases obtida para algumas medições no local, Figura 4.8, possibilita detetar duas famílias igualmente importantes, uma com orientação também para N-S, e a outra para WNW-ESE.

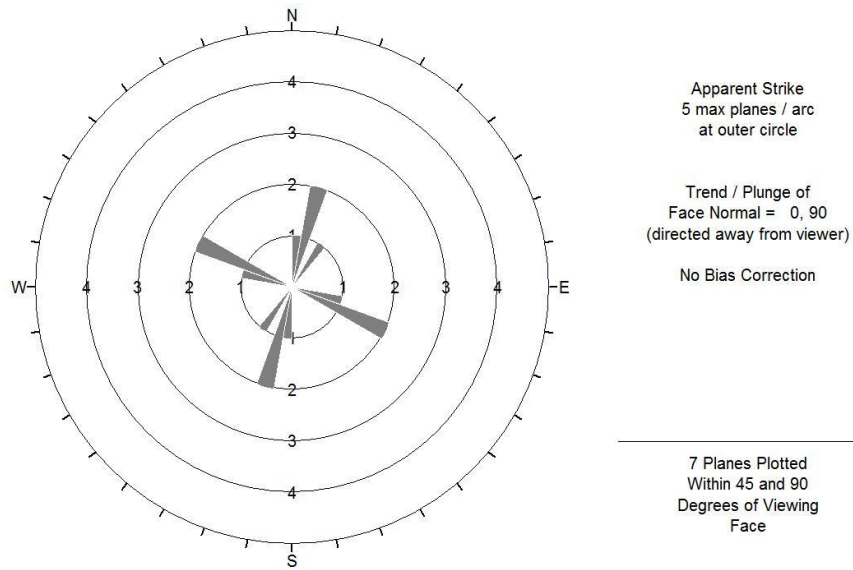


Figura 4.8 - Roseta das diaclases, executada no programa Dips, dos taludes do Ponto 4

4.2 SELECÇÃO E PROCESSAMENTO DAS AMOSTRAS

Os blocos recolhidos foram seleccionados tendo em conta os seguintes fatores:

- Possibilidade de manuseamento no transporte e em laboratório;
- Volume de rocha necessário para obter pelo menos o número de provetes exigido nas normas ASTM e recomendações da ISRM para os ensaios a realizar (Tabela 4.1);
- Menor estado de meteorização possível, de modo obter provetes de rocha intacta.

Não se utilizaram as normas portuguesas (NP EN) uma vez que, após consulta, verificou-se que se aplicam para a avaliação de propriedades de rochas ornamentais, não revelando aplicação prática em ensaios de caris geotécnica.

Tabela 4.1 - Resumo das recomendações de várias normas quanto ao número necessário e geometria dos provetes nos ensaios RCU, RTB e determinação da porosidade e densidade

Ensaio	Norma e recomendações	Nº provetes	Geometria dos provetes	
			D	h, l, t
Porosidade Peso volúmico	ISRM, 1977a	10 provetes	≥ 50 g de massa	
	ASTM C97/C97M – 09	≥ 5 provetes por amostra	8mm < V/A < 12,5mm 8mm < t < 12,5mm	
RTB	ISRM, 1978c	Pelo menos 10 provetes	54 mm	≈ D/2 = 27mm
	D 3967 . 08	≥ 10 provetes	54 mm	0,2 < t/D < 0,75 =>10,8 < t < 40,5 mm
RCU	ISRM, 1979	Pelo menos 5 provetes	54 mm	2,5 < h/D < 3 => 135 < h < 162 mm
	ASTM D 7012 – 07	A definir pelo especialista	≥ 47 mm	2:1 < l/D < 2,5:1 => 108 < l < 135 mm

Diâmetro (D); Altura (h), Comprimento (l), Espessura (t); V – volume; A – área

Os blocos foram armazenados no laboratório em ambiente controlado e a sua identificação, por local de amostragem, foi feita da junção de letras por ordem de recolha (bloco 1A, bloco 4A, etc.).

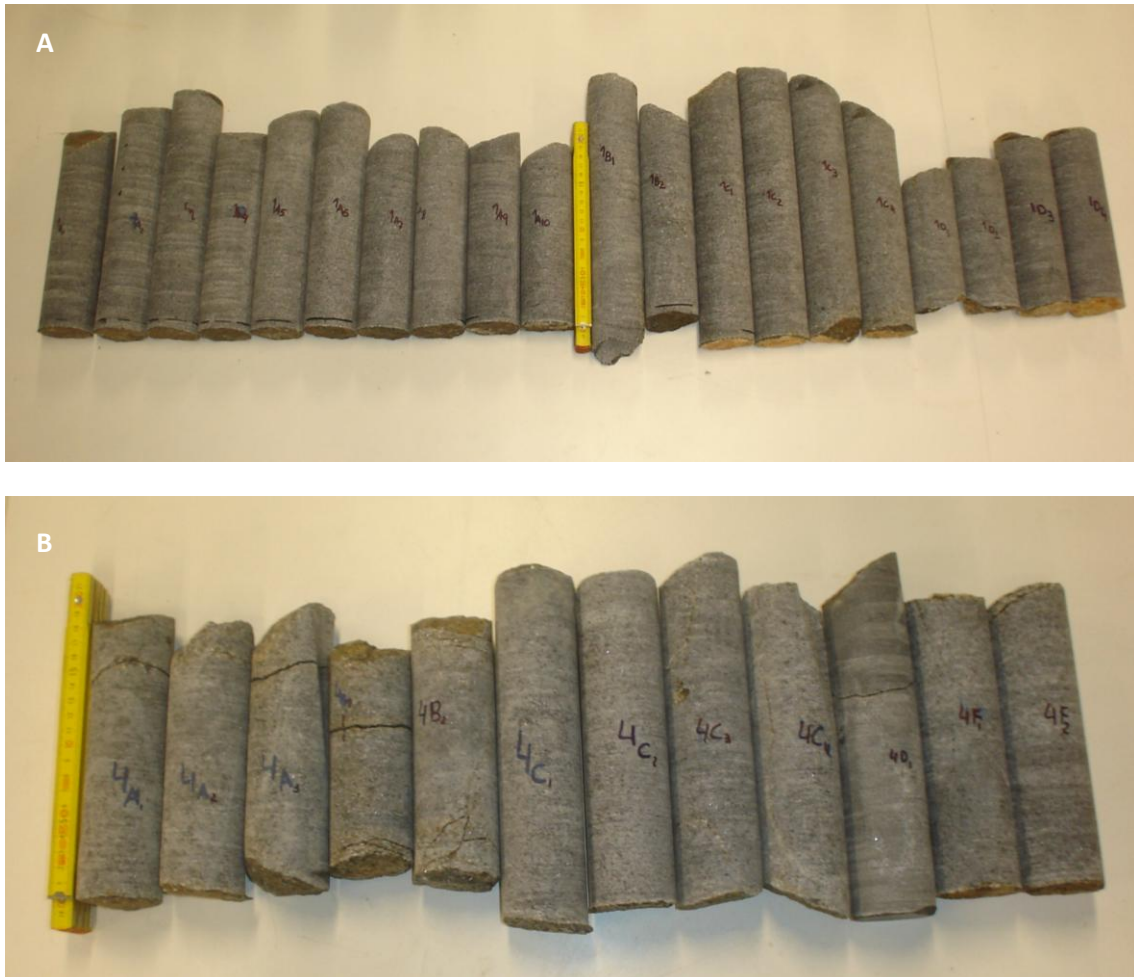
Para a obtenção dos provetes, os blocos foram caroteados em laboratório, com uma caroteadora, Figura 4.9, de diâmetro NX (76 mm), a dimensão mínima recomendada pelas normas/recomendações da maioria dos ensaios a realizar. Os tarolos resultantes do caroteamento foram identificados através da adição de números árabe, por ordem de processamento, à designação do bloco de origem (tarolos 1D1, 1D2, 4C1, 4C2, etc.).



Figura 4.9 - Caroteadora no laboratório e carotagem de um bloco

Nesta fase da preparação das amostras foi possível observar diferenças quanto ao estado de meteorização dos blocos provenientes do Ponto 1 e do Ponto 4, Figura 4.10. Dos blocos do Ponto 4 resultaram tarolos de rocha com descontinuidades, em regra fechadas, de inclinações variadas, ainda que os blocos exteriormente se apresentassem pouco meteorizados (W_2). Muitas vezes estas

descontinuidades consistiam em fraturas abertas, o que impedia a obtenção de tarolos com comprimento suficiente para se cortarem provetes com a altura mínima necessária, a altura recomendada pelas normas para a realização do ensaio RCU (Tabela 4.1). Deste modo, foi necessário obter um maior volume de blocos para o Ponto 4 do que para o Ponto 1.



Ponto 1 (A) e ponto 4 (B)

Figura 4.10 - Tarolos resultantes do caroteamento dos blocos

Os tarolos de rocha obtidos foram seguidamente serrados no topo e na base, de modo obter o mesmo número de provetes, por ensaio, para cada um dos dois grupos de rochas amostrados. A respetiva descrição e dimensões integram o Anexo 1.

A seleção dos provetes em cada conjunto de amostras das duas áreas amostradas foi feita segundo o estado de meteorização, das características das fraturas e da textura da rocha, donde resultaram os seguintes conjuntos, por tipo de ensaios:

- Quatro grupos de amostras para o ensaio de porosidade/peso volúmico, subdivididas da seguinte forma:
 - Ponto 1 – não alteradas, W_1 ;
 - Ponto 1 – pouco alteradas, W_2 ;
 - Ponto 4 – alteradas sem fraturas, W_1 ;
 - Ponto 4 – alteradas com fraturas fechadas, W_2 .
- Quatro grupos de amostras para o ensaio de resistência à tração brasileiro, assim separados:
 - Ponto 1 – amostras com teor em água natural;
 - Ponto 1 – amostras saturadas;
 - Ponto 4 – amostras com teor em água natural, pouco alteradas (W_2) sem fraturas;
 - Ponto 4 – amostras com teor em água natural, pouco alteradas (W_2) com fraturas.
- Três grupos de amostras para o ensaio de resistência à compressão, subdivididas da seguinte forma:
 - Ponto 1 – amostras sem descontinuidades aparentes;
 - Ponto 4 – amostras W_2 sem descontinuidades aparentes;
 - Ponto 4 – amostras W_2 com descontinuidades.

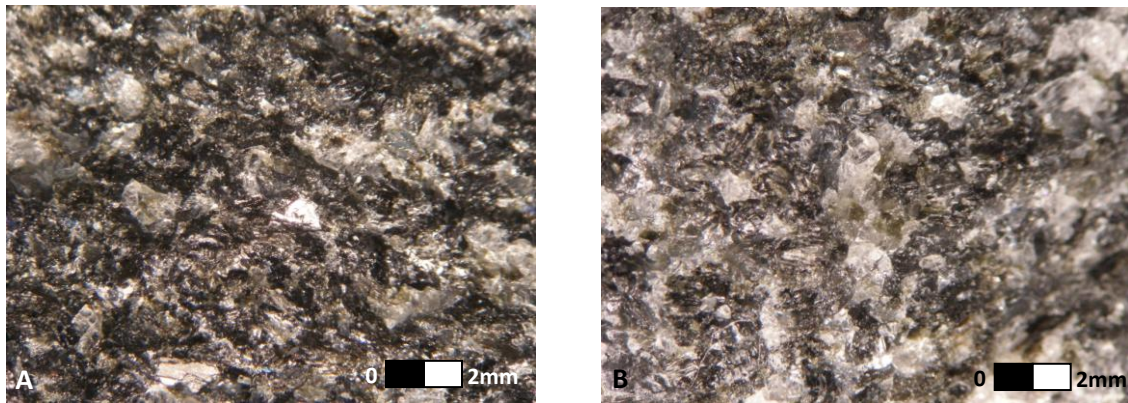


Figura 4.11 - Provetes do Ponto 1 divididos em grupos segundo os critérios referidos

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS GABROS ENSAIADOS

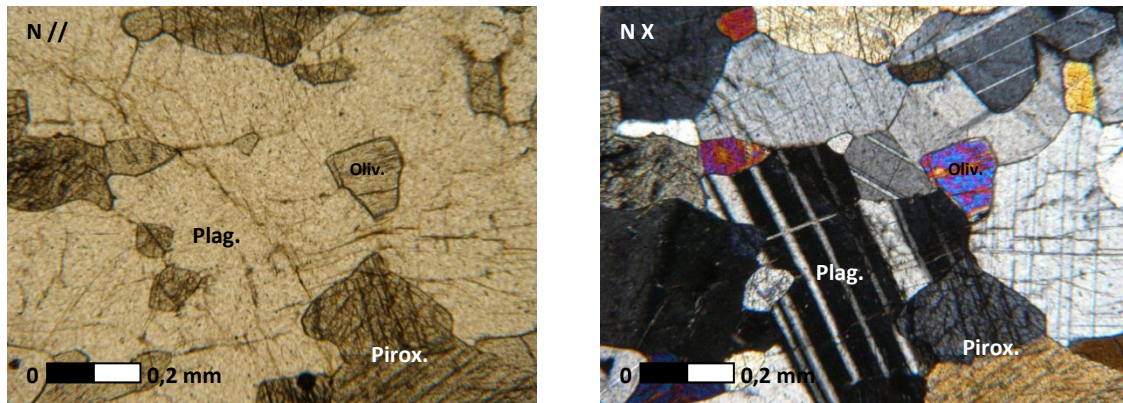
Para além da intensidade de meteorização, os gabros recolhidos nos dois pontos de amostragem apresentavam, em amostra de mão, outras diferenças, ainda que subtis, Figura 4.12. Contudo, essas diferenças acentuaram-se na observação em lâmina delgada ao microscópio, Figuras 4.13 e 4.14 e Tabelas 4.2 e 4.3.

No ponto 4, a rocha apresentava-se com composição mineralógica idêntica à do ponto 1, mas com um grão ligeiramente mais grosseiro, Figura 4.12, e nota-se uma patine de alteração, Figura 4.11.



ponto 1 (A) e ponto 4 (B)

Figura 4.12 - Amostra de mão dos gabros observadas à lupa

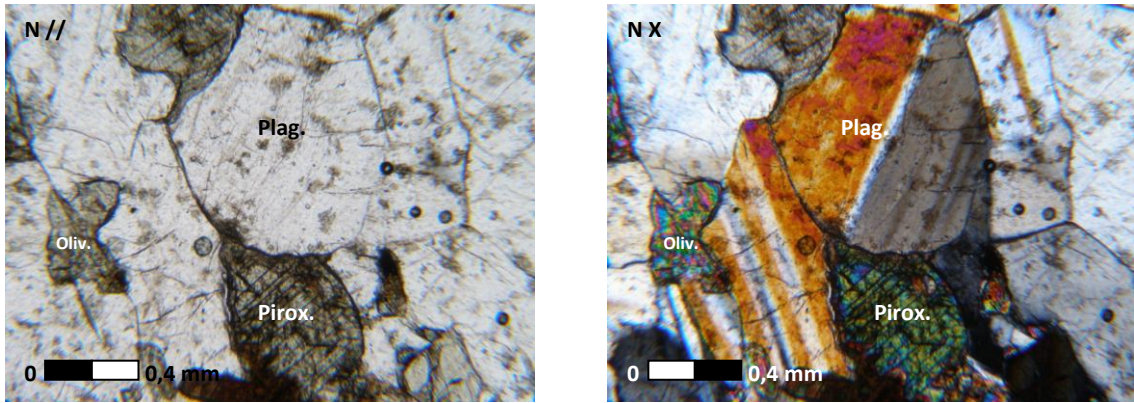


Nicóis paralelos (N//) e cruzados (N X)

Figura 4.13 - Análise micropetrográfica do gabro do ponto 1

Tabela 4.2 - Resumo das principais características mineralógicas e petrográficas do gabro do ponto 1

	Gabro
Descrição macroscópica	Gabro olivínico de cor negra acinzentada, melanocrata, com textura fanerítica de granularidade média, homogénea
Descrição microscópica	Textura holocristalina, hipautomórfica granular
Minerais essenciais	Plagioclase - 67% Piroxena - 23% Olivina - 8%
Minerais acessórios e de alteração	Anfíbola Serpentina 2% Minerais opacos



Nicóis paralelos (N//) e cruzados (N X)

Figura 4.14 - Análise micropetrográfica do gabro do ponto 4

Tabela 4.3 - Resumo das principais características mineralógicas e petrográficas do gabro do ponto 4

	Gabro
Descrição macroscópica	Gabro olivínico de cor negra acinzentada, melanocrata, com textura fanerítica de granularidade média, homogénea
Descrição microscópica	Textura holocristalina, hipautomórfica granular
Minerais essenciais	Plagioclase - 69% Piroxena - 23% Olivina - 6%
Minerais acessórios e de alteração	Anfíbola Serpentina 2% Minerais opacos

4.4 ENSAIOS REALIZADOS

Os ensaios de caracterização física, mecânica e dinâmica em rochas são relevantes para a avaliação de diversas propriedades geotécnicas das rochas, referidas no capítulo 2, assim como para a previsão do seu comportamento em cenários onde as condições *in situ* possam sofrer alterações. Deste modo e com vista à caracterização dos gabros em estudo, realizaram-se diversos tipos de ensaios laboratoriais em rocha intacta.

Para a realização destes ensaios procedeu-se a uma recolha dos *Suggested Methods* da *International Society for Rock Mechanics* (ISRM), das normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e das normas *Rock Testing Handbook* (RTH) do *United States Army Corps of Engineers* (USACE), nomeadamente para os ensaios cujas normas ASTM e ISRM não estavam disponíveis ou não foram possíveis de obter durante a realização deste trabalho. No entanto, quando existiam ambiguidades entre as recomendações da ISRM e as normas ASTM, eram adotadas as recomendações da ISRM de

modo poder proceder à comparação dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais com os resultados consultados na bibliografia.

Apresenta-se em seguida uma breve descrição dos ensaios realizados, bem como do respetivo procedimento seguido.

4.4.1 Teor em água

Nos ensaios de RCU e RTB, as recomendações da ISRM e as normas ASTM especificam que o teor em água deve ser determinado imediatamente após a realização do ensaio, de modo avaliar as condições em que o material se encontra no momento em que é ensaiado, uma vez que o teor em água reflete, de certa forma, como o material se comporta perante diferentes condições ambientais.

O ensaio realizou-se segundo a recomendação para a determinação do teor em água de uma amostra de rocha da ISRM (1977b). No entanto o procedimento foi sujeito a algumas modificações, pois na norma a temperatura da estufa é definida para $110^{\circ}\text{C} \pm 5$, mas para que não ocorressem alterações ao nível mineralógico que pudessem influenciar a retenção de água nos poros, a temperatura daquela foi reduzida para $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}$ (ASTM D 2216, 2005).

O ensaio consiste em pesar a amostra de rocha natural (m_w), com pelo menos 50 g de massa, imediatamente após a rotura do provete no ensaio de resistência, e posteriormente secá-la numa estufa ventilada com temperatura controlada, durante pelo menos 24 horas ou até se atingir massa constante. Após a secagem procede-se ao arrefecimento da amostra em exsiccador, e a nova pesagem, que corresponderá à fração sólida da amostra, sem presença de água nos poros (m_d).

A perda de massa devida à secagem é considerada perda de água e o teor em água é calculado usando os valores de massa dos provetes com água e secos (ASTM, 2009). A diferença de massa entre as duas amostras corresponderá ao teor em água que se apresenta de acordo com a expressão (4.1), sob a forma de percentagem.

$$w = \frac{m_w}{m_d} \times 100 \quad (4.1)$$

onde, w – teor em água [%];

m_w – massa da amostra antes ir à estufa;

m_d – massa da amostra depois da secagem.

4.4.2 Porosidade e peso volúmico

A presença de poros no *fabric* de uma rocha fazem diminuir a sua resistência e aumentar a sua deformabilidade, podendo uma pequena fração de volume de poros produzir um considerável efeito mecânico. A informação relativa à natureza porosa de materiais rochosos é frequentemente omitida em descrições petrológicas, mas é imprescindível se estas descrições forem usadas como referência para desempenhos mecânicos. A grande maioria das rochas apresenta densidade de grãos similar e, conseqüentemente, valores de porosidade e densidade seca bastante correlacionados (ISRM, 1977a). No entanto, estes dois métodos de ensaio são úteis para indicar as diferenças de absorção entre diferentes tipos de rochas ou fornecer um elemento de comparação entre várias rochas do mesmo tipo (ASTM, 2009), como é o caso desta investigação, permitindo a comparação dos vários tipos de gabros em estudo. Rochas que apresentem um valor de densidade baixo são geralmente muito porosas, mas rochas ígneas que foram sujeitas a processos de meteorização também apresentam tipicamente porosidades elevadas (ISRM, 1977a).

Neste ensaio recorreu-se às recomendações da ISRM para a determinação da porosidade/densidade utilizando técnicas de saturação. O objetivo é medir a porosidade, a densidade seca e propriedades relacionadas de uma amostra de rocha de geometria regular (*op. cit.*).

O ensaio, Figura 4.15, inicia-se com a saturação por imersão em água sob vácuo de um provete de rocha, de massa superior a 50g, por um período de pelo menos uma hora. O provete é depois pesado imerso, seguidamente, é seco em estufa a $65^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}$ e posteriormente pesado.



Saturação por imersão em água (esquerda) e pesagem hidrostática (direita)

Figura 4.15 - Ensaio de determinação da porosidade e peso volúmico

As diferenças de massas entre pesagens e após cálculos permitem determinar a porosidade e a massa volúmica da rocha, através das expressões 4.2, 4.3 e 4.4:

$$\rho_a = \frac{m_d}{m_{sat} - m_{sub}} \times \rho_w \quad (4.2)$$

onde, ρ_a – massa volúmica aparente (g/cm^3);

m_d – massa do provete seco (g);

m_{sat} – massa do provete saturado (g);

m_{sub} – massa do provete submerso (g);

ρ_w – massa volúmica da água ($0,998 \text{ g/cm}^3$).

$$\gamma = \rho_a \times g \quad (4.3)$$

onde, γ – peso volúmico (kN/m^3);

ρ_a – massa volúmica aparente (kg/m^3);

g – aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}$).

$$n_0 = \frac{m_{sat} - m_d}{m_{sat} - m_{sub}} \times 100 \quad (4.4)$$

onde, n_0 – porosidade aberta (%);

m_{sub} – massa do provete em pesagem hidrostática.

4.4.3 Velocidade de ultrassons

O ensaio de velocidade de ultra-sons permite medir a velocidade das ondas elásticas longitudinais e transversais, V_p e V_s , ao atravessarem um provete de rocha, seco ou saturado. A velocidade das ondas está relacionada com as características mecânicas do material e a sua porosidade e densidade. A partir delas e como referido no capítulo 2, calculam-se os módulos de deformação elásticos dinâmicos, E_d e ν_d .

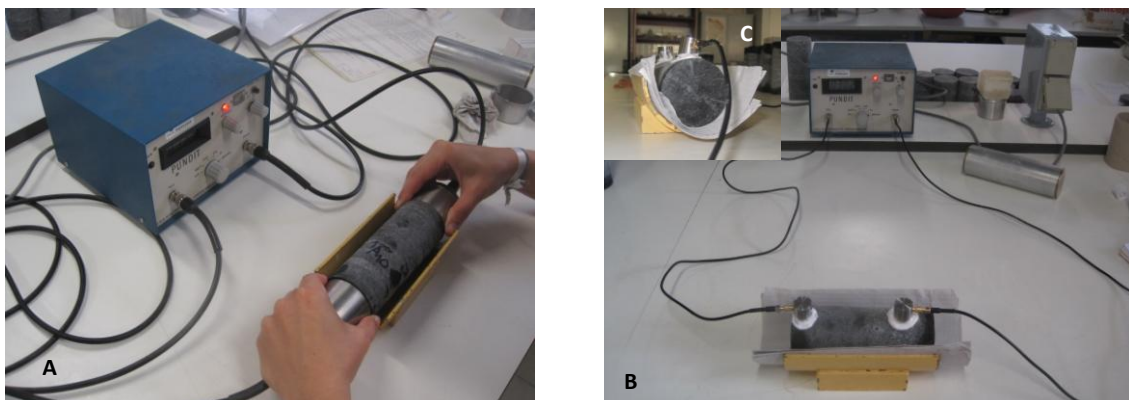
O ensaio consiste em transmitir ondas longitudinais mediante compressão por ultra-sons e medição do tempo que demoram a percorrer o provete de rocha. De igual modo, transmitem-se ondas transversais ou de corte mediante impulsos sónicos e registam-se os tempos de chegada. As

velocidades correspondentes calculam-se em função dos tempos. Num dos extremos do provete fixa-se o transmissor ou gerador de força compressiva e dos impulsos e, no outro, fixa-se o recetor que regista o tempo de chegada das ondas que atravessaram o provete longitudinalmente. Também se pode colocar o recetor na lateral do provete, variando assim a distância a percorrer pelas ondas (adaptado de Vallejo e Ferrer, 2011).

O ensaio foi conduzido segundo a recomendação da ISRM (1978b) e a norma ASTM D2845 (2008), e ambas referem que a dimensão lateral mínima, normal à direção de propagação da onda, não deve ser inferior a 10 vezes o comprimento de onda e a distância a percorrer pelo impulso através da rocha deve ser pelo menos 10 vezes o tamanho médio dos grãos. Deste modo, o ensaio foi realizado nos provetes preparados para o ensaio RCU.

O equipamento utilizado para este ensaio foi o *Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indication Tester* (PUNDIT), da empresa C. N. S. *Electronica*, com transdutores de 54 kHz e 5cm de diâmetro na medição da velocidade propagação das ondas longitudinais (V_p) e transdutores de 54 kHz e 1,75 cm de diâmetro na determinação da velocidade das ondas transversais (V_s).

Na determinação da velocidade de propagação das ondas longitudinais (V_p), os transdutores foram colocados nos topos dos cilindros de rocha, tendo sido utilizada vaselina em forma de gel, como agente de ligação; fizeram-se três medições. No caso da determinação das ondas transversais (V_s), os transdutores foram colocados paralelamente, tendo sido efetuadas três medições, separadas cerca de 60° entre si, Figura 4.16C, e o agente de ligação utilizado foi pasta de dentes, por permitir uma maior aderência dos transdutores ao provete.



Longitudinais (A) e transversais (B)

Figura 4.16 - Aparato para a medição das velocidades das ondas acústicas

O módulo de elasticidade e o coeficiente de *Poisson* dinâmicos foram obtidos, respetivamente, segundo as expressões (2.5) e (2.6) apresentadas no capítulo 2.

4.4.4 Dureza ao ressalto

O Martelo de Schmidt proporciona um modo expedito de classificação da dureza ao ressalto de rochas para caracterizações *in situ* em engenharia, para fins de construção civil, na cartografia geotécnica de grandes escavações subterrâneas ou no registo da descrição física de tarolos de rocha. O ensaio pode ser utilizado em laboratório ou no campo permitindo, de forma rápida, estimar a dureza da rocha ou indicar um valor para ela. O número de ressalto, R_L , tem em engenharia múltiplas aplicações que requerem a caracterização do material rochoso como, por exemplo, a previsão da taxa de avanço de tuneladoras, a quantificação da qualidade da rocha para fins de construtivos ou ainda a previsão da erodibilidade hidráulica de rochas.

O ensaio tem aplicação limitada em rochas brandas ou muito duras, respetivamente com resistências à compressão uniaxial inferior a 2MPa ou superior a 100MPa (adaptado de ASTM, 2005).

O espigão do martelo é encostado à rocha e é empurrado para o seu interior pressionando-o contra ela. É armazenada energia numa mola que é automaticamente libertada provocando o impacto de uma massa contra um êmbolo. A altura do ressalto dessa massa é medida numa escala e registada a medida da dureza (ISRM, 1978a).

Existem vários tipos de Martelo de Schmidt mas para a avaliação pretendida neste trabalho, foi utilizado o martelo do tipo L, com energia de impacto de 0,74 Nm, o martelo disponível em laboratório, mas também o recomendado pela ISRM (1978a), por ser o mais adequado para o uso em rochas (Price, 2009).

O ensaio foi realizado segundo as recomendações da ISRM (1978a) já com as recentes revisões (Aydin e Basu, 2009) e a norma ASTM D 5873 (2005).

Antes de se iniciar as medições em rocha, o martelo de Schmidt foi calibrado numa peça metálica, fornecida pelo fabricante para esse efeito, calculando-se, seguidamente, a média das 10 leituras de calibração.

As amostras devem estar isentas de fendas e fissuras, ser petrograficamente homogéneas e representativas do domínio do maciço rochoso, caracterizando-o, devendo as superfícies de ensaio apresentarem-se lisas e livres de poeiras e partículas, pelo que deve ser tratada antes do ensaio removendo-se a patine de meteorização. Para este efeito, pode-se proceder ao polimento das superfícies mais ásperas com uma pedra abrasiva que normalmente é fornecida com o instrumento.

Os blocos de rocha ensaiados no laboratório, Figura 4.17, foram colocados numa superfície amortecedora que impedia vibrações ou movimentação do bloco durante a medição, com o martelo normal à superfície de ensaio e posicionado com o espigão para baixo. Foram efetuadas pelo menos 20 medições por superfície, por bloco ensaiado, sendo as medições separadas umas das outras por pelo menos o diâmetro do espigão.



Figura 4.17 - Medição da dureza ao ressalto com o martelo de Schmidt

O número de ressalto (R_L) é correlacionado com a RCU, estabelecendo-se uma função de relação entre os dois, através dos resultados obtidos com o martelo de Schmidt e do ensaio RCU.

4.4.5 Resistência à tração indireta

Por definição, a resistência à tração (σ_t) obtém-se pelo ensaio de resistência à tração uniaxial, direto. No entanto este ensaio é difícil de realizar devido à dificuldade na montagem dos provetes, para além de dispendioso como ensaio de rotina. Neste contexto e como alternativa recorre-se, geralmente, ao ensaio de resistência à tração indireto, vulgarmente conhecido como ensaio de resistência à tração brasileiro, RTB, uma vez que se trata de um ensaio mais simples e económico. Além disso, especialistas envolvidos na conceção em mecânica das rochas geralmente lidam com complicados campos de tensão, incluindo várias combinações de campos de tensão de compressão e de tração e, nestas condições, a resistência à tração deve ser obtida na presença de tensões de compressão para que as condições de campo sejam comparáveis.

O ensaio de resistência à tração indireto é um dos ensaios mais simples para este tipo de campo de tensões. Como na prática é amplamente usado, é necessário um método de ensaio uniforme que

viabilize a comparação dos resultados, assim como para garantir que a rotura do provete ocorre diametralmente devido à ação da tração, ao longo do diâmetro de carga (ASTM, 2008).

O ensaio consiste em medir a resistência à tração de um provete de rocha, assumindo que a rotura se produz por tração quando a rocha se submete a um campo de forças biaxial, com uma ação principal tracional e outra compressiva de magnitude não superior a três vezes à tracional. Aplica-se uma carga vertical compressiva sobre um disco ou cilindro de rocha, situada horizontalmente entre duas placas através das quais se transmite solicitações compressivas (Figura 4.18), até se atingir a rotura. Podem-se usar placas planas ou esféricas, concavas, para transmitir as ações, que deverão ser perfeitamente paralelas.

A carga compressiva produz uma complexa distribuição de esforços no provete, obtendo-se a resistência à tração através da equação (Vallejo e Ferrer, 2011):

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi t D} \quad (4.5)$$

onde, P – carga que se produz na rotura (N);

D – diâmetro do provete (mm);

t – espessura do provete (mm).



Figura 4.18 - Provete montado na prensa para o ensaio de RTB

Para este ensaio seguiram-se as recomendações da ISRM (1978c) e da norma ASTM D3967 (2008) Os provetes devem ter a forma de um disco circular com uma relação espessura/diâmetro (t/D) entre 0,2-0,75 (ASTM, *op. cit.*) ou segundo uma espessura aproximadamente igual ao raio do provete

(ISRM, *op. cit.*), devendo o diâmetro ser pelo menos 10 vezes maior do que o maior mineral constituinte da rocha.

Um tarolo de diâmetro NX (54mm) é geralmente satisfatório para a norma ASTM (*op. cit.*), mas é considerado o diâmetro mínimo aceitável segundo a ISRM (*op. cit.*) e é recomendado que se ensaiem pelo menos 10 provetes para se obter um valor médio significativo.

Na aplicação da carga ao provete existe uma discórdia entre a norma ASTM (*op. cit.*), e as recomendações da ISRM (*op. cit.*), pois na primeira o acréscimo de carga é mais lento (0,05 – 0,35 MPa/s) devendo-se obter a rotura entre 1 a 10 minutos, em função do tipo de rocha, em oposição à outra onde se atinge, em 15 a 30 segundos, para uma carga aplicada recomendada de 200 N/s. No entanto, a norma americana afirma que, com aqueles intervalos de aplicação de cargas se evita o efeito de carga rápida, sendo o motivo porque se adotou esta última.

4.4.6 Resistência à compressão uniaxial e deformabilidade

O ensaio de resistência à compressão uniaxial, RCU, permite determinar laboratorialmente a resistência não confinada ($\sigma_1 \neq 0$; $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) da rocha (σ_c) e as suas constantes elásticas: o módulo de *Young* (E) e o coeficiente de *Poisson* (ν). É um ensaio índice para a classificação da rocha quanto à sua resistência e para a determinação da sua deformabilidade sobre provetes (Vallejo e Ferrer, 2011).

A resistência à compressão é calculada dividindo a carga máxima suportada pelo provete durante o ensaio, pela área da secção transversal à aplicação da força (equação 2.7).

Em máquinas de ensaio convencionais, a variável de controlo é a força, cuja magnitude e velocidade de aplicação podem ser controladas. As deformações que se vão produzindo no provete são medidas mediante sensores ou bandas extensométricas, também designados como extensómetros. Para determinação das deformações axiais, Figura 4.19, devem-se colocar dois extensómetros na vertical, a meia altura do provete, diametralmente opostos. Na determinação de deformações radiais, devem-se usar dois extensómetros colocados horizontalmente, a meia altura do provete, diametralmente opostos.

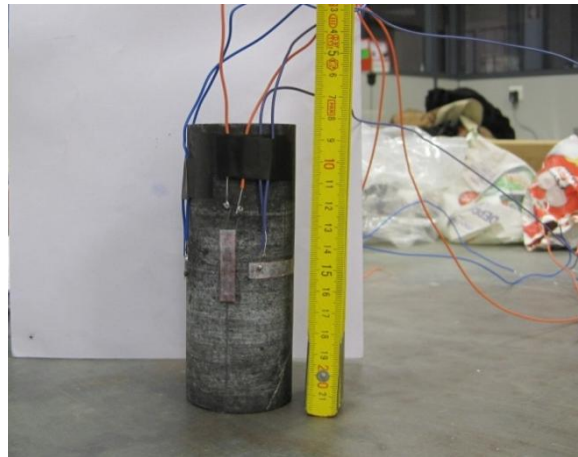


Figura 4.19 - Disposição da colagem dos extensómetros nos provetes de RCU

Durante o ensaio registam-se as curvas tensão-extensão axial, $\sigma_c - \epsilon_{ax}$, e podem, igualmente, medir-se as respetivas extensões radiais (ou transversais), obtendo-se a curva $\sigma - \epsilon_r$ (adaptado de Vallejo e Ferrer, 2011). Destas curvas, Figura 4.20, obtêm-se o módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (ν), segundo as expressões (2.10) e (2.11).

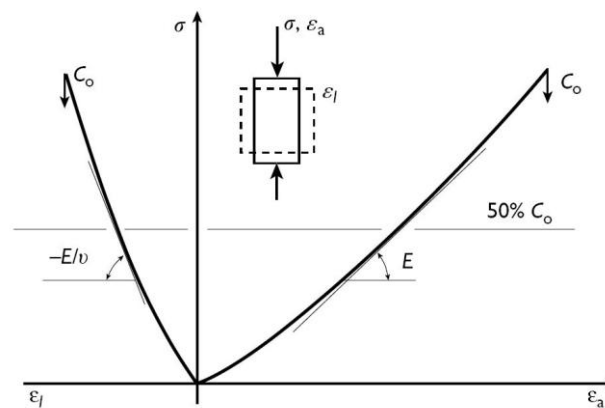
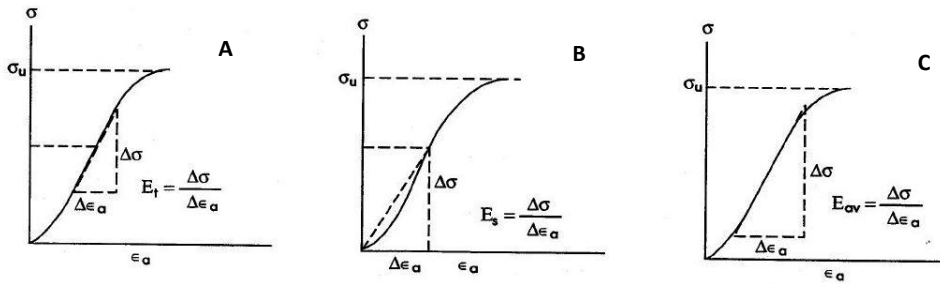


Figura 4.20 - Curva tensão-deformação (Pariseau, 2006)

O módulo de Young pode ser obtido segundo vários métodos, sendo os mais comuns (ISRM, 1979):

- Módulo de elasticidade tangente, obtido geralmente através de uma reta tangente num intervalo que ronda o valor a 50% da tensão máxima, no ramo elástico da curva $\sigma_c - \epsilon_{ax}$ (Figura 4.21 A);
- Módulo de elasticidade secante, usualmente medido desde a origem da curva $\sigma_c - \epsilon_{ax}$ até um valor fixo de resistência, geralmente a 50% (Figura 4.21 B);
- Módulo de elasticidade médio, determinado dos intervalos médios do ramo elástico da curva $\sigma_c - \epsilon_{ax}$ (Figura 4.21 C).



Tangente (A), secante (B) e médio (C)

Figura 4.21 - Determinação gráfica dos módulos de elasticidade (Mayne *et al.*, 2002)

Os ensaios foram conduzidos seguindo as recomendações da ISRM (1979) e a norma ASTM D7012 (2007). O ensaio foi realizado pelo menos 5 vezes para a caracterização da matriz rochosa, pelo que foram ensaiados 7 provetes, por grupo de amostragem, desprezando-se os valores extremos de resistência à compressão. A máquina utilizada, C109N CYBER-PLUS Evolution da MATEST, pertencente à empresa BETOTESTE, era servo-controlada e tinha dispositivo para garantir a centragem dos provetes.

Este ensaio realiza-se sobre provetes de rocha de forma regulares aos quais se aplicam gradualmente, forças axiais até que atinjam a rotura. Estes devem ser preferencialmente cilíndricos e apresentar uma relação comprimento/diâmetro (L/D) entre 2 - 3, considerando a norma ASTM (2007) e as recomendações da ISRM (1979), o diâmetro mínimo deve ser de 47 mm segundo ASTM ou de 54 mm (NX) de acordo com ISRM, devendo ser pelo menos 10 vezes maior que o tamanho médio do maior grão da rocha. As bases do provete devem ser planas e paralelas e perpendiculares ao eixo do cilindro. Os provetes foram dimensionados de modo a que o ensaio pudesse ser aceite por qualquer uma das normas supracitadas.

Os ensaios de RCU podem ser influenciados, tanto pelos fatores referentes à natureza e condição da rocha, como as condições em que o ensaio foi realizado. No âmbito destes últimos os mais importantes são os seguintes (adaptado de Vallejo e Ferrer, 2011):

- a) Forma e volume do provete – a distribuição das ações aplicadas varia com a geometria do provete devendo-se esta variação principalmente ao atrito entre o provete e o prato da prensa que aplica as cargas. A resistência à compressão diminui com o aumento de volume do provete;

- b) Preparação e corte do provete – O efeito de concavidade que normalmente aparece no início da curva tensão-deformação pode ser consideravelmente reduzido se as bases do provete estiverem adequadamente paralelas;
- c) Direção de aplicação da carga (em rochas anisótropas) – como referido (secção 2.4.1), a resistência da rocha varia em função do ângulo da ação aplicada. Um provete de rocha intacta com superfícies de fracturação, xistosidade ou gnaissosidade, apresenta a sua resistência mínima quando o ângulo que o carregamento faz com aqueles planos de anisotropia oscila entre 30° e 45°, em média; inversamente, a resistência é máxima para valores de ângulo de aplicação da força com aqueles planos próximos de 0° ou 90°;
- d) Velocidade de aplicação da carga – a ISRM (*op. cit.*) recomenda intervalos de carga entre 0,5 a 1MPa/s, que corresponde a cerca de 5 -10 minutos até se atingir a resistência de pico. Uma aplicação rápida pode produzir roturas violentas e uma sobrevalorização da resistência do material.

5 RESULTADOS OBTIDOS E SUA DISCUSSÃO

Apresenta-se, seguidamente, a síntese dos resultados obtidos nos diversos ensaios de laboratório efetuados de acordo com os procedimentos introduzidos na secção 4.4, e tecem-se breves comentários aos valores obtidos, face à litologia ensaiada – gabros maioritariamente são (W_1) e, no caso do grupo 2 do ponto 4, pouco alterados (W_2) e com fraturas fechadas. Os resultados de cada provete ou bloco de amostra ensaiados integram os anexos a este documento, designados de 2 a 6. Finalmente, avançam-se algumas correlações, para algumas propriedades índice.

5.1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

5.1.1 Características físicas

Conforme referido no capítulo 3, os ensaios não destrutivos realizados avaliaram quer características intrínsecas do gabro, tais como porosidade, peso volúmico e dureza ao resalto, quer dinâmicas, como a velocidade de propagação de ultra-sons.

5.1.1.1 Porosidade e peso volúmico

Nestes ensaios envolveram-se cerca de 40 provetes, tendo-se obtido os resultados finais sintetizados na Tabela 5.1. Todos os resultados discriminados por cada provete, incluem o Anexo 2.

Tabela 5.1 - Resumo dos resultados dos ensaios de porosidade e massa volúmica efetuados nos quatro grupos de amostras ensaiados

Ponto	Grupo	Peso volúmico aparente - γ (kN/m^3)				Porosidade eficaz - n_e (%)			
		mínimo	máximo	médio	desvio padrão	mínimo	máximo	médio	desvio padrão
1	1	29	29	29	0,1	0,1	0,2	0,1	0,04
	2	28	29	29	0,1	0,0	0,4	0,2	0,10
4	1	28	30	29	0,6	0,1	0,3	0,2	0,10
	2	28	29	29	0,2	0,3	0,7	0,5	0,15

Os valores obtidos permitem verificar que, como seria de esperar, Tabela 2.4, os gabros ensaiados são rochas com pesos volúmcicos elevados (29 kN/m^3) e, como tal, têm uma porosidade eficaz muito baixa (média de 0,1-0,2% para rocha sã); mesmo em rochas com fraturas, embora fechadas e ligeiramente alteradas (W_2), a porosidade atinge o valor máximo de 0,7% (grupo 2 do ponto 4), o que está de acordo com a bibliografia, Tabela 2.3.

5.1.1.2 Dureza ao ressalto

Efetuar-se em laboratório cerca de 120 medições com o esclerómetro do tipo L, 20 por cada um dos seis blocos de rocha recolhidos. Destes, três provieram de cada um dos pontos de amostragem de gabros a poente de Beja. Os resultados finais encontram-se resumidos na Tabela 5.2.

Todas as medições realizadas, bem como o tratamento a que foram submetidas estão no Anexo 3.

Tabela 5.2 - Resumo dos resultados das medições para avaliar a dureza ao ressalto em seis blocos de gabro.

Blocos	Dureza ao ressalto (R_L)			
	máximo	mínimo	média	desvio padrão
1A	59	53	56	1,66
1B	59	50	54	2,78
1D	62	47	54	3,35
4C a	69	59	63	4,71
4C b	67	54	59	3,35
4D	68	46	61	5,42

A análise, efetuada de acordo com a nova revisão das recomendações da ISRM (Aydin e Basu, 2009), confere tratar-se de uma rocha muito densa, uma vez que a média de medições para a dureza ao ressalto é no mínimo de 54, o que faz antever tratar-se de uma rocha de resistência elevada.

5.1.2 Características dinâmicas

Os ensaios de ultrassons efetuados sobre um conjunto de 35 provetes cilíndricos com dimensões de acordo com as normas adotadas (secção 4.4.3), permitiram avaliar, para o grupo de amostras seleccionados, a velocidade média das ondas P e S, Tabela 5.3. Com base nesses valores determinaram-se os módulos de elasticidade e os coeficientes de Poisson dinâmicos, Tabela 5.4.

Todos os resultados obtidos integram o Anexo 4.

Tabela 5.3 - Resumo dos resultados dos ensaios para determinação das ondas acústicas P e S em gabros no laboratório

Ponto	Grupo	Velocidade das ondas P - V_p (m/s)				Velocidade das ondas S - V_s (m/s)			
		mínimo	máximo	médio	desvio padrão	mínimo	máximo	médio	desvio padrão
1	1	6770	7010	6920	80	4050	4190	4140	55
	2 (húmido)	6640	6950	6870	106	3960	4410	4260	143
	3	6660	7010	6860	117	4110	4220	4180	37
4	1	6670	6900	6770	75	3890	4390	4150	165
	2	6230	6860	6540	232	3940	4270	4110	131

Os valores médios obtidos nas medições das velocidades de propagação de ultrassons certificam os achados nos ensaios de porosidade e pesos volúmicos, uma vez que os elevados valores de velocidades quer para as ondas P, Tabela 2.5, acima de 6620 m.s^{-1} , quer para as S, superiores a 4110 m.s^{-1} , confirmam a elevada densidade e baixa porosidade. Aliás, no caso da segunda, verifica-se que a diferença entre os valores médios medidos em provetes húmidos (grupo 2 do bloco 1) e os restantes grupos que estavam secos não é significativo devido à muito baixa porosidade eficaz.

Tabela 5.4 - Resumo dos resultados calculados para os parâmetros elásticos dinâmicos

Ponto	Grupo	Coeficiente de Poisson dinâmico – ν				Módulo de Young dinâmico - E_d (GPa)			
		mínimo	máximo	médio	desvio padrão	mínimo	máximo	médio	desvio padrão
1	1	0,15	0,20	0,17	0,02	119	125	122	2
	2	0,11	0,18	0,14	0,02	111	130	125	6
	3	0,13	0,17	0,16	0,01	118	124	122	3
4	1	0,09	0,22	0,15	0,04	112	128	120	6
	2	0,06	0,18	0,13	0,05	111	128	116	6

Como seria de esperar, os parâmetros elásticos dinâmicos calculados com os valores médios das ondas P e S (Tabela 5.4) de acordo com as equações apresentadas na secção 4.4.3, confirmam estarmos perante um material rocha de muito boa qualidade, face aos baixos valores médios do coeficiente de Poisson (0,13 e 0,17) e os elevados valores médios do módulo de Young, que oscilou entre 116 e 125 GPa. Estes valores são superiores aos encontrados nos ensaios mecânicos e apresentados mais adiante.

5.2 ENSAIOS DESTRUTIVOS

Todos estes ensaios referem-se à determinação de propriedades mecânicas, cujos resultados se mostram e interpretam de seguida.

5.2.1 Resistência à tração brasileiro

As dimensões de todos os provetes e os correspondentes resultados obtidos nos ensaios de RTB efetuados de acordo com o escrito na secção 4.4.4 encontram-se no Anexo 5.

A Tabela 5.5 mostra uma síntese dos resultados obtidos para os quatro grupos de provetes ensaiados, metade proveniente de cada ponto amostrado.

Tabela 5.5 - Resumo dos resultados obtidos na resistência à tração brasileiro

Ponto	Grupo	Resistência à tração - σ_t (MPa)				Teor em água - ω (%)			
		mínimo	máximo	médio	desvio padrão	mínimo	máximo	médio	desvio padrão
1	1	14	21	17	2,23	0,0003	0,0009	0,00	0,00
	2	13	25	17	3,35	0,0003	0,0045		
4	1	11	21	16	2,72	0	0,0005		
	2	13	24	17	3,25	0,0003	0,0003		

Os valores médios dos 40 provetes ensaiados estão todos de acordo com os valores que seria de esperar para uma rocha intacta de elevada densidade e porosidade baixa, oscilando entre 16 e 17 MPa, verificando-se que os materiais tinham, naturalmente, um resíduo de água nos seus poucos poros, podendo portanto considerar-se como secos. Acresce que estes valores são ligeiramente superiores aos poucos que existem na bibliografia para gabros e referidos na secção 4.4.4.

5.2.2 Resistência à compressão uniaxial

Os ensaios para avaliar a resistência à compressão uniaxial dos gabros amostrados envolveram um total de 21 provetes cilíndricos com dimensões de acordo com as normas descritas na secção 4.4.5. Os valores médios obtidos para os três grupos de amostras seleccionados incluem a Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Resumo dos resultados da RCU em gabros

Ponto	Grupo	Resistência à compressão uniaxial - σ_c (MPa)				Teor em água - ω (%)			
		Mínimo	Máximo	Médio	Desvio padrão	Mínimo	Máximo	Médio	Desvio padrão
1	1	105	211	166	37,06	0,0003	0,0006	0,00	0,00
4	1	69	181	132	40,09	0,0006	0,0025		
	2	27	154	98	49,32	0,0006	0,0019		

No Anexo 6 encontram-se todos os resultados dos ensaios realizados, bem como as respetivas curvas tensão-extensão. Estas últimas foram traçadas apenas com base em 250 das cerca de 6000 leituras que o equipamento utilizado registou durante os ensaios, uma vez que o EXCEL da Microsoft® possui como limitação para o traçado de gráficos o número total de 250 pontos.

Como seria de esperar face aos resultados mencionados anteriormente, verificou-se neste ensaio a confirmação de que os gabros ensaiados possuíam uma resistência elevada, Figura 2.2 e Tabela 2.1, uma vez que os valores médios obtidos oscilaram entre:

- 97 MPa, para o grupo de qualidade mais 'fraca' ensaiada, ou seja os provetes do grupo 2 do ponto 4, pouco alterados (W_2) e com fraturas fechadas, e
- 167 MPa, para o grupo de melhor qualidade obtido a partir de blocos do ponto 1.

5.2.3 Deformabilidade

Com base nas curvas tensão-extensão, Figuras 5.1, 5.2, 5.3, e nos respetivos conjuntos de seis, sete e quatro provetes respetivamente, e de acordo e de acordo com o descrito no capítulo 4, determinaram-se os valores médios dos módulos de elasticidade e os respetivos coeficientes de Poisson, Tabelas 5.7 e 5.8, respetivamente.

Tabela 5.7 - Resumo dos cálculos para determinação dos módulos de elasticidade estático dos gabros

Ponto	Grupo	Módulo de elasticidade secante – E_{sec} (GPa)				Módulo de elasticidade tangente – E_{tg} (GPa)			
		mínimo	máximo	médio	desvio padrão	mínimo	máximo	médio	desvio padrão
1	1	78	114	95	17	79	143	113	21
4	1	49	146	95	33	54	125	94	26
	2	90	145	122	25	85	278	151	87

Tabela 5.8 - Resumo dos cálculos para determinação do coeficiente de Poisson estático e da relação entre o módulo de deformabilidade e o valor médio de RCU

Ponto	Grupo	Coeficiente de Poisson – ν				E_{tg}/σ_c			
		mínimo	máximo	médio	desvio padrão	mínimo	máximo	médio	desvio padrão
1	1	0,16	0,29	0,22	0,05	476	860	677	125
4	1	0,10	0,35	0,23	0,08	411	950	710	195
	2	0,11	0,44	0,32	0,14	873	2860	1552	894

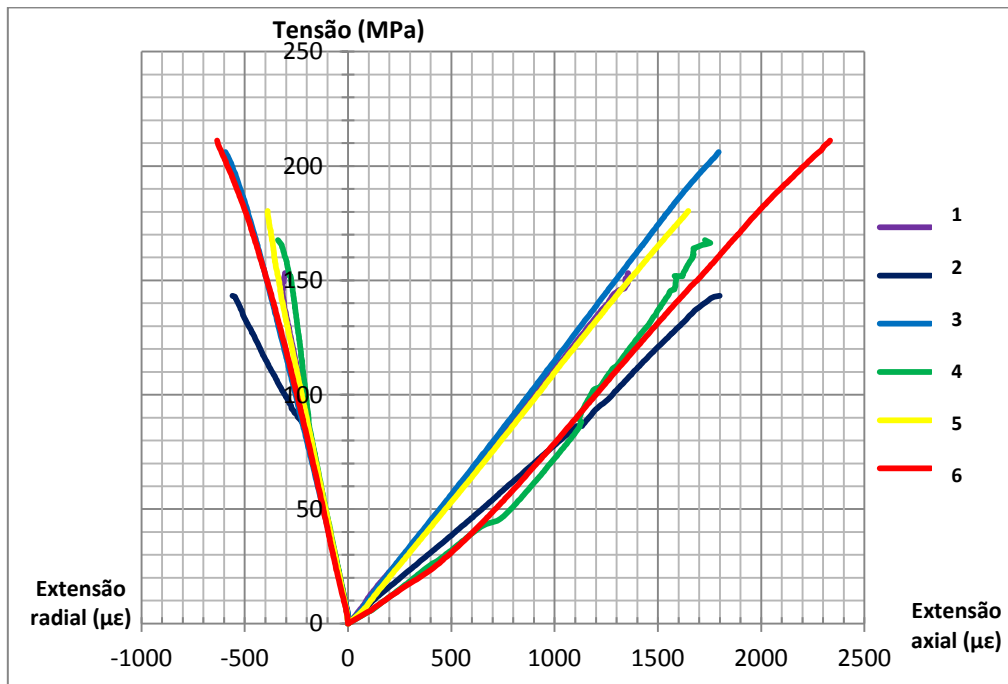


Figura 5.1 - Curvas tensão-extensão dos provetes do ponto 1 - grupo1, obtidas do ensaio RCU

Os cálculos efetuados para os 17 provetes acompanham os respetivos resultados dos ensaios RCU incluídos no Anexo 6. Desprezaram-se quatro curvas tensão-extensão de ensaios realizados em provetes provenientes do ponto 4 (Anexo 6), na medida em que a presença de microfaturas nesses provetes adulterou o comportamento elástico que seria de esperar ao longo dos ensaios e que, por isso, levou a que fossem descartados.

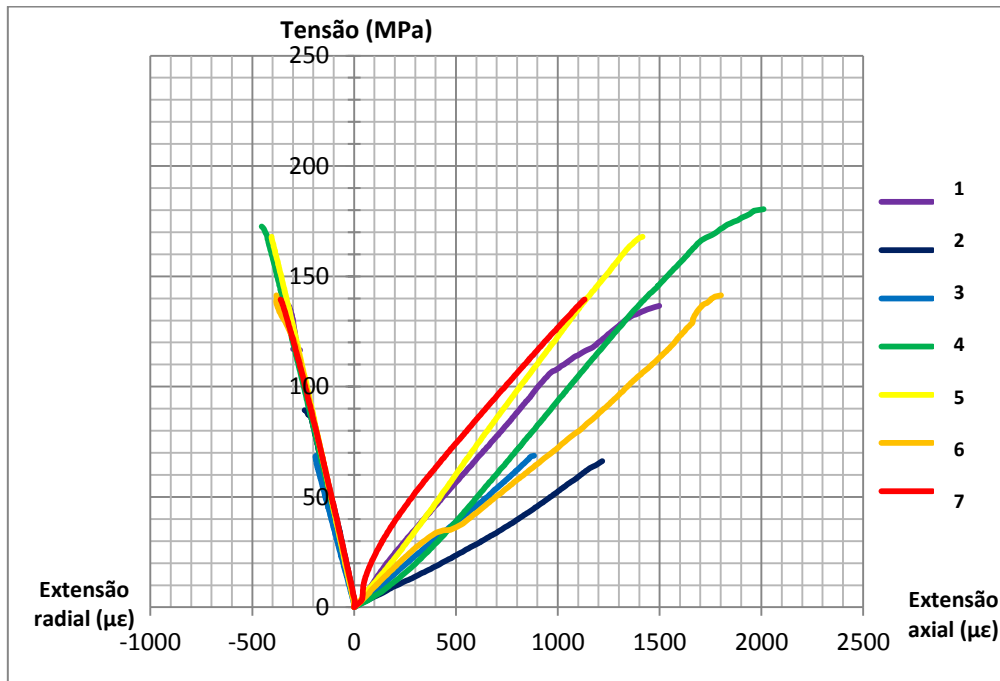


Figura 5.2 - Curvas tensão-extensão dos provetes do ponto 4 - grupo 1, obtida do ensaio RCU

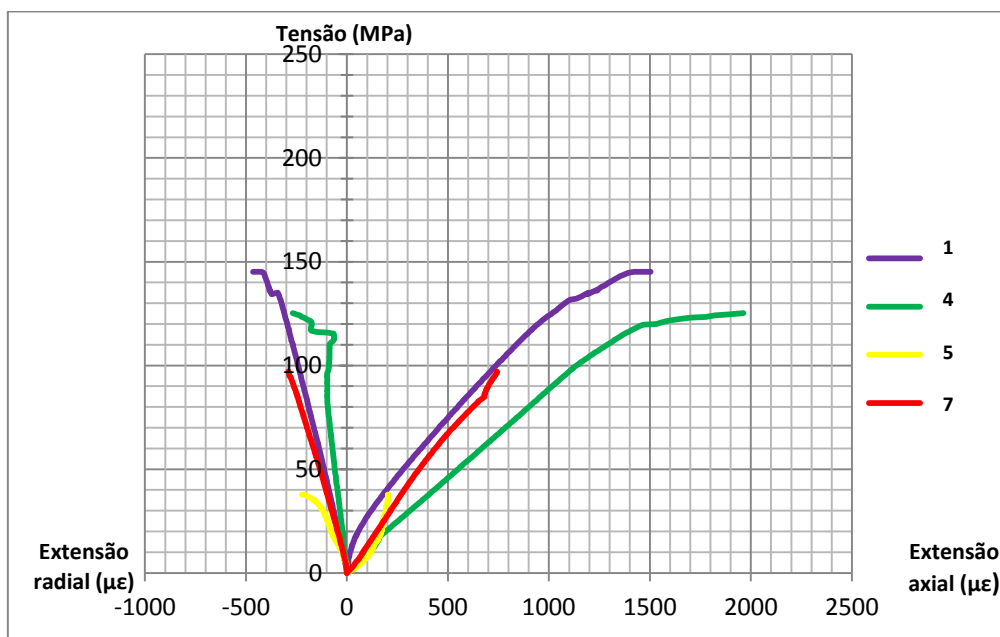


Figura 5.3 - Curvas tensão-extensão dos provetes do ponto 4 - grupo 2, obtida do ensaio RCU

A análise da Figura 5.1 e a sua comparação com as duas seguintes, permite verificar uma gradual diminuição do comportamento francamente frágil dos provetes com resistências mais elevadas (grupo 1 - bloco 1), para um comportamento semi-frágil nos provetes 1 e 4 do grupo 2 do ponto 4, Figura 5.3.

De qualquer maneira e para qualquer uma das curvas tensão-extensão representadas, é nítida a existência de um trecho perfeitamente elástico que, na Figura 5.1, se prolonga praticamente até à rotura, ao contrário do que acontece nalguns provetes, Figuras 5.2 e 5.3, onde se distingue uma tensão de cedência.

No geral, os valores médios calculados a partir dos ensaios mecânicos realizados, quer para o módulo de elasticidade (94 a 151GPa), quer para o coeficiente de Poisson (0,22 e 0,32), são em regra inferiores aos obtidos para os valores homólogos dinâmicos, apresentados na secção 5.1.2, o que está de acordo com o que seria de esperar. Contudo, registam-se valores que se consideram anormais para o tipo de rocha ensaiada, que se pretende intacta e sã.

O valor médio do módulo de elasticidade obtido para o grupo 2 do ponto 4, o grupo dos provetes com a presença de descontinuidades fechadas, é muito elevado para este grupo de provete. O valor em questão corresponde ao provete 5, do grupo 2 do ponto 4, que apresentou um E_{sec} de 115 GPa e um E_{tg} de 278 GPa. Neste caso os valores de E_{tg} e de E_{sec} sobrevalorizam o desempenho do provete durante o ensaio, tendo em conta o valor da resistência à compressão do mesmo, que foi o mais baixo de todos os provetes ensaiados cujos dados estão apresentados neste capítulo.

Em última análise, ainda que do ensaio tenha resultado uma curva tensão-extensão passível de ser analisada, estes resultados deveriam ser ignorados uma vez que não representam o comportamento típico da rocha da rocha intacta.

Estas imperfeições nos provetes ditos de rocha intacta, acarretam imprecisões nos valores dos módulos de elasticidade, Figura 5.4. Estas introduzem anomalias na relação dos valores dos módulos E_{tg} e de E_{sec} quer entre si, quer com o seu homólogo dinâmico. Seria de esperar que o valor de E_{tg} fosse sempre o mais próximo do E_d , uma vez que se trata de uma rocha de resistência elevada, com porosidade muito baixa e peso volúmico elevado. Contudo, tal não acontece em seis dos provetes do ponto 4, certamente devido ao facto dos respetivos provetes apresentarem fissura, que originaram um afastamento do comportamento frágil e, portanto, esses valores anómalos. Para além disso, não é de excluir que os extensómetros possam ter sido afetados durante o ensaio.

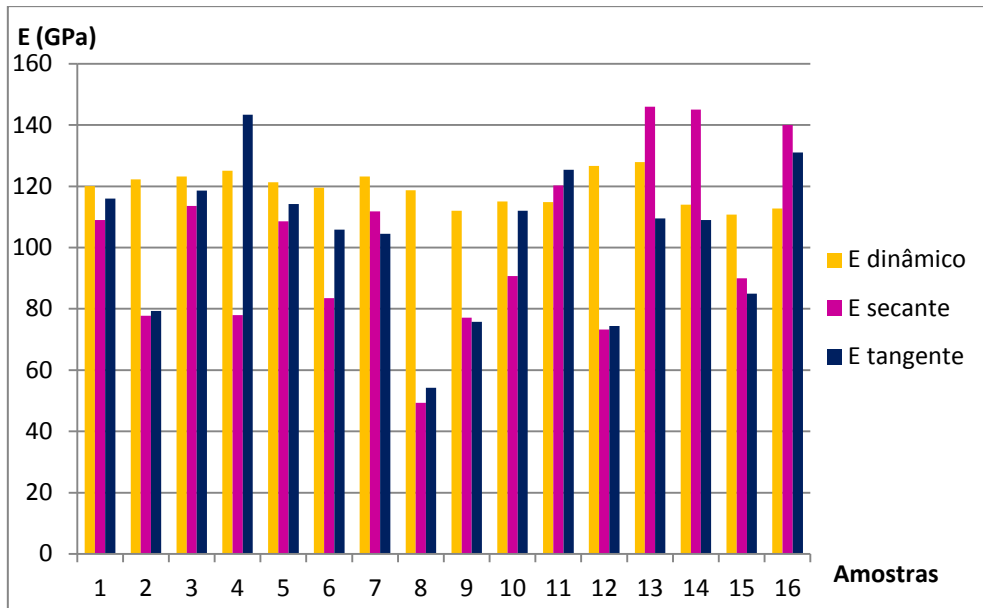


Figura 5.4 - Comparação direta entre módulos de elasticidade dinâmicos e estáticos

Salienta-se, para o coeficiente de Poisson, a existência de um valor de 0,44, que se considera elevado face à RCU exibida por estes gabros. Tal resulta certamente do facto do provete para o qual foi avaliado, ter uma curva tensão-extensão semi-frágil, devido à presença de fissuras, se bem que fechadas.

Na análise da Figura 5.5, verifica-se que, de um modo geral, os valores dos coeficientes de Poisson dinâmicos são superiores aos coeficientes de Poisson estáticos. No entanto, segundo bibliografia, os valores dinâmicos deveriam apresentar-se superiores em cerca de 25%, relativamente aos valores estáticos, e tal não se verificou. Deve-se realçar que dois desses valores estáticos, correspondentes a provetes do ponto 4, provete 7 (0,37) do grupo 2 e provete 7 (0,35) do grupo 1, que se destacam por serem consideravelmente superiores aos restantes. Trata-se de provetes que romperam no ensaio de RCU ao longo de uma superfície de descontinuidade já existente, como se pode confirmar no Anexo 6, influenciando os valores das constantes elásticas, desajustados relativamente aos restantes.

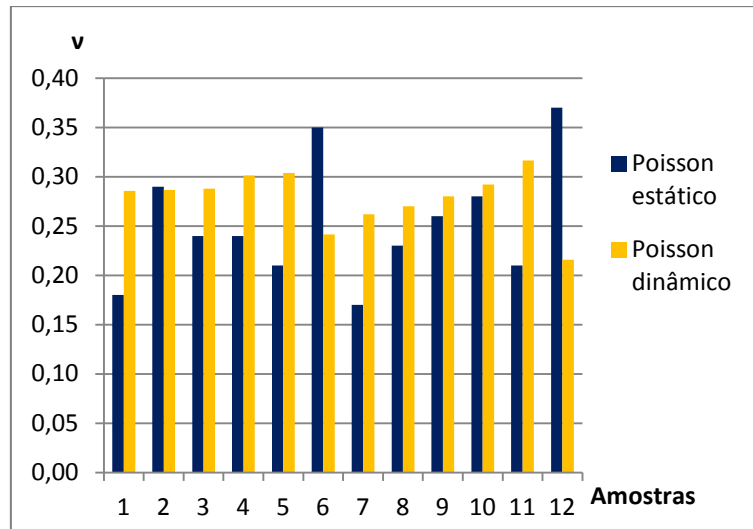


Figura 5.5 - Comparação direta entre coeficientes de Poisson dinâmicos e estáticos

5.3 CORRELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES ÍNDICE

Neste secção analisam-se para os ensaios efetuados algumas correlações que habitualmente se apresentam na bibliografia da especialidade entre as propriedades índice de rochas intactas, tais como entre os valores de:

- Porosidade e resistência à compressão uniaxial;
- Peso volúmico e resistência à compressão uniaxial;
- Dureza ao resalto e resistência à compressão uniaxial;
- Módulo de elasticidade e resistência à compressão uniaxial.

Para a execução das correlações, houve que reanalisar os provetes dos ensaios para as quais estavam a ser implementadas, nomeadamente por reapreciação dos correspondentes registos fotográficos. Tal deve-se a que, nos primeiros ensaios que se fizeram, os de porosidade e peso volúmico, quando se efetuou a seleção dos provetes não houve a preocupação de ter a mesma designação de provetes para ensaiar quer para estes, quer para os restantes ensaios dinâmicos e mecânicos, uma vez que não existiria número suficiente de amostras para o efeito.

O que se fez foi uma inspeção visual, externa, do conjunto de provetes que saiam do mesmo ponto, para o ensaio da porosidade/peso volúmico, de modo a ter o número de amostras (dez) que aparentassem ser “homogéneas”, ignorando as restantes amostras para os ensaios dinâmicos e mecânicos. A filosofia subjacente foi que este tipo de rocha iria sempre apresentar heterogeneidades

relativas no seio dos provetes de maior dimensão, em particular nos provenientes do ponto 4, devido à presença de eventuais microfissuras, independentemente do que se fizesse.

Assim, não se fez correlação direta entre os dados de um mesmo provete que tenha sido submetido à porosidade/peso volúmico e, simultaneamente, a um ensaio mecânico/dinâmico, mas antes uma reavaliação desses provetes/conjunto de valores obtidos, o que resultou em ter poucos valores finais correlacionáveis. Deste modo, as correlações que a seguir se apresentam são meramente indicativas e trabalhos adicionais de laboratório deverão ser implementados de modo a ampliar o conjunto de valores de base e tornar as correlações mais representativas do material ensaiado. Acresce ainda que de rocha intacta, propriamente dita, existem essencialmente os provetes do ponto 1, uma vez que alguns do ponto 4 poderão ter microfissuras abertas no seu interior, o que resulta em correspondentes valores para as propriedades mecânicas mais baixos do que o expectável, retirando o significado a eventuais correlações daí obtidas.

A análise da Figura 5.6 permite verificar que as correlações entre a porosidade e a RCU na bibliografia da especialidade tendem a ser lineares, e não exponenciais como a representada. Contudo, verifica-se que a gama de variação de valores de porosidade obtidos para as amostras ensaiadas, entre 0,1 e 0,7%, é pequena e não é devida a variações no estado de meteorização, como é normal nos estudos existentes na bibliografia para outro tipo de rochas (Gupta e Rao, 1998; Tugrul e Zarif, 1999) mas eventualmente pode ser devido a alguma falha no procedimento laboratorial. De referir que, apesar de tudo, o valor do coeficiente de correlação é superior a 0,5 ($R=0,7887$).

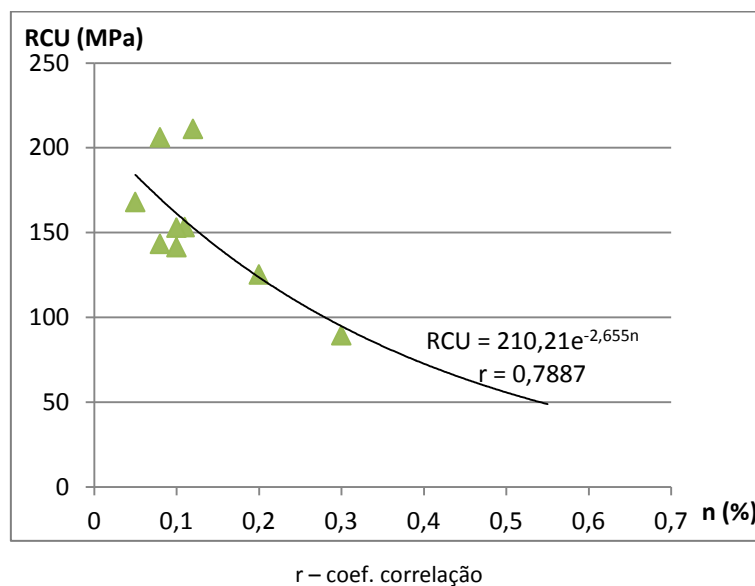


Figura 5.6 - Correlação exponencial entre alguns valores de porosidade e RCU para provetes do ponto 1 e 4

Relativamente ao peso volúmico, e da análise da tabela 5.1 e do Anexo 2, conclui-se que existe uma grande homogeneidade nos valores de peso volúmico aparente obtidos em todos os ensaios (28 – 30 kN/m³), pelo que não se avançou com nenhuma correlação entre este parâmetro e a resistência à compressão uniaxial.

Uma análise preliminar dos valores obtidos nos cinco blocos ensaiados com o martelo de Schmidt e dos valores de RCU para os correspondentes tarolos, obteve-se a reta de tendência da Figura 5.7, para a qual se determinou o intervalo de confiança de 95%. Verifica-se que existe uma correlação com significado um pouco superior a 0,7 para aquele conjunto de valores, como se verifica em alguma bibliografia (Aggitalis *et al.*, 1996; Aydin e Basu, 2009).

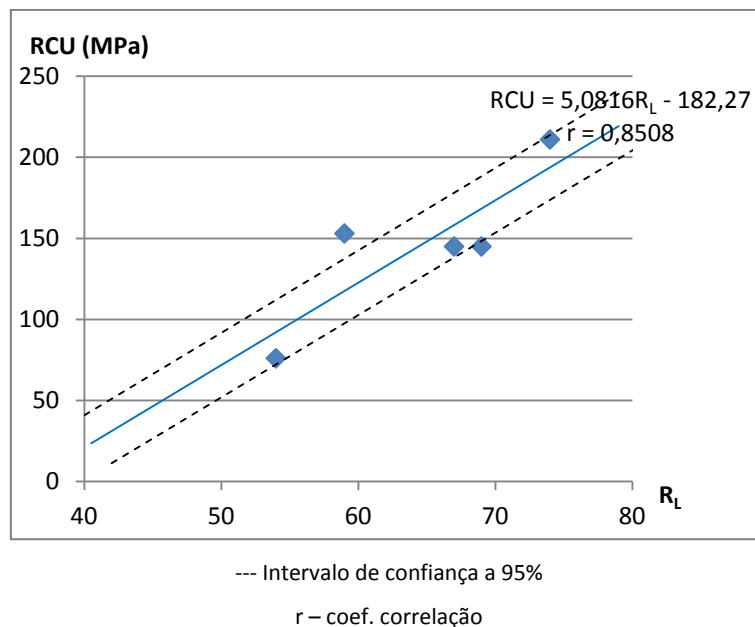


Figura 5.7 - Correlação linear entre alguns valores de dureza ao ressalto (R_L) e RCU para provetes do ponto 1 e 4

Tentou desenvolver-se correlações entre os valores de RCU e os parâmetros de deformabilidade calculados, contudo registou-se sempre uma dispersão grande de resultados que inviabilizou este objetivo. Tal poderá dever-se aos problemas identificados para os provetes com microfissuras, já referidos anteriormente, que implicarão futuramente análise e, eventualmente, ensaios adicionais.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação visa contribuir para a caracterização geotécnica dos gabros que integram a designada Sequencia Gabróica Bandada do Complexo ígneo de Beja (ca. 350 Ma), na envolvente do IP8, entre a freguesia de Beringel e a cidade de Beja.

Neste contexto, selecionou-se um conjunto de propriedades físicas, dinâmicas e mecânicas a fim de caracterizar em laboratório aquela rocha intacta e contribuir para a caracterização geotécnica dos gabros, quer a nível nacional, quer a nível internacional.

Recolheram-se cerca de 20 blocos de rocha ao longo de toda a área em estudo, dos quais foram selecionados apenas os relativos a dois locais:

- Uma zona de escavação para um canal de adução entre a barragem de Pisão, a Norte, e a barragem dos Cinco Reis, a Sul (ponto 1);
- Uma escavação a céu aberto a Norte de Beja, onde em tempos se explorou uma antiga saibreira (ponto 4).

Já em laboratório procedeu-se à avaliação da dureza ao ressalto dos blocos de rocha, recorrendo a um martelo de Schmidt do tipo L, num total de seis blocos, dos quais apenas cinco eram pertencentes às áreas amostradas, tendo-se efetuado 20 medições por bloco.

Seguidamente, os blocos foram caroteados com caroteadora de diâmetro NX e os tarolos resultantes foram serrados de modo a obter um conjunto de provetes cilíndricos, a saber:

- 70 provetes com cerca de 1cm de espessura, de massa superior a 50g, dos quais apenas 40 foram ensaiados, para a determinação da porosidade aparente e peso volúmico, agrupados em quatro grupos;
- 55 provetes de altura igual ou superior a 27mm, dos quais apenas 40 foram ensaiados para a resistência à compressão, agrupados em quatro conjuntos de amostras;
- 36 provetes com cerca de 135 mm de comprimento, dos quais 28 foram ensaiados para a determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons e 21 foram ensaiados à resistência à compressão uniaxial.

Os ensaios foram efetuados, essencialmente, segundo as recomendações da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas, ISRM, garantindo, em alguns casos, o cumprimento das normas ASTM, de acordo com a Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Recomendações da ISRM e normas ASTM nos ensaios realizados na dissertação

Ensaio	Recomendações ISRM /Normas ASTM
Dureza ao ressalto	<i>Suggested Method for Determination of the Schmidt Rebound Hardness (ISRM, 1978a)</i>
	<i>Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version (Aydin e Basu, 2009)</i>
	<i>ASTM D 5873 Standard Test Method for Determination of Hardness by Rebound Hammer Method (2005)</i>
Porosidade Peso volúmico	<i>Suggested Methods for Porosity/Density Determination Using Saturation and Buoyancy Techniques (ISRM,1979)</i>
	<i>ASTM C 97/C 97M Standard Test Methods for Absorption and Bulk Specific Gravity of Dimension Stone (2009)</i>
Velocidade propagação de ondas elásticas	<i>Suggested Methods for Determining Sound Velocity (ISRM, 1978b)</i>
	<i>ASTM D 2845 Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock (2008)</i>
Teor em água	<i>Suggested Method for Determination of the Water Content of a Rock Sample (ISRM, 1979)</i>
	<i>ASTM D 2216 Standar Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass (1979)</i>
Resistência à tração indireta	<i>Suggested Methods for Determining Indirect Tensile Strenght by the Brasil Test (ISRM,1977)</i>
	<i>ASTM D 3967 Standard Test Method for Splitting Tensile Strenght of Intact Rock Core Specimens (2008)</i>
Resistência à compressão uniaxial Deformabilidade	<i>Suggested Method for Determining the Uniaxial Compressive Strenght and Deformability of Rock Materials (ISRM, 1978)</i>
	<i>ASTM D 7012 Standard Test Method for Compressive Strenght and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress ans Temperatures (2007)</i>

A análise macro e microscópica deste material rochoso revelou tratar-se de um gabro de grão grosseiro, apresentando contudo os blocos do ponto 4 uma granularidade ligeiramente mais grosseira, o que se veio a confirmar em análise de microscópica, onde se verificou que essa relação era de quase o dobro. Ambas as amostras são se gabro olivínico de cor negra acinzentada, melanocrata, de textura fanerítica, granularidade média, em regra são em amostra de mão (ponto 1), se bem que há zonas onde se apresenta pouco alterado (ponto 4).

A análise da lâmina delgada revelou tratarem-se de gabros com textura holocristalina, tendo como minerais essenciais plagioclases (67 a 69%), piroxena (23 a 24%) e olivina (6 a 8%); os minerais acessórios, num total de 2% incluíam anfíbolos, serpentinas e minerais opacos.

A Tabela 6.2 apresenta um resumo dos resultados obtidos para todos os provetes ensaiados, relativos às propriedades intrínsecas, físicas e dinâmicas. O conjunto de valores obtidos nestes ensaios são concordantes com os valores expectáveis para gabros intactos, quer a nível internacional de acordo com a bibliografia da especialidade referenciada ao longo desta dissertação, quer a nível nacional, em comparação com os disponíveis para os gabros de Sines (LNEC, 1974).

O mesmo se pode dizer, mas de uma forma genérica, sobre os resultados obtidos para os ensaios mecânicos realizados, Tabela 6.3. Contudo neste caso, verificaram-se algumas discrepâncias em particular a nível dos valores mínimos obtidos, quer para as resistências à compressão uniaxial, quer para os módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson. Os valores anormalmente baixos dos primeiros e elevados dos segundos foram contudo obtidos num conjunto de provetes pouco

CONTRIBUTO PARA A CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS GABROS DA FAIXA BERINGEL – BEJA

Tabela 6.2 - Resumo das propriedades intrínsecas dos gabros de Beja ensaiados

Valores	Propriedades físicas			Propriedades dinâmicas			
	Peso volúmico aparente - γ (kN/m ³)	Porosidade eficaz - n_e (%)	Dureza ao ressalto - R_L	Velocidade das ondas P - V_p (m/s)	Velocidade das ondas S - V_s (m/s)	Coefficiente de Poisson dinâmico - ν	Módulo de Young dinâmico - E_d (GPa)
mínimo	28	0,0	46	6230	3940	0,06	111
máximo	30	0,7	69	7010	4410	0,22	130
média	29	0,1 – 0,5	54 - 63	6540 – 6920	4110 – 4260	0,13 – 0,17	116 – 125
desvio padrão	0,1 – 0,6	0,04 – 0,15	1,66 – 5,42	70 - 230	40 – 170	0,01 – 0,05	2 – 6

Tabela 6.3 - Resumo das propriedades mecânicas dos gabros de Beja ensaiados

Valores	Propriedades mecânicas						
	Resistência à tração - σ_t (MPa)	Teor em água - ω, σ_t (%)	Resistência à compressão uniaxial - σ_c (MPa)	Teor em água - ω, σ_c (%)	Módulo de elasticidade secante - E_{sec} (GPa)	Módulo de elasticidade tangente - E_{tg} (GPa)	Coefficiente de Poisson - ν
mínimo	11	0,00	27	0,00	49	54	0,10
máximo	25		212		146	143	0,44
média	16 - 17		97 - 167		92 – 122	94 – 151	0,22 – 0,32
desvio padrão	2 - 3		37– 49		17 - 33	21 – 87	0,05 – 0,14

alterados onde a presença de fraturas fechadas condicionou, tanto o valor máximo da resistência, diminuindo-o substancialmente, como o comportamento de deformação axial e radial dos provetes ensaiados, resultando em curvas irregulares de tensão-extensão, traduzindo-se em maior deformabilidade.

As correlações entre propriedades índice que se obtiveram são meramente indicativas, Tabela 6.4, apesar dos bons coeficientes de correlação, em particular o obtido entre o valor da dureza ao ressalto (martelo tipo L) e a RCU, que poderá ser utilizada em vez da do fabricante. Contudo, considera-se ser necessária uma reapreciação mais aprofundada dos ensaios efetuados *versus* resultados obtidos e, eventualmente, a substituição/ampliação com novos ensaios para lhes atribuir outra relevância.

Tabela 6.4 - Resumo das correlações preliminares obtidas para os gabros de Beja

Propriedades relacionadas	Relações empíricas	Coefficiente de correlação
Porosidade e RCU	$RCU = 210,21e^{-2,655n}$	$r = 0,7887$
Dureza ao ressalto e RCU	$RCU = 5,0816R_L - 182,27$	$r = 0,8508$

Deste modo e para o futuro, o trabalho aqui começado pode e deve ser ampliado e continuado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGISTALIS, G.; ALIVIZATOS, A.; STAMOULIS, D; STOURNARAS, G. – Correlating Uniaxial Compressive Strength With Schmidt Hardness, Point Load Index, Young’s Modulus, and Mineralogy of Gabbros And Basalts (Northern Greece). *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, vol. 54, 1996, pp. 3-11

ASTM C97 / C97M: 2009 - *Standard Test Methods for Absorption and Bulk Specific Gravity of Dimension Stone*. ASTM International, West Conshohocken.

ASTM D2216: 2005 - *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. ASTM International, West Conshohocken.

ASTM D2845: 2008 - *Standard Test for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rocks*. ASTM International, West Conshohocken.

ASTM D3967: 2008 - *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens*. ASTM International, West Conshohocken.

ASTM D5873: 2005 - *Standard Test Method for Determination of Hardness by Rebound Hammer Method*. ASTM International, West Conshohocken.

ASTM D7012: 2007 - *Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures*. ASTM International, West Conshohocken.

AYDIN A., BASU A. - ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46 (3), 2009, pp. 627-634. doi:10.1016/j.ijrmms.2008.01.020

BELL, F. G. - *Engineering Geology*, 2ª ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2007. 582p. ISBN-10: 0-7506-8077-6

BIENIAWSKI, Z. T. - Engineering Classification of Jointed Rock Masses, *Transactions of the South African Institution of Civil Engineers*, 15(12), 1973, pp. 335-344.

BIENIAWSKI, Z. T. - *Engineering Rock Mass Classifications*, 1ªed. Canadá: Wiley, 1989. 265p.

CANILHO, M. H. - Estudo geológico-petrográfico do maciço eruptivo de Sines. *Bol. Mus. Lab. Min. Geol. Fac. Ciências*. Lisboa. 12(2), 1972, 77-161.

CANILHO, M. H. – Elementos de geoquímica das rochas do maciço ígneo de Sines. *Ciências da Terra (UNL)*. Lisboa, vol.: 10, 1989, 65-80.

COSTA E SILVA, M., FALCÃO NEVES, A. P., PEREIRA, H. C., SOUSA, M. R. – Critérios para a caracterização geotécnica de maciços rochosos para obras subterrâneas, *XVIII Congresso da Ordem dos Engenheiros*, Vidago, Ordem dos Engenheiros, (2001), 12 pp.

DEERE, D. U.; MILLER, R. P. – Engineering classification and index properties for intact rock. New Mexico, USA: Air Force Weapons Laboratory, University of Illinois. 1966. 327pp. (Relatório técnico)

EDELBRO, C. – Rock Mass Strength: A Review. Luleå, Sweden: Division of Rock Mechanics, Department of Civil Engineering, University of Technology. 2003. 160p. ISSN 1402-1536 (Relatório Técnico)

GERCEK, H. – Poisson's ratio values for rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(1), 2007, pp. 1-13 ,

GILL, R. – *Igneous Rocks and Processes: A Practical Guide*, 1ªed. West Sussex, UK: Wiley – Blackwell, 2010, 472p. ISBN 978-1-4443-3065-6

GOODMAN, R. E. - *Introduction to Rock Mechanics*, 2ª ed. Canada: Wiley, 1989. 555p. ISBN 0-471-81200-5

GROTZINGER, J.; JORDAN, T. H.; PRESS, F.; SIEVER, R. – *Understanding Earth*, 5ª ed. New York, USA: W. H. Freeman and Company, 2007. 661p. ISBN 0716766825

GUPTA, A. S.; RAO, K. S. – Index properties of weathered rocks: inter-relationships and applicability. *Bull Eng Geol Env*, vol. 57 (1998) pp.161-172

HALL, A. – *Igneous Petrology*, 2ª ed. England: Longman Group Limited, 1996. 551p. ISBN 0-582-23080-2

HAMBLIN, W. K. e CHRISTIANSEN, E. H. – *Earth's Dynamic Systems*, 10ª ed. USA: Prentice Hall, 2003. 816p. ISBN 0131420666

HAWKINS, A. B. - Aspects of rock strength. *Bulletin Eng. Geol. Env*, 57 (1998) pp. 17-30,

HEFFERAN, K.; O'BRIEN, J. – *Earth Materials*, 1ªed. West Sussex, UK: Wiley – Blackwell, 2010. 670 p. ISBN 978-1-4051-4433-9

HOEK, E. (2006) – *Practical Rock Engineering*, Consultado a 27.06.2011 em:

http://www.rocsience.com/hoek/pdf/Practical_Rock_Engineering.pdf

HUDSON, J. A.; HARRISON, J. P. - *Engineering rock mechanics: an introduction to the principles*, 2ª ed. Oxford, UK: Pergamon, 1997. 458p. ISBN 0 08 04 19 12 7

HUDSON, J. A.; HARRISON, J. P. - *Engineering rock mechanics: part 2 Illustrative worked examples*, 1ª ed. Oxford, UK: Pergamon, 2000. 523p. ISBN 0 08 043010 4

HUNT, E. R. - *Geotechnical engineering investigation handbook*, 2ª ed. Boca Raton, Florida: Taylor e Francis, 2005. 1050p. ISBN 978-0-8493-2182-5

IAEG, International Association of Engineering Geology - Rock and Soil Description and Classification for Engineering Geological Mapping: Report by IAEG Commission on Engineering Geological Mapping. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, 24, 1981, pp. 235-274.

ISRM, International Society for Rock Mechanics - *Suggested Methods for Porosity/Density Determination Using Saturation and Buoyancy Techniques*. 1977a.

ISRM - *Suggested Method for Determination of the Water Content of a Rock Sample*. 1977b.

ISRM, *Suggested Method for Determination of the Schmidt Rebound Hardness* 1978a.

ISRM, *Suggested Methods for Determining Sound Velocity* 1978b.

ISRM, *Suggested Methods for Determining Indirect Tensile Strength by the Brazil Test* 1978c.

ISRM, *Suggested Method for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials* 1979.

ISRM, Basic Geotechnical Description of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, (1981) 18, 85-110.

JESUS, A.P., MATEUS, A., OLIVEIRA, V., MUNHÁ, J. - Ore-Forming Systems in the Layered Gabbroic Sequence of the Beja Igneous Complex (Ossa-Morena Zone, Portugal); State of the Art and Future Perspectives. *SGA Meeting – Mineral Exploration and Sustainable Development*, Atenas (Grécia), Demetrios G. Eliopoulos *et al.* eds., Millpress, Rotterdam, vol. 1 (2003) 591-594.

JESUS, A. P., MUNHÁ, J., MATEUS, A. - Critical Features Controlling the evolution of the Beja Layered Gabbroic Sequence; Implications to Ore-Forming Processes. *VIII Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Oficial Portuguesa – XIV Semana de Geoquímica*, Aveiro (2005a) pp. 305-310.

JESUS, A.P., MATEUS, A., MUNHÁ, J., PINTO, A. - *Intercummulus* Massive Ni-Cu-Co, Pge-Bearing Sulphides in Pyroxenite: A New Mineralization Type in the Layered Gabbroic Sequence of the Beja Igneous Complex (Portugal). *SGA Meeting – Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*, Beijing (China), J. Mao and F.P. Bierlein eds., Springer Verlag (2005b) pp. 405-407.

JESUS, A. P., MUNHÁ, J., MATEUS, A. - The Western Compartment of the Beja Layered Gabbroic Sequence: Internal Architecture and Main Petrogenetic Features. *VII Congresso Nacional de Geologia*, Estremoz (2006a) pp. 171-174.

JESUS, A. P., MATEUS A., MUNHÁ J., BRANCO J.M., ARAÚJO V.H. – Magmatic, Ni-Cu Sulphide Mineralization in the Western Compartment of the Beja Layered Gabbroic Sequence. *VII Congresso Nacional de Geologia*, Estremoz (Portugal) (2006b) 1019-1022.

JESUS, A.P., MATEUS, A., MUNHÁ, J., TASSINARI, C., ALVES, L.C., BOBOS, I. - Sulphide-Mineralization Types in the Layered Gabbroic Sequence of the Beja Igneous Complex (Portugal). *XV Semana de Geoquímica - VI Congresso Ibérico, Geochemistry of Mineral Deposits*, Vila Real (2007a) pp. 580-584.

JESUS, A. P., MUNHÁ, J., MATEUS, A., TASSINARI, C., NUTMAN, A.P. - The Beja Layered Gabbroic Sequence (Ossa-Morena Zone, Southern Portugal): Geochronology and Geodynamic Implications. *Geodinamica Acta*, vol. 20, fasc. 3 (2007b) pp. 139-157.

LE MAITRE, R. W.(editor) – *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms - Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*, 2ªed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005. 254p. ISBN 0-511-06864-6

LNEC – *Carta Geotécnica da Área de Sines*. Estudo realizado para o GAS. Relatório final, Proc.54/1/4663 (1974) Lisboa

MAYNE, P. W.; CHRISTOPHER, B. R.; DEJONG, J. – *Subsurface Investigation: Geotechnical Site Characterization*. USA: National Highway Institute, Federal Highway Administration, USDT, 2002. 332p. (Reference Manual)

MATEUS, A., MUNHÁ, J., JESUS, A. P. - Mineralizações Associadas à Sequência Gabróica do Complexo Ígneo de Beja. *Ciências Geológicas – Ensino e Investigação e sua História*, Neiva, J. M. C. , Ribeiro, A., Victor, M. , Noronha, F., Ramalho, M., *Associação Portuguesa de Geólogos e Sociedade Geológica de Portugal*, vol. II (2010) pp. 37-46.

PARISEAU, W. G. - *Design Analysis in Rock Mechanics*, 1ªed. Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis/Balkema, 2006. 578p. ISBN 0-415-40357-X

PECK, R.B., HANSON, W., THORBURN, T.H. - *Foundation Engineering*, John Wiley, New York. 1974 (policopiado).

PEDRO, J.; ARAÚJO, A., FONSECA, P.E., MUNHÁ, J.M. - Sequências ofiolíticas internas da Zona de Ossa-Morena: implicações geodinâmicas na evolução da cadeia varisca ibérica. *Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe*, Coruña, vol. 30, (2005) pp. 235-258

PEDRO, J., ARAÚJO, A., FONSECA, P.E., MUNHÁ, J. - Ofiolitos e Metamorfismo de Alta Pressão. In: Dias, R., Araújo, A., Terrina, P., Kullberg, J.C. (Eds.), *Geologia de Portugal no contexto da Ibéria*, Évora University, Évora (Portugal), (2006a) pp. 195–206.

PEDRO, J.; MOITA, P.; ARAÚJO, A.; FONSECA, P.; MUNHÁ, J. - Evolução tectonomagmática da Zona de Ossa-Morena durante o ciclo Varisco: estará o ciclo de J. Tuzo Wilson completo?. *VII Congresso Nacional de Geologia*, Estremoz (Portugal) (2006b).

PENG, S.; ZHANG, J. - *Engineering Geology for Underground Rocks*, 1ª ed. Berlin: Springer, 2007. 320p. ISBN 978-3-540-73294-5.

PIN, C., FONSECA, P.E., PAQUETTE, J.L., CASTRO, P., MATTE, P. - The ca. 350 ma beja igneous complex: a record of transcurrent slab break-off in the Southern iberia variscan belt?. *Tectonophysics*, vol. 461 (2008) pp.356-377.

PINHO, A. B. – *Caracterização Geotécnica de Maciços Rochosos de Baixa Resistência: O Flysch do Baixo Alentejo*. Évora: Universidade de Évora, 2003. 283p. Tese de doutoramento.

PRICE, D. G. - *Engineering Geology: Principles and Practice*, 1ª ed. Berlin: Springer, 2009. 450p. ISBN 978-3-540-29249-4.

RIBEIRO, A., MUNHÁ, J., FONSECA, P.E., ARAÚJO A., PEDRO, J.C., MATEUS, A., TASSINARI, C., MACHADO, G., JESUS, A. - Variscan Ophiolite Belts In The Ossa-Morena Zone (Southwest Iberia): Geological Characterization And Geodynamic Significance. *Gondwana Research*, vol. 17 (2010) pp. 408-421.

SABATINI, P. J.; BACHUS, R. C.; MAYNE, P. W; SCHNEIDER, J. A.; ZETLER, T. E. – *Geotechnical engineering circular no. 5: evaluation of soil and rock properties*. USA: GeoSyntec Consultants, 2002. 386p. (Manual técnico)

SILVA, A. P. F. da – “*Mecânica das Rochas*”, Notas de aulas. FCT – UNL, 2010/2011.

SIMÃO, J. – “*Petrologia ígnea e metamórfica*”, Notas de aulas. FCT – UNL, 2010/2011.

TARBUCK, E. J.; LUTGENS, F. K. – *Earth: An Introduction to Physical Geology*, 6ªed. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1999. 638p. ISBN 0-13-974122-4

TORNOS, F., CHIARADIA, M. - Plumbotectonic Evolution Of The Ossa Morena Zone (Iberian Peninsula): Tracing The Influence Of Mantle-Crust Interaction In Ore Forming Processes. *Economic Geology*, vol. 99 (2004) pp. 965-985.

TUGRUL, A.; ZARIF, I. H. – Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology*, vol 51 (1999) pp. 303-317.

VALLEJO, L. I. G. (ed.) – *Ingeniería Geológica*, 1ª ed., Madrid – España: Prentice Hill, 2004, 715 p. ISBN 84-205-3104-9

VALLEJO, L. I. G.; FERRER, M. – *Geological Engineering*, 2ª ed. London, UK: Taylor & Francis Group, 2011, 678p. ISBN 978-0-415-41352-7

ZHANG, J.– *Engineering Properties of Rocks in Hudson*, J. A. - Elsevier Geo-Engineering Book Series, 2ª ed, vol. 4. Amsterdam: Elsevier. 2006. 290 p. ISBN: 978-0-08-044672-1.

ANEXOS

ANEXO 1 – DESCRIÇÃO DOS PROVETES E RESPECTIVAS DIMENSÕES

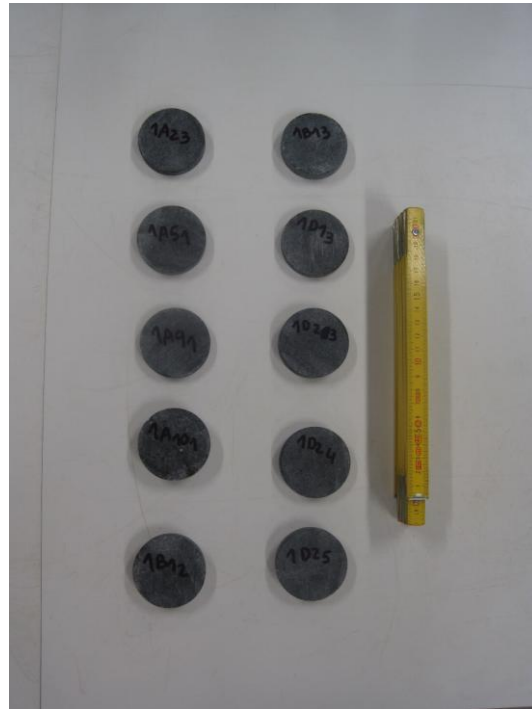
Porosidade e peso volúmico

PONTO	PROVETE	Altura - h (mm)			h _{média} (mm)	D (mm)	massa (g)
1	1	11,65	11,60	12,00	11,75	54,30	78,43
	2	10,75	11,45	10,90	11,03	54,00	73,64
	3	10,35	10,15	10,25	10,25	54,20	68,41
	4	11,30	11,50	11,65	11,48	54,20	76,54
	5	10,15	10,05	10,00	10,07	54,20	67,32
	6	10,65	10,55	10,60	10,60	54,30	70,99
	7	13,90	13,75	13,75	13,80	54,15	93,22
	8	11,10	11,20	11,35	11,22	54,20	75,27
	9	10,25	10,25	10,40	10,30	54,20	68,91
	10	11,40	11,60	11,30	11,43	54,30	75,79
	11	11,45	11,60	11,50	11,52	54,15	77,27
	12	10,30	10,25	10,30	10,28	54,20	68,89
	13	13,95	13,85	13,70	13,83	54,30	93,25
	14	9,20	9,50	9,05	9,25	54,15	61,52
	15	8,15	8,10	8,15	8,13	54,15	54,35
	16	15,10	15,15	15,25	15,17	54,20	101,41
	17	12,50	12,45	12,60	12,52	54,00	83,03
	18	12,05	12,10	12,10	12,08	54,00	79,18
	19	9,50	9,50	9,65	9,55	54,20	63,60
	20	8,50	8,50	8,60	8,53	54,00	56,57
	21	9,85	9,90	9,90	9,88	54,20	66,48
	22	13,50	13,60	13,60	13,57	54,20	89,35
	23	9,10	9,10	9,05	9,08	54,05	94,17
	24	9,00	8,70	8,90	8,87	54,00	57,97
	25	11,65	11,65	11,90	11,73	54,00	77,63
	26	10,35	10,00	10,10	10,15	54,20	67,39
	27	12,30	12,45	12,30	12,35	54,20	82,40
	28	10,85	10,80	10,90	10,85	54,25	73,15
	29	11,55	11,55	11,45	11,52	54,20	76,89
	30	11,40	11,40	11,40	11,40	54,15	76,31

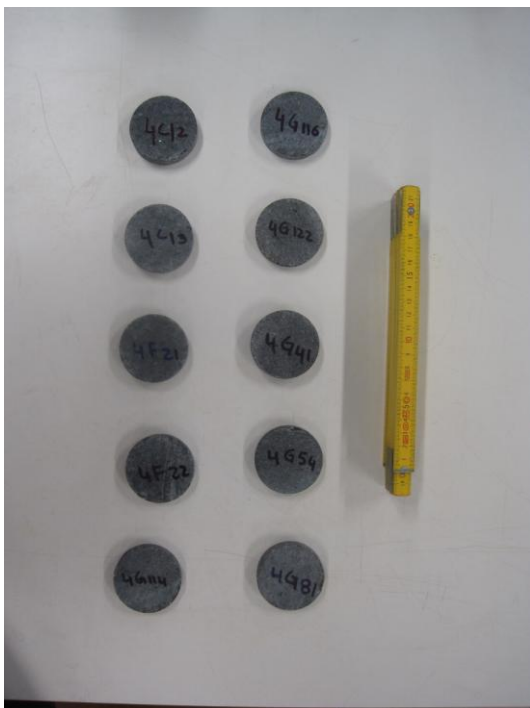
CONTRIBUTO PARA A CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS GABROS DA FAIXA BERINGEL – BEJA

PONTO	PROVETE	h (mm)			h _{média} (mm)	D (mm)	massa (g)
4	1	10,45	10,55	10,50	10,50	54,05	71,40
	2	10,55	10,55	10,50	10,53	54,05	71,51
	3	11,75	11,65	12,00	11,80	54,15	79,37
	4	14,30	14,90	14,35	14,52	54,15	98,71
	5	18,40	19,20	18,05	18,55	54,20	122,25
	6	10,40	10,70	10,25	10,45	54,10	70,59
	7	11,35	11,90	11,60	11,62	54,15	78,89
	8	12,75	12,70	12,75	12,73	54,15	83,01
	9	12,50	12,50	12,50	12,50	54,20	81,57
	10	13,35	13,25	13,30	13,30	54,15	88,95
	11	9,25	9,65	9,40	9,43	54,15	62,97
	12	10,55	10,70	10,65	10,63	54,15	71,94
	13	11,50	11,35	11,40	11,42	54,20	74,90
	14	11,10	11,20	11,10	11,13	54,30	72,67
	15	12,40	11,30	12,90	12,20	54,10	80,18
	16	9,60	9,35	9,65	9,53	54,10	63,42
	17	9,75	10,70	10,95	10,47	54,10	70,71
	18	12,30	12,05	12,10	12,15	54,15	81,37
	19	13,55	13,35	12,90	13,27	54,10	91,69
	20	12,55	12,75	12,90	12,73	54,00	83,58
	21	11,35	11,50	11,90	11,58	54,05	78,16
	22	10,00	10,25	10,00	10,08	54,10	68,34
	23	10,30	10,55	10,10	10,32	54,30	69,42
	24	12,60	12,65	12,45	12,57	54,10	82,58
	25	12,55	12,70	12,60	12,62	54,25	83,48
	26	6,45	6,55	6,60	6,53	54,30	41,91
	27	12,05	12,40	12,05	12,17	54,15	82,25
	28	9,90	10,25	9,90	10,02	54,40	68,38
	29	9,95	9,90	9,90	9,92	54,35	67,80
	30	11,35	11,10	11,10	11,18	54,35	76,05
	31	10,65	10,65	10,65	10,65	54,40	72,92
	32	11,70	11,75	11,80	11,75	54,30	80,38
	33	11,15	11,20	11,20	11,18	54,35	76,88
	34	10,30	10,10	10,25	10,22	54,35	68,90
	35	10,50	10,75	10,50	10,58	54,35	71,56
	36	11,10	11,10	11,10	11,10	54,35	73,85
	37	10,40	10,35	10,35	10,37	54,30	71,23
	38	12,90	12,60	12,90	12,80	54,35	86,05
	39	10,95	10,45	10,45	10,62	54,30	70,51
	40	11,40	11,60	11,20	11,40	54,35	76,60

Provetes para o ensaio de porosidade e peso volúmico – Ponto 1, Grupo 1 e Grupo 2



Provetes para o ensaio de porosidade e peso volúmico – Ponto 4, Grupo 1 e Grupo 2,



Resistência à tração indireta

PONTO	PROVETE	h (mm)			h _{médio} (mm)	D (mm)			D _{médio} (mm)	Descrição do provete
1	1	29,00	28,35	28,40	28,58	54,20	54,20	54,20	54,20	A, B, D
	2	25,40	25,40	25,30	25,37	54,20	54,20	54,35	54,25	A, B, D
	3	30,20	30,50	30,20	30,30	54,40	54,40	54,20	54,33	A, B, E, D
	4	29,30	29,40	29,25	29,32	54,25	54,30	54,20	54,25	A, B, D, E
	5	27,60	27,65	27,90	27,72	54,20	54,15	54,20	54,18	A, B, D, F
	6	26,90	27,20	26,90	27,00	54,35	54,20	54,25	54,27	A, B, D
	7	28,50	28,20	28,30	28,33	54,25	54,25	54,25	54,25	A, B, D
	8	27,75	28,00	27,70	27,82	54,20	54,10	54,15	54,15	A, B, D, F
	9	30,50	30,80	30,50	30,60	54,25	54,20	54,20	54,22	A, B, D
	10	27,70	27,60	27,70	27,67	54,15	54,30	54,20	54,22	A, B, D, F
	11	28,00	28,10	28,50	28,20	54,10	54,15	54,10	54,12	A, B, D
	12	34,30	34,30	34,30	34,30	54,00	54,05	54,10	54,05	A, B, D
	13	29,00	28,50	29,00	28,83	54,30	54,25	54,50	54,35	A, B, D
	14	28,70	28,60	28,60	28,63	54,20	54,10	54,15	54,15	A, B, E, D
	15	27,35	27,30	27,35	27,33	54,20	54,15	54,20	54,18	A, B, D, E
	16	28,30	28,20	28,55	28,35	54,15	54,25	54,20	54,20	A, B, D
	17	29,10	29,15	29,15	29,13	54,05	54,20	54,20	54,15	A, B, D
	18	28,90	28,90	28,85	28,88	54,05	54,00	54,05	54,03	A, B, D
	19	30,90	30,80	30,95	30,88	54,10	54,10	54,05	54,08	A, B, E, D
	20	30,90	30,80	30,95	30,88	54,10	54,10	54,05	54,08	A, C, D, E H
	21	29,00	28,80	29,30	29,03	54,20	54,20	54,20	54,20	A, B, D
	22	28,55	27,45	27,30	27,77	54,20	54,25	54,15	54,20	A, C, D, G
	23	28,40	28,90	28,55	28,62	54,15	54,20	54,15	54,17	A, C, D, E
	24	31,35	30,95	31,10	31,13	54,05	54,05	54,20	54,10	A, B, D
	25	26,30	26,70	26,50	26,50	54,10	54,00	54,20	54,10	A, C, D, E
	26	28,10	28,05	27,55	27,90	54,10	54,20	54,40	54,23	A, B, D
	27	29,20	29,35	29,25	29,27	54,30	54,25	54,25	54,27	A, B, D

A - Rocha com textura fanerítica granular, de grão médio. Melanocrata cinzento escura, com minerais xenomórficos;

B - Ausência de fissuras e de sinais de alteração ou de oxidação (W1);

C - Ausência de sinais de alteração na matriz rochosa, mas presença de fissura(s) com sinais de oxidação (W2);

D - Presença de ligeiras rugosidades ao longo de toda a espessura do provete, derivadas da carotagem;

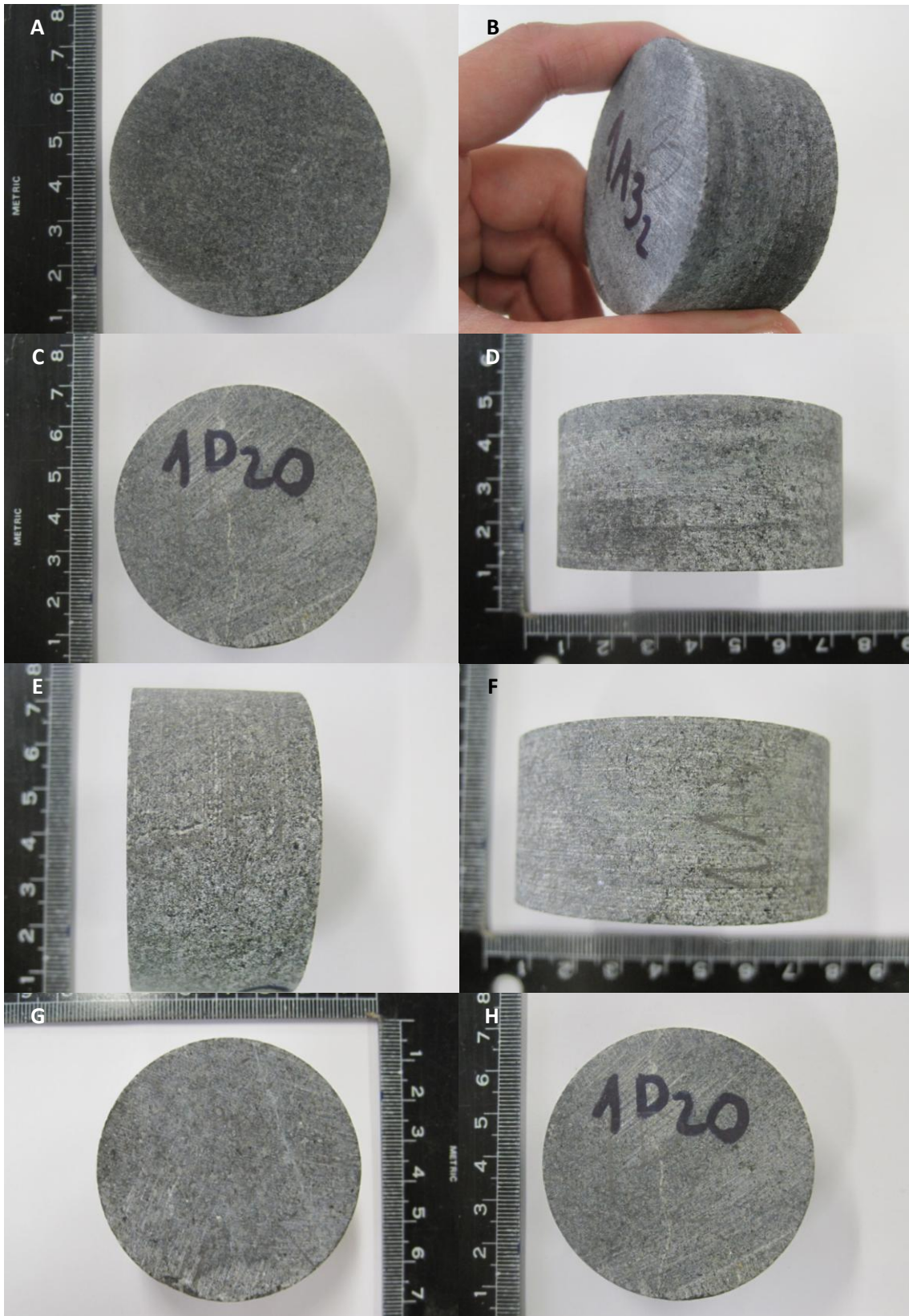
E – Presença de fissura fechada que atravessa o provete;

F – Presença de fissura fechada em cunha;

G – Presença de mais do que uma fissura fechada;

H – Presença de veio branco.

Fotografias ilustrativas da legenda da tabela anterior.



CONTRIBUTO PARA A CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS GABROS DA FAIXA BERINGEL – BEJA

PONTO	PROVETE	h (mm)			h _{médio} (mm)	D (mm)			D _{médio} (mm)	Descrição do provete
4	1	33,75	33,60	33,50	33,62	54,05	54,10	54,10	54,08	A, B, D, H
	2	26,85	27,10	26,45	26,80	54,10	54,05	53,95	54,03	A, B, D, H
	3	30,80	30,95	31,30	31,02	54,10	54,05	53,09	53,75	A, B, D, H
	4	22,85	23,60	22,75	23,07	54,15	54,00	54,15	54,10	A, B, D
	5	25,40	22,70	24,50	24,20	50,05	54,05	54,10	52,73	A, B, D
	6	29,65	28,95	28,95	29,18	54,15	54,40	54,20	54,25	A, B, D
	7	30,05	29,65	29,80	29,83	54,20	54,25	54,20	54,22	A, B, D
	8	32,00	31,95	31,95	31,97	54,30	54,25	54,25	54,27	A, B, D, F
	9	32,50	32,60	32,45	32,52	54,20	54,15	54,20	54,18	A, C, D, G
	10	32,45	32,65	32,35	32,48	54,25	54,30	54,20	54,25	A, C, D, E
	11	32,25	32,15	31,80	32,07	54,25	54,20	54,30	54,25	A, C, D, G
	12	30,45	30,45	30,80	30,57	54,20	54,25	54,30	54,25	A, B, D, E
	13	31,20	31,20	31,50	31,30	54,25	54,20	54,20	54,22	A, B, D, F,
	14	27,30	28,00	26,50	27,27	54,25	54,20	54,30	54,25	A, B, D
	15	31,80	32,70	31,75	32,08	54,25	54,30	54,30	54,28	A, C, D, F, I
	16	32,60	32,85	32,65	32,70	54,30	54,30	54,25	54,28	A, B
	17	31,30	31,90	31,00	31,40	54,05	54,10	54,10	54,08	A, B, D, E
	18	30,70	30,70	30,80	30,73	54,10	54,05	54,10	54,08	A, B, E
	19	31,80	32,25	31,15	31,73	54,25	54,20	54,10	54,18	A, B
	20	29,00	29,65	29,35	29,33	54,00	54,10	54,00	54,03	A, C, D, F, H,
	21	31,45	31,45	32,40	31,77	54,30	54,25	54,30	54,28	A, B, H
	22	31,55	30,50	31,30	31,12	54,35	54,35	54,40	54,37	A, B, H
	23	31,30	31,60	30,75	31,22	54,35	54,40	54,40	54,38	A, B, D, H
	24	29,40	29,00	28,90	29,10	54,35	54,30	54,40	54,35	A, B, D, H
	25	32,05	31,60	32,25	31,97	54,35	54,40	54,35	54,37	A, C, J
	26	30,75	30,95	30,75	30,82	54,35	54,35	54,40	54,37	A, B
	27	29,40	29,55	29,85	29,60	54,35	54,35	54,40	54,37	A, B, G, H
	28	30,35	30,40	30,75	30,50	54,35	54,40	54,35	54,37	A, B, H

A - Rocha com textura fanerítica granular, de grão médio. Melanocrata cinzento escura, com minerais xenomórficos;

B - Ausência de fissuras e de sinais de alteração ou de oxidação (W1);

C - Ausência de sinais de alteração na matriz rochosa, mas presença de fissura(s) com sinais de oxidação (W2);

D - Presença de ligeiras rugosidades ao longo de toda a espessura do provete, derivadas da carotagem;

E – Presença de fissura fechada que atravessa o provete obliquamente;

F – Presença de fissura fechada em cunha;

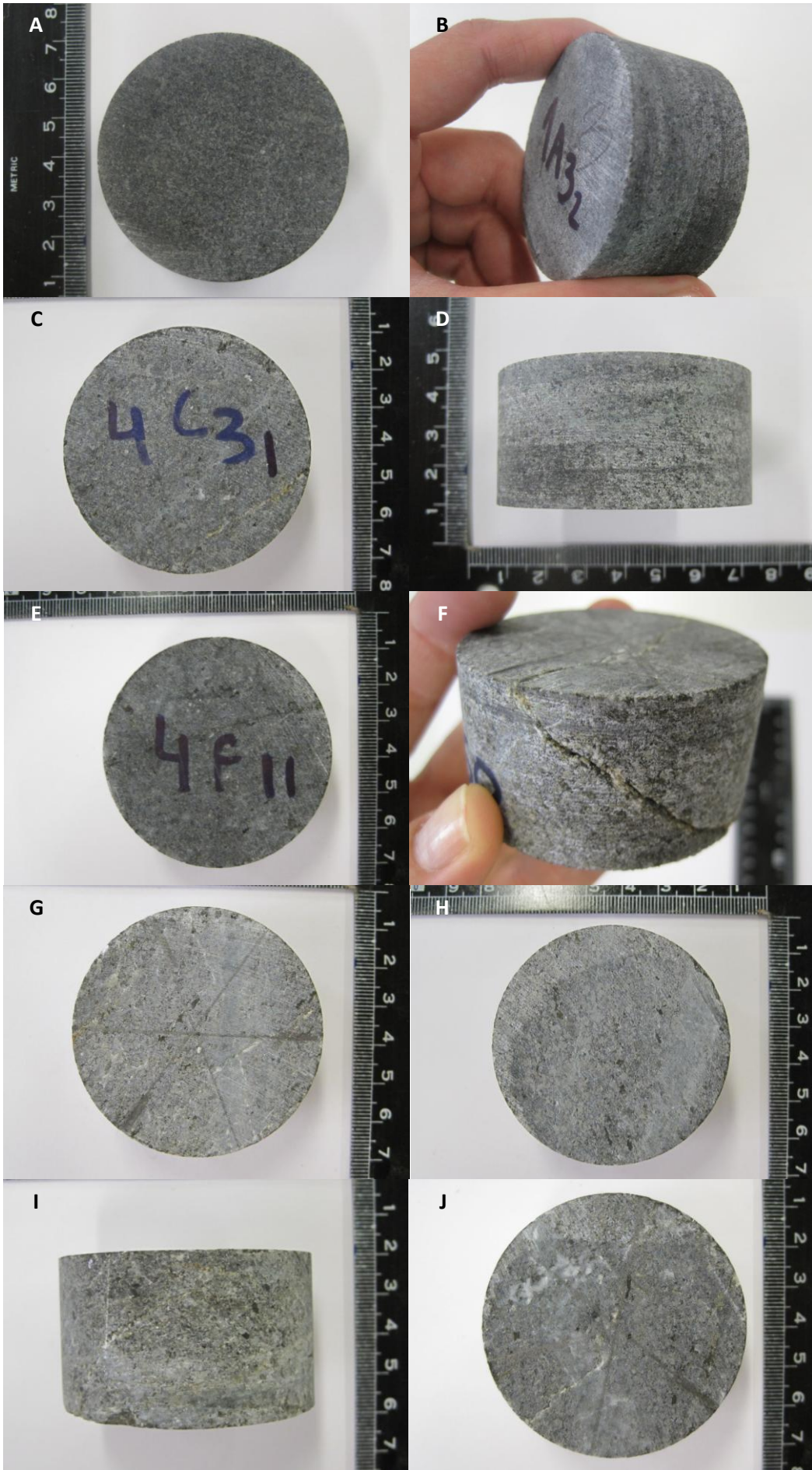
G – Presença de mais do que uma fissura fechada;

H – Presença de fissura preenchida com quartzo que atravessa o provete;

I – Presença de fissura preenchida com quartzo em cunha;

J – Presença de mais do que uma fissura recristalizada.

Fotografias ilustrativas desta legenda da página seguinte.



Resistência à compressão uniaxial

PONTO	PROVETE	L (mm)			L _{médio} (mm)	D (mm)			D _{médio} (mm)	Descrição do provete
1	1	137,90	137,95	138,60	138,15	54,20	54,25	54,28	54,24	A, B, D
	2	136,75	136,55	136,20	136,50	54,30	54,30	54,30	54,30	A, B, D
	3	136,75	136,55	136,20	136,50	54,20	54,20	54,20	54,20	A, B, D
	4	137,20	137,00	136,65	136,95	54,15	54,10	54,10	54,12	A, B, D
	5	137,80	138,15	138,50	138,15	54,30	54,35	54,20	54,28	A, B, D
	6	137,20	136,95	137,45	137,20	54,15	54,10	54,15	54,13	A, B, D
	7	136,85	136,30	136,25	136,47	54,20	54,25	54,20	54,22	A, B, D
	8	136,55	137,10	136,45	136,70	54,20	54,20	54,20	54,20	A, B, D
	9	138,55	137,75	137,75	138,02	54,10	54,30	54,05	54,15	A, B, D
	10	134,80	134,60	134,65	134,68	54,00	54,10	54,15	54,08	A, B, D
	11	138,20	138,45	138,55	138,40	54,20	54,15	54,05	54,13	A, B, D
	12	137,70	137,60	138,00	137,77	54,20	54,30	54,30	54,27	A, C, D, G
	13	138,00	137,80	138,30	138,03	54,15	54,10	54,15	54,13	A, C, D, F
	14	136,10	136,60	136,05	136,25	54,00	54,15	54,20	54,12	A, B, D
	15	134,30	134,25	134,60	134,38	54,15	54,30	54,20	54,22	A, B, D
	16	138,17	138,15	137,85	138,06	54,15	54,15	54,05	54,12	A, B, D
	17	139,05	138,95	138,40	138,80	54,10	54,15	54,15	54,13	A, B, D
	18	138,45	138,15	138,20	138,27	54,20	54,20	54,15	54,18	A, B, D
	19	138,40	138,10	137,90	138,13	54,15	54,20	54,20	54,18	A, B, D
	20	137,95	138,50	138,00	138,15	54,15	54,15	54,20	54,17	A, C, D, G
	21	137,50	137,80	137,60	137,63	54,20	54,30	54,20	54,23	A, B, D
4	1	135,85	135,50	136,00	135,78	54,15	54,30	54,10	54,18	A, B, D, I
	2	138,35	137,85	138,25	138,15	54,15	54,20	54,15	54,17	A, B, D, E
	3	136,30	136,85	137,40	136,85	54,20	54,20	54,15	54,18	A, B, D
	4	137,40	137,55	137,30	137,42	54,20	54,20	54,20	54,20	A, C, D, F
	5	138,60	138,85	138,45	138,63	54,20	54,15	54,20	54,18	A, B, D, E
	6	138,15	138,50	138,95	138,53	54,20	54,20	54,25	54,22	A, B, D
	7	135,60	135,55	135,20	135,45	54,20	54,25	54,20	54,22	A, B, D, F
	8	138,35	135,05	136,55	136,65	54,15	54,15	54,15	54,15	A, B, D, E
	9	134,60	135,00	135,00	134,87	54,30	54,40	54,30	54,33	A, B, D, J
	10	138,00	137,90	138,15	138,02	54,30	54,35	54,30	54,32	A, B, D, F, J
	11	139,25	139,05	138,70	139,00	54,35	54,35	54,35	54,35	A, C, D, J
	12	137,50	137,70	138,40	137,87	54,35	54,35	54,35	54,35	A, C, D, F, J
	13	140,50	139,80	140,00	140,10	54,35	54,30	54,35	54,33	A, C, D, F
	14	142,95	143,60	143,30	143,28	54,30	54,35	54,35	54,33	A, B, D, G
	15	141,15	142,25	141,15	141,52	54,35	54,35	54,30	54,33	A, C, D, F, I

A - Rocha com textura fanerítica granular, de grão médio. Melanocrata cinzento escura, com minerais xenomórficos.

B - Ausência de sinais de alteração ou de oxidação (W1)

C - Ausência de sinais de alteração na matriz rochosa, mas presença de fissura(s) com sinais de oxidação (W2).

D - Presença de ligeiras rugosidades ao longo de toda a espessura do provete, derivadas da carotagem.

E – Presença de fissura fechada que atravessa o provete

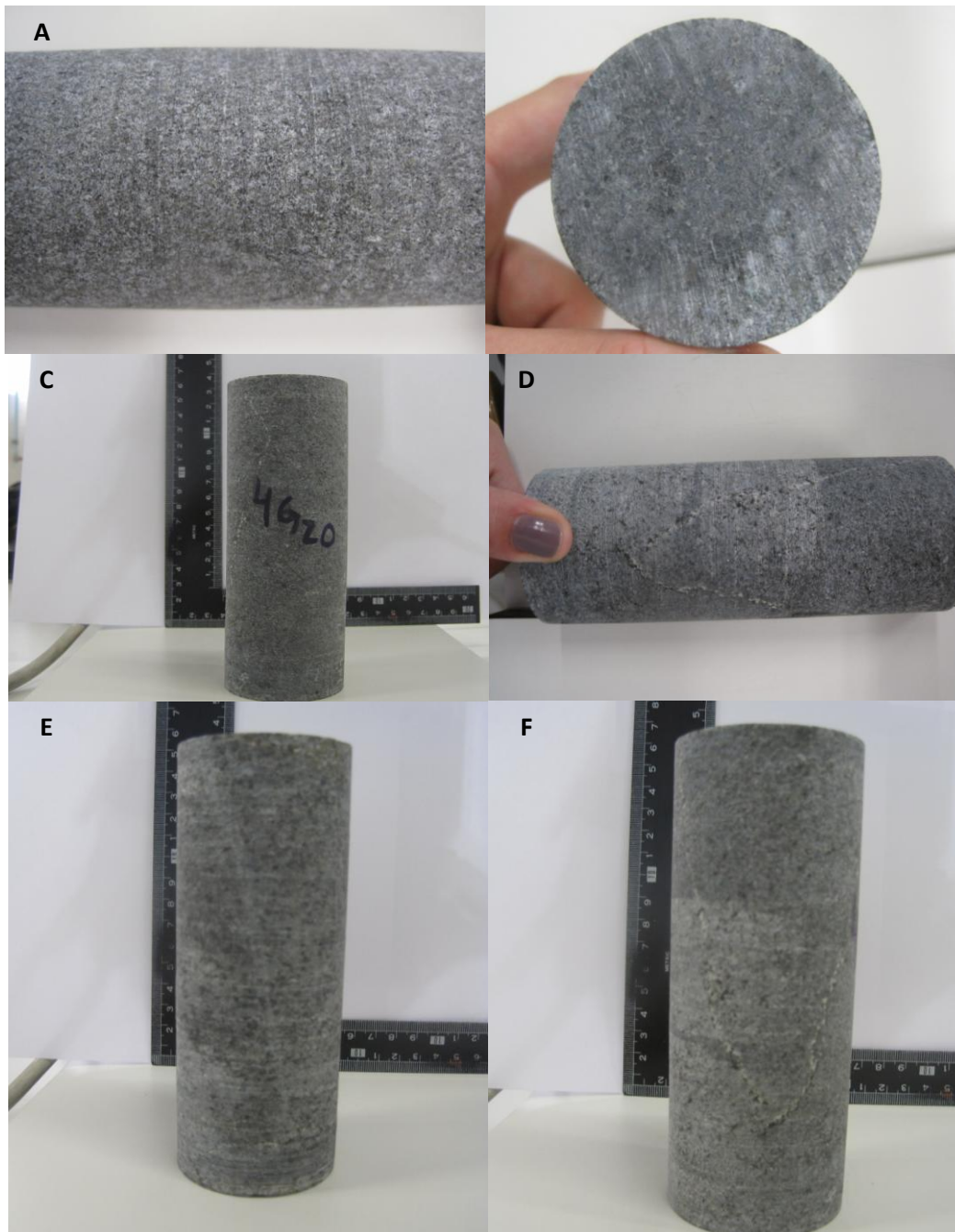
F – Presença de fissura fechada em cunha.

G – Presença de mais do que uma fissura fechada.

H – Presença de veio branco

I – Presença de fissura preenchida com quartzo que atravessa o comprimento do provete

J – Presença de fissura preenchida com quartzo em cunha





ANEXO 2 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE POROSIDADE E PESO VOLÚMICO

Provede	Massa provede seco m_d (g)	Massa provede imerso m_h (g)	Massa provede saturado m_s (g)	Massa volúmica aparente ρ (g/cm ³)	Peso volúmico aparente γ (kN/m ³)	Porosidade aberta p_o (%)	
Ponto 1	1	56,56	37,28	56,60	2,9	29	0,2
	2	68,40	45,18	68,43	2,9	29	0,1
	3	76,53	50,44	76,55	2,9	29	0,1
	4	67,31	44,38	67,34	2,9	29	0,1
	5	70,97	46,77	71,01	2,9	29	0,2
	6	93,20	61,71	93,22	3,0	29	0,1
	7	75,25	49,76	75,28	2,9	29	0,1
	8	77,27	50,92	77,31	2,9	29	0,2
	9	68,88	45,40	68,91	2,9	29	0,1
	10	73,15	48,21	73,18	2,9	29	0,1
	1	73,63	48,71	73,64	2,9	29	0,0
	2	68,90	45,54	68,93	2,9	29	0,1
	3	54,35	35,83	54,37	2,9	29	0,1
	4	101,37	66,78	101,43	2,9	29	0,2
	5	83,00	54,63	83,07	2,9	29	0,2
	6	79,16	51,96	79,21	2,9	28	0,2
	7	57,95	38,14	58,03	2,9	29	0,4
	8	77,63	51,13	77,67	2,9	29	0,2
	9	67,41	44,38	67,46	2,9	29	0,2
	10	82,42	54,26	82,46	2,9	29	0,1
Ponto 4	1	83,02	53,95	83,06	2,8	28	0,1
	2	81,57	53,10	81,64	2,9	28	0,2
	3	74,90	48,85	74,95	2,9	28	0,2
	4	72,66	47,28	72,69	2,9	28	0,1
	5	68,88	45,40	68,95	2,9	29	0,3
	6	73,83	48,52	73,87	2,9	29	0,2
	7	71,20	47,38	71,28	3,0	29	0,3
	8	91,70	61,54	91,73	3,0	30	0,1
	9	68,32	45,39	68,40	3,0	29	0,3
	10	82,24	54,57	82,33	3,0	29	0,3
	1	122,23	80,55	122,40	2,9	29	0,4
	2	63,40	42,06	63,51	2,9	29	0,5
	3	83,55	54,96	83,71	2,9	28	0,6
	4	69,37	45,90	69,54	2,9	29	0,7
	5	83,42	54,84	83,59	2,9	28	0,6
	6	80,36	53,38	80,43	3,0	29	0,3
	7	71,51	47,33	71,62	2,9	29	0,5
	8	86,03	56,78	86,11	2,9	29	0,3
	9	70,50	46,39	70,57	2,9	29	0,3
	10	76,58	50,47	76,70	2,9	29	0,5

ANEXO 3 – RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA DUREZA AO RESSALTO, MARTELO DE SCHMIDT, TIPO L

Origem das amostras: CIB			Ensaio	Dureza ao ressalto	Ensaio	Dureza ao ressalto
Identificação amostra: Ponto 1 Bloco A	Localização: Ponto 1 - Canal de adução		1	59	11	56
Profundidade: <3km	Orientação: Bloco solto	GPS: coordenadas	2	57	12	56
Tipo de rocha: Gabro	Estado de alteração: W1		3	53	13	58
Data de amostragem:	Data de ensaio: 28 Abril 2011		4	54	14	56
Tipo de amostra: Bloco	Método de corte da superfície: Natural		5	55	15	58
Forma: Irregular	Tamanho: 27x20x26 cm3		6	55	16	56
Condições de armazenamento: Em ambiente controlado no laboratório			7	55	17	58
Orientação do martelo durante o ensaio: 75º com horizontal	Tipo e modelo de martelo: L - CONTROLS 45-D561		8	54	18	54
Método de fixação da amostra: Peso próprio em superfície antiderrapante	Temperatura do local ensaio: 23º		9	54	19	54
Valor padrão específico do martelo: 72	Média das leituras de calibração do martelo: 54,8		10	54	20	56
			Média de 50% dos maiores valores de dureza do ensaio		57,00	

Origem das amostras: CIB			Ensaio	Dureza ao ressalto	Ensaio	Dureza ao ressalto
Identificação amostra: Ponto 1 Bloco B	Localização: Ponto 1 - Canal de adução		1	56	11	54
Profundidade: <3km	Orientação: Bloco solto	GPS: coordenadas	2	54	12	52
Tipo de rocha: Gabro	Estado de alteração: W3		3	58	13	50
Data de amostragem:	Data de ensaio: 28 Abril 2011		4	58	14	52
Tipo de amostra: Bloco	Método de corte da superfície: Natural		5	52	15	54
Forma: Irregular	Tamanho: 33x14x34 cm3		6	59	16	50
Condições de armazenamento: Em ambiente controlado no laboratório			7	57	17	54
Orientação do martelo durante o ensaio: 75º com horizontal	Tipo e modelo de martelo: L - CONTROLS 45-D561		8	50	18	57
Método de fixação da amostra: Peso próprio em superfície antiderrapante	Temperatura do local ensaio: 23º		9	54	19	50
Valor padrão específico do martelo: 72	Média das leituras de calibração do martelo: 54,8		10	54	20	54
			Média de 50% dos maiores valores de dureza do ensaio		56,10	

CONTRIBUTO PARA A CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS GABROS DA FAIXA BERINGEL – BEJA

Origem das amostras: CIB			Ensaio	Dureza ao ressalto		Ensaio	Dureza ao ressalto	
Identificação amostra: Ponto 1 Bloco D	Localização: Ponto 1 – canal de adução		1	52		11	62	
Profundidade: <3km	Orientação: Bloco solto	GPS: coordenadas	2	52		12	55	
Tipo de rocha: Gabro	Estado de alteração: W2 com passagem para W3		3	51		13	59	
Data de amostragem:	Data de ensaio: 27 Abril 2011		4	47		14	52	
Tipo de amostra: Bloco	Método de corte da superfície: Natural		5	52		15	50	
Forma: Irregular	Tamanho: 19x47x15 cm3		6	54		16	54	
Condições de armazenamento: Em ambiente controlado no laboratório			7	54		17	50	
Orientação do martelo durante o ensaio: vertical - 90º com a superfície	Tipo e modelo de martelo: L - CONTROLS 45-D561		8	53		18	55	
Método de fixação da amostra: Peso próprio em superfície antiderrapante	Temperatura do local ensaio: 24º		9	56		19	56	
Valor padrão específico do martelo: 72	Média das leituras de calibração do martelo: 54,8		10	57		20	57	
						Média de 50% dos maiores valores de dureza do ensaio		56,50

Origem das amostras: CIB			Ensaio	Dureza ao ressalto		Ensaio	Dureza ao ressalto	
				A	B		A	B
Identificação amostra: Ponto 4 Bloco C	Localização: Ponto 4 – antiga saibreira		1	60	62	11	68	60
Profundidade: <3km	Orientação: Bloco solto	GPS: coordenadas	2	58	57	12	62	59
Tipo de rocha: Gabro	Estado de alteração: W1-2		3	55	60	13	55	56
Data de amostragem:	Data de ensaio: 27 Abril 2011		4	54	63	14	60	62
Tipo de amostra: Bloco	Método de corte da superfície: Natural		5	64	62	15	65	60
Forma: Irregular	Tamanho: 23x39x16 cm3		6	68	62	16	68	54
Condições de armazenamento: Em ambiente controlado no laboratório			7	63	67	17	68	60
Orientação do martelo durante o ensaio: vertical - 90º com a superfície	Tipo e modelo de martelo: L - CONTROLS 45-D561		8	62	57	18	68	54
Método de fixação da amostra: Peso próprio em superfície antiderrapante	Temperatura do local ensaio: 24º		9	65	55	19	69	57
Valor padrão específico do martelo: 72	Média das leituras de calibração do martelo: 54,8		10	65	57	20	59	63
						Média de 50% dos maiores valores		A 66,80 B 62,10

CONTRIBUTO PARA A CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS GABROS DA FAIXA BERINGEL – BEJA

Origem das amostras: CIB			Ensaio	Dureza ao ressalto	Ensaio	Dureza ao ressalto
Identificação amostra: Ponto 4 Bloco D	Localização: Ponto 4 – antiga saibreira		1	60	11	56
Profundidade: <3km	Orientação: Bloco solto	GPS: coordenadas	2	64	12	65
Tipo de rocha: Gabro	Estado de alteração: W2 com passagens W3		3	59	13	50
Data de amostragem:	Data de ensaio: 28 Abril 2011		4	61	14	63
Tipo de amostra: Bloco	Método de corte da superfície: Natural		5	56	15	64
Forma: Irregular	Tamanho: 22x16x12 cm3		6	66	16	67
Condições de armazenamento: Em ambiente controlado no laboratório			7	59	17	46
Orientação do martelo durante o ensaio: ver foto	Tipo e modelo de martelo: L - CONTROLS 45-D561		8	60	18	68
Método de fixação da amostra: Peso próprio em superfície antiderrapante	Temperatura do local ensaio: 23,5º		9	60	19	64
Valor padrão específico do martelo: 72	Média das leituras de calibração do martelo: 54,8		10	61	20	66
			Média de 50% dos maiores valores de dureza do ensaio		64,80	

ANEXOS 4 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ULTRA-SONS

Proвете	L médio (mm)	T _P (10 ⁻⁶ s)			T _P médio (10 ⁻⁶ s)	V _P (m/s)	T _S (10 ⁻⁶ s)			T _S médio (10 ⁻⁶ s)	V _S (m/s)	ρ kg/m ³	ν	E (GPa)	
Ponto 1	1	138,15	19,90	19,70	19,60	19,73	7001	26,60	24,50	24,90	25,33	4076	2905	0,19	120
	2	136,50	19,80	19,70	19,70	19,73	6917	23,90	24,70	24,40	24,33	4175	2890	0,17	122
	3	136,50	19,60	19,70	19,70	19,67	6941	24,30	24,50	24,10	24,30	4181	2900	0,17	123
	4	138,06	20,00	20,00	19,70	19,90	6938	25,30	24,00	24,60	24,63	4188	2938	0,17	125
	5	138,80	20,20	20,10	20,10	20,13	6894	24,50	24,60	26,50	25,20	4123	2922	0,17	121
	6	138,27	20,00	19,60	19,60	19,73	7007	25,00	26,40	25,10	25,50	4054	2912	0,20	119
	7	137,63	20,60	20,50	19,90	20,33	6769	24,50	24,90	24,40	24,60	4176	2902	0,15	121
	1	136,70	19,90	19,90	19,90	19,90	6869	22,50	23,50	23,30	23,10	4407	2901	0,11	130
	2	138,02	20,00	20,00	19,90	19,97	6912	23,30	23,70	24,40	23,80	4333	2904	0,13	128
	3	134,68	19,60	19,60	19,60	19,60	6872	22,80	23,70	23,00	23,17	4307	2906	0,13	127
	4	138,40	20,70	20,90	20,90	20,83	6643	26,20	26,00	26,30	26,17	3955	2898	0,18	111
	5	136,25	19,60	19,60	19,60	19,60	6952	23,20	23,70	24,50	23,80	4258	2921	0,15	127
	6	134,38	19,60	19,50	19,50	19,53	6880	24,80	22,70	22,60	23,37	4257	2918	0,14	126
	7	138,13	19,90	19,90	19,80	19,87	6953	22,50	26,50	23,40	24,13	4278	2906	0,15	127
	1	136,95	19,80	20,00	19,80	19,87	6893	24,30	24,00	24,70	24,33	4194	2953	0,16	123
	2	138,15	19,70	19,70	19,70	19,70	7013	24,90	24,60	24,50	24,67	4186	2901	0,17	124
	3	137,20	19,70	19,70	19,80	19,73	6953	24,40	24,30	24,20	24,30	4210	2926	0,16	124
	4	136,47	19,70	19,80	19,80	19,77	6904	24,40	24,30	24,40	24,37	4168	2857	0,17	123
	5	137,77	20,30	20,40	20,30	20,33	6775	24,60	25,20	25,30	25,03	4109	2860	0,16	118
	6	138,03	20,20	20,20	20,20	20,20	6833	24,90	24,80	23,60	24,43	4221	2956	0,15	124
	7	138,15	20,70	20,80	20,70	20,73	6663	25,50	25,60	22,80	24,63	4191	2935	0,13	119
Ponto 4	1	135,78	20,00	20,10	20,00	20,03	6778	23,50	24,30	24,60	24,13	4180	2911	0,15	123
	2	138,15	20,70	20,40	20,60	20,57	6717	23,40	26,40	25,00	24,93	4141	2963	0,15	119
	3	136,85	19,90	19,80	19,80	19,83	6900	26,70	25,80	26,20	26,23	3886	2958	0,22	112
	4	138,63	20,90	20,80	20,70	20,80	6665	26,10	25,00	24,70	25,27	4106	2923	0,15	115
	5	138,53	20,20	20,30	20,50	20,33	6813	26,20	24,50	26,20	25,63	4043	2928	0,18	115
	6	134,87	20,00	19,80	20,00	19,93	6766	23,40	23,20	23,30	23,30	4290	2955	0,12	127
	7	138,02	20,50	20,50	20,50	20,50	6733	23,50	23,30	23,60	23,47	4394	2918	0,09	128
	1	137,42	20,60	20,60	20,40	20,53	6692	23,70	26,40	26,70	25,60	4005	2907	0,17	114
	2	135,42	19,90	19,60	19,70	19,73	6862	23,30	23,60	23,70	23,53	4271	2892	0,14	128
	3	136,65	20,50	20,50	20,60	20,53	6655	24,60	23,30	23,70	25,80	3944	2898	0,18	113
	4	137,87	21,40	21,20	21,20	21,27	6483	25,70	25,40	26,60	25,90	3976	2913	0,15	111
	5	140,10	22,50	22,40	22,60	22,50	6227	25,40	25,60	24,70	25,23	4169	2889	0,07	111
	6	143,28	21,60	21,80	21,80	21,73	6593	26,70	25,30	26,10	26,03	4163	2921	0,13	120
	7	141,52	22,70	22,60	22,50	22,60	6262	25,40	25,60	24,70	25,23	4225	2900	0,06	113

ANEXOS 5 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO BRASILEIRA

PROVETE	D _{médio} (mm)	t _{médio} (mm)	Taxa de carregamento (N/s)	σ_t (MPa)	m _w (g)	m _d (g)	ω (%)	
Ponto 1	1	54,20	28,58	632,41	19,53	81,38	81,39	0,0001
	2	54,25	29,32	130,30	17,22	86,07	86,08	0,0001
	3	54,18	27,72	424,24	17,81	100,91	100,82	0,0009
	4	54,27	27,00	267,86	19,56	73,41	73,43	0,0003
	5	54,25	28,33	247,25	18,65	86,09	86,09	0
	6	54,15	27,82	161,70	16,07	90,91	90,91	0
	7	54,22	27,67	272,00	14,44	77,00	77,00	0
	8	54,12	28,20	291,67	14,61	74,90	74,89	0,0001
	9	54,35	28,83	316,24	15,04	98,57	98,57	0
	10	54,17	28,62	16666,67	20,54	55,29	55,29	0
	1	54,33	30,30	25000,00	19,34	79	78,89	0,0014
	2	54,05	34,30	446,60	15,80	93,22	93,14	0,0009
	3	54,15	28,63	347,83	13,15	74,45	74,35	0,0013
	4	54,20	28,35	571,43	16,58	72,31	72,29	0,0003
	5	54,15	29,13	541,67	15,75	71,85	71,8	0,0007
	6	54,03	28,88	406,98	14,29	73,68	73,52	0,0022
	7	54,08	30,88	687,50	25,16	48,59	48,38	0,0043
	8	54,10	31,13	379,63	15,50	60,9	60,63	0,0045
	9	54,23	27,90	531,65	17,68	57,73	57,61	0,0021
	10	54,27	29,27	769,23	16,04	79,51	79,37	0,0018
Ponto 4	1	54,08	33,62	1000,00	21,02	92,44	92,44	0
	2	54,03	26,80	355,14	16,71	83,97	83,97	0
	3	53,75	31,02	651,52	16,43	93,63	93,6	0,0003
	4	54,25	29,18	480,00	14,48	99,86	99,85	0,0001
	5	54,22	29,83	431,82	14,96	96,49	96,47	0,0002
	6	54,25	27,27	1733,33	11,20	81,62	81,6	0,0002
	7	54,18	31,73	730,16	17,04	124,21	124,18	0,0002
	8	54,28	31,77	806,45	18,47	110,58	110,55	0,0003
	9	54,37	31,12	493,42	14,12	101,72	101,67	0,0005
	10	54,37	30,50	643,84	18,05	109,49	109,46	0,0003
	1	54,27	31,97	608,70	15,42	79,68	79,68	0
	2	54,18	32,52	439,19	23,49	69,24	69,24	0
	3	54,25	32,48	281,25	13,01	63,52	63,54	0,0003
	4	54,25	32,07	385,14	20,87	16,93	16,93	0
	5	54,25	30,57	555,56	19,20	40,35	40,35	0
	6	54,28	32,08	621,21	14,99	87,21	87,18	0,0003
	7	54,08	31,40	611,94	15,38	92,09	92,08	0,0001
	8	54,08	30,73	352,97	14,94	70,26	70,24	0,0003
	9	54,03	29,33	600,00	16,88	81,24	81,23	0,0001
	10	54,37	31,97	694,92	15,03	77,34	77,32	0,0003

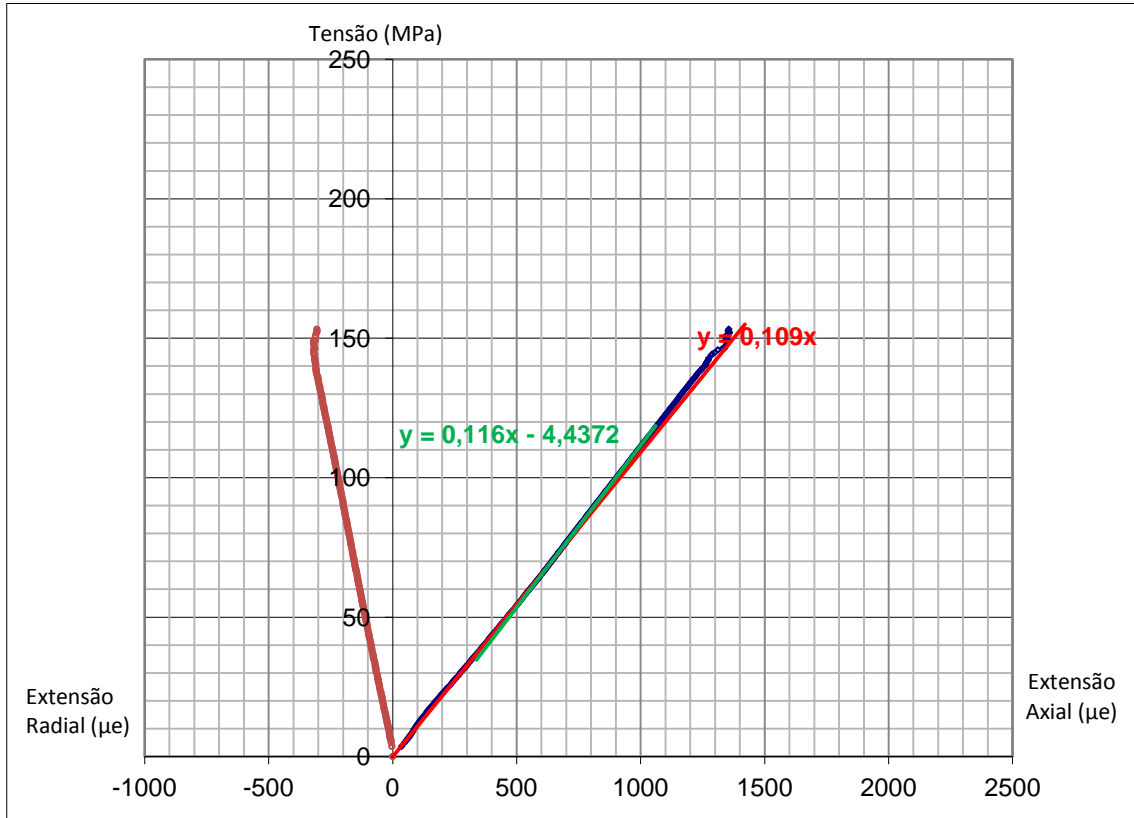
ANEXOS 6 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO UNIAXIAL E DEFORMABILIDADE

PROVETE		D _{médio} (mm)	L _{médio} (mm)	σ_c (Mpa)	E _{sec} (Gpa)	E _{tg} (Gpa)	ν	E _{tg} / σ_c	m _w (g)	m _d (g)	ω (%)
Ponto 1	1	54,24	138,15	153,20	109	116	0,24	696	-	-	-
	2	54,30	136,50	143,30	78	79	0,18	476	122,28	122,23	0,0004
	3	54,20	136,50	206,13	114	119	0,29	712	63,75	63,71	0,0006
	4	54,12	138,06	167,69	78	143	0,16	860	93,37	93,32	0,0005
	5	54,13	138,80	180,30	109	114	0,24	685	69,45	69,41	0,0006
	6	54,18	138,27	211,09	84	106	0,21	635	76,11	76,07	0,0005
	7	54,23	137,63	105,06	-	-	-	696	62,45	62,43	0,0003
Ponto 4	1	54,18	135,78	136,61	112	105	0,26	792	75,15	75,08	0,0009
	2	54,17	138,15	89,41	49	54	0,10	411	72,03	71,98	0,0007
	3	54,18	136,85	68,64	77	76	0,21	574	-	-	-
	4	54,18	138,63	180,49	91	112	0,23	848	112,49	112,42	0,0006
	5	54,22	138,53	167,99	120	125	0,28	950	132,87	132,76	0,0008
	6	54,33	134,87	141,37	73	74	0,17	564	59,74	59,59	0,0025
	7	54,32	138,02	139,57	146	110	0,35	829	52,09	52,01	0,0015
	1	54,20	137,42	145,16	145	109	0,36	1122	127,78	127,63	0,0012
	1	54,22	135,42	95,37	-	-	-	-	-	-	-
	2	54,15	136,65	152,88	-	-	-	-	210,34	210,22	0,0006
	3	54,35	137,87	125,24	90	85	0,11	873	-	-	-
	4	54,33	140,10	37,76	115	278	0,44	2860	-	-	-
	5	54,33	143,28	27,41	-	-	-	-	37,20	37,13	0,0019
	6	54,33	141,52	97,23	140	131	0,37	1351	-	-	-
7	54,18	135,78	136,61	112	105	0,26	792	75,15	75,08	0,0009	

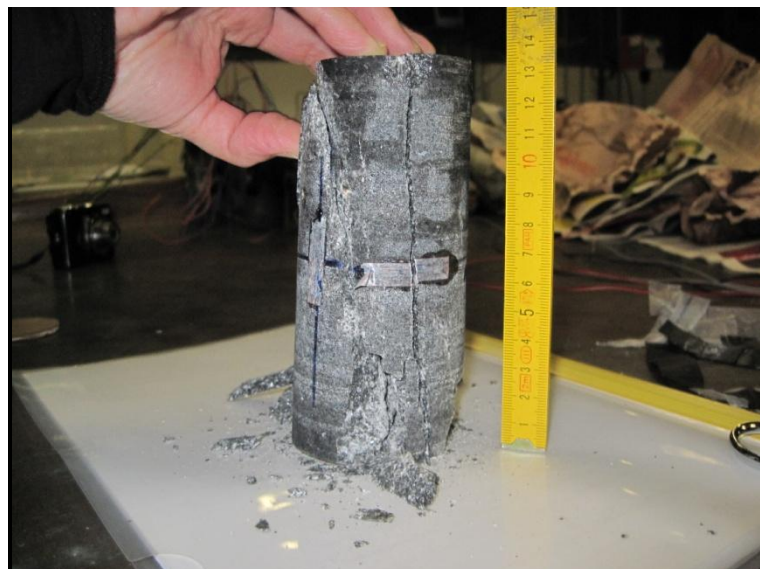
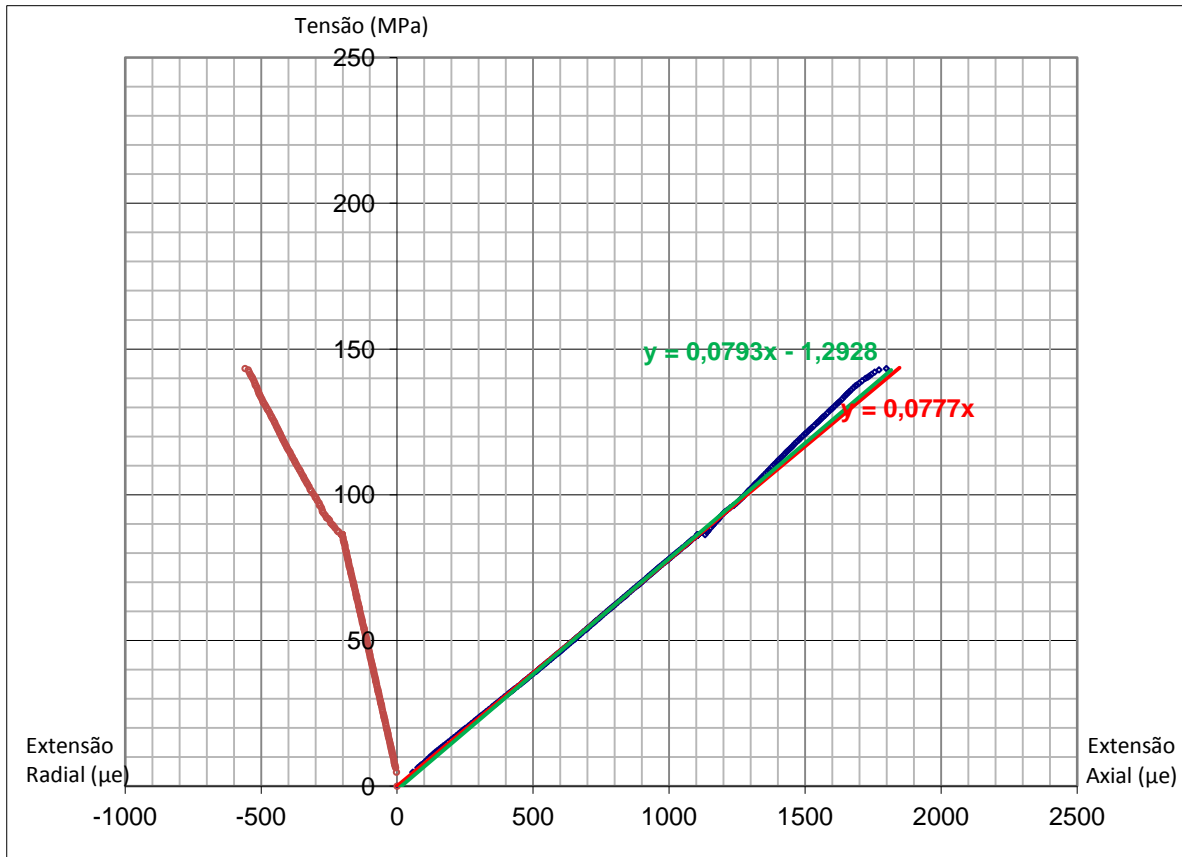
GRÁFICO TENSÃO-EXTENSÃO E FOTOGRAFIA DO PROVETE APÓS ENSAIO

Ponto 1

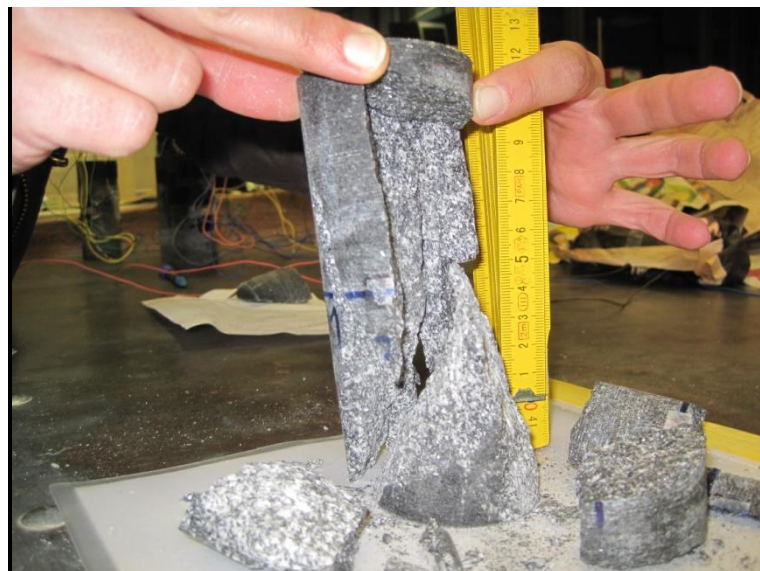
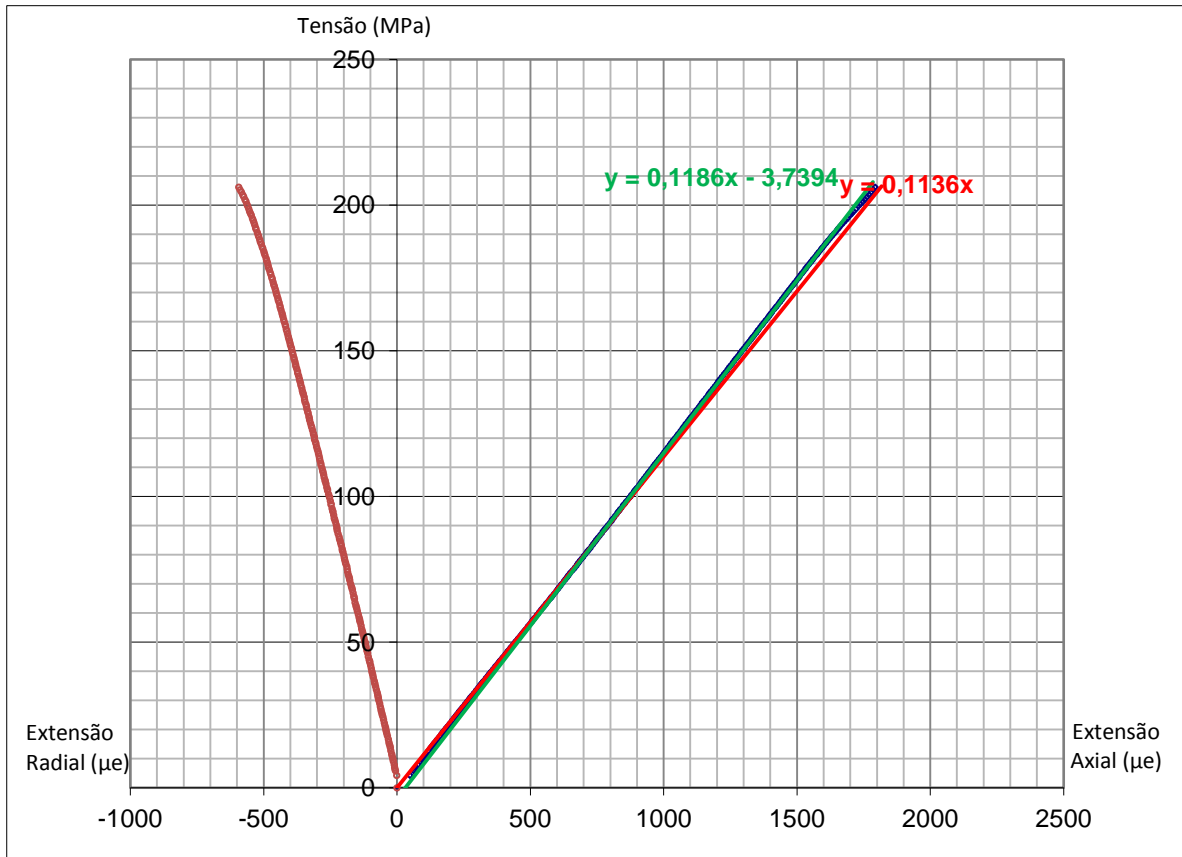
Provete 1



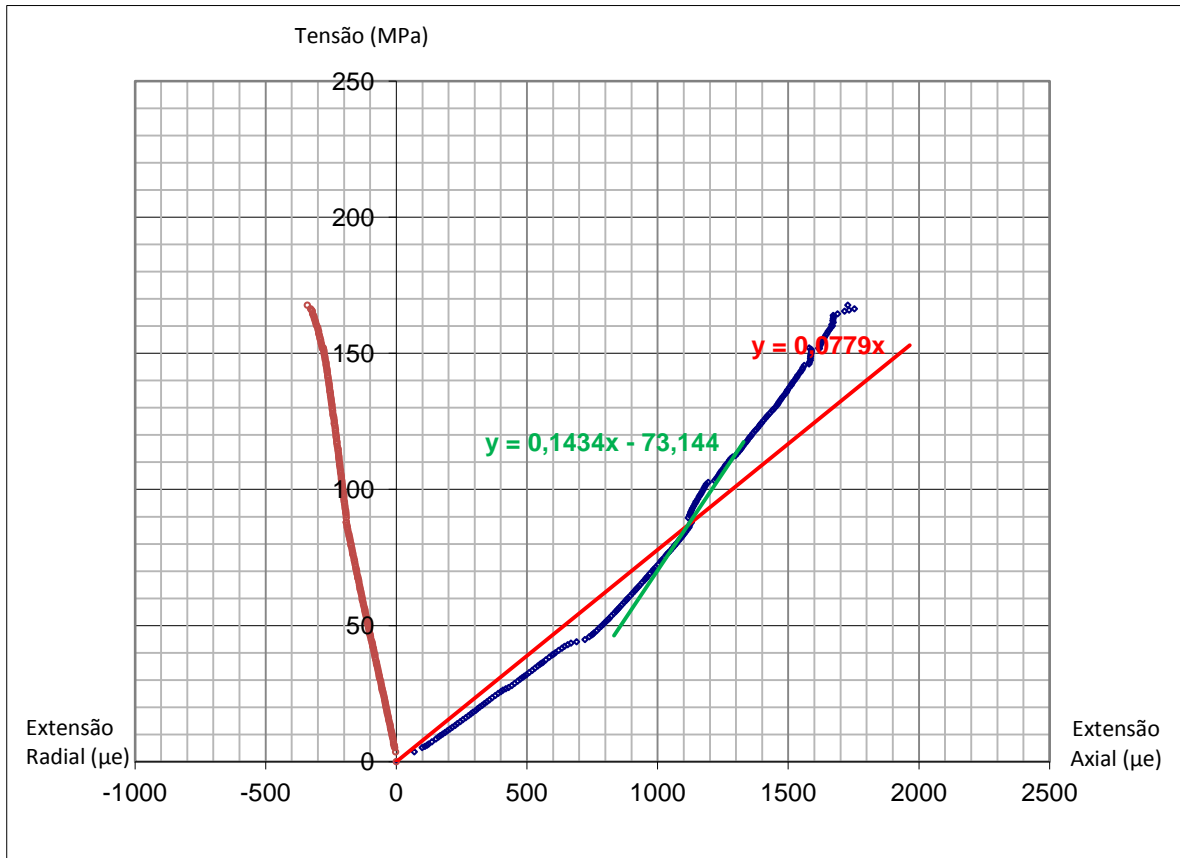
Provete 2



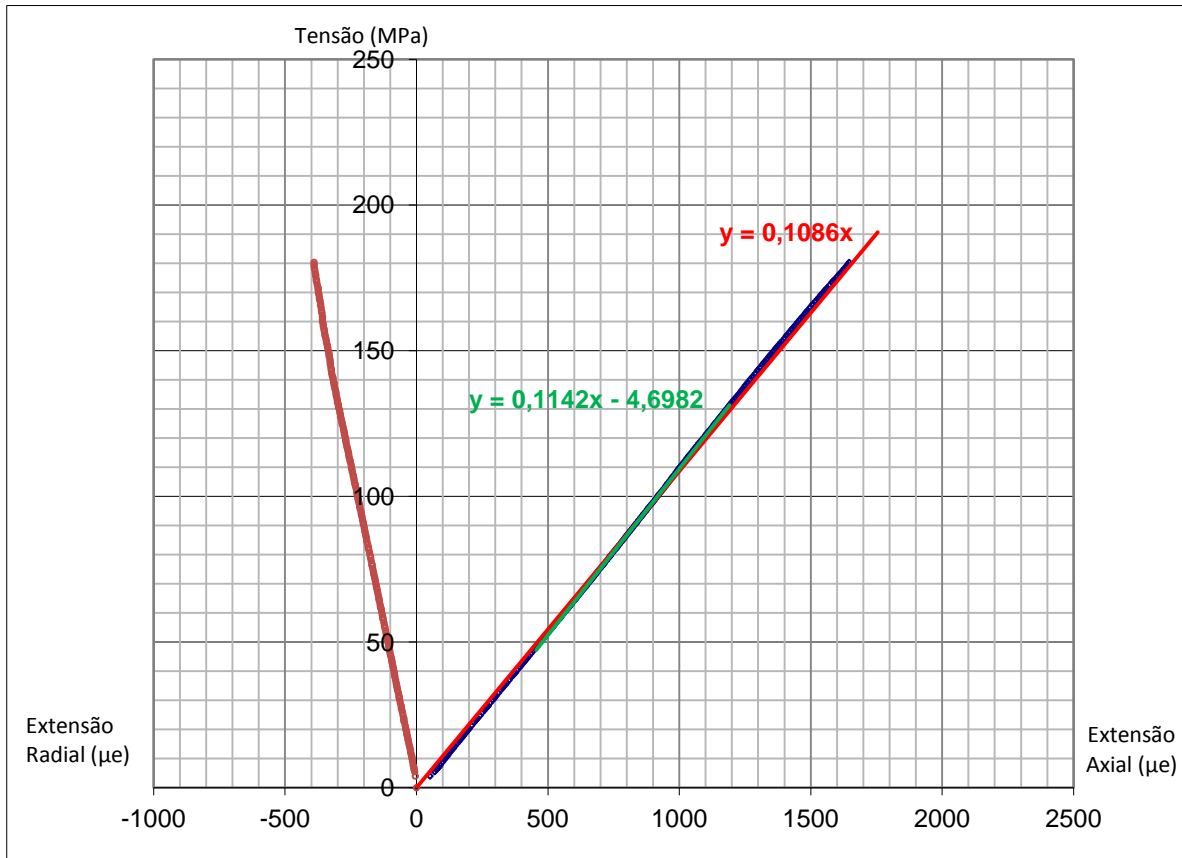
Provete 3



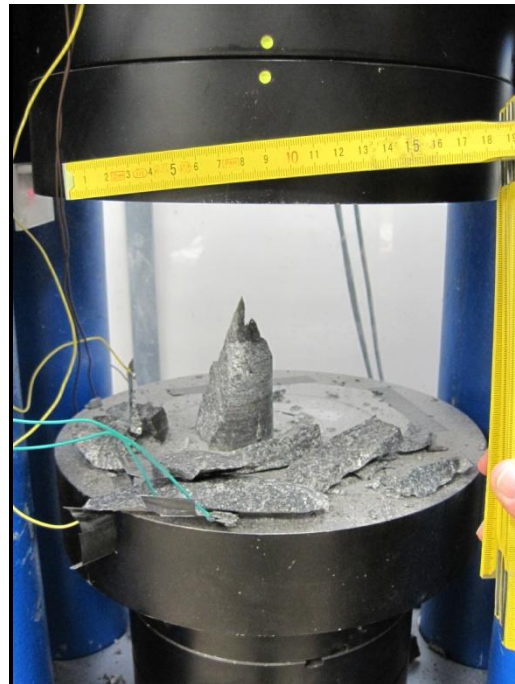
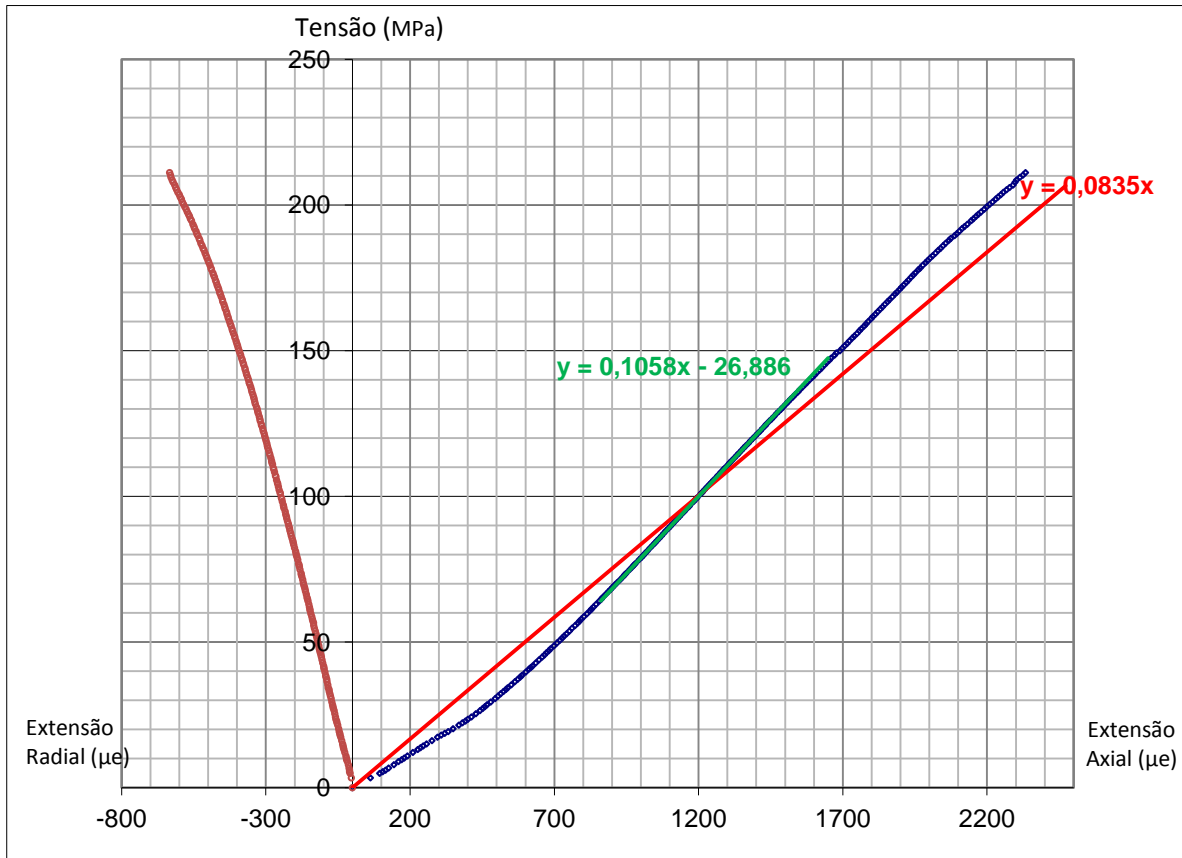
Provete 4



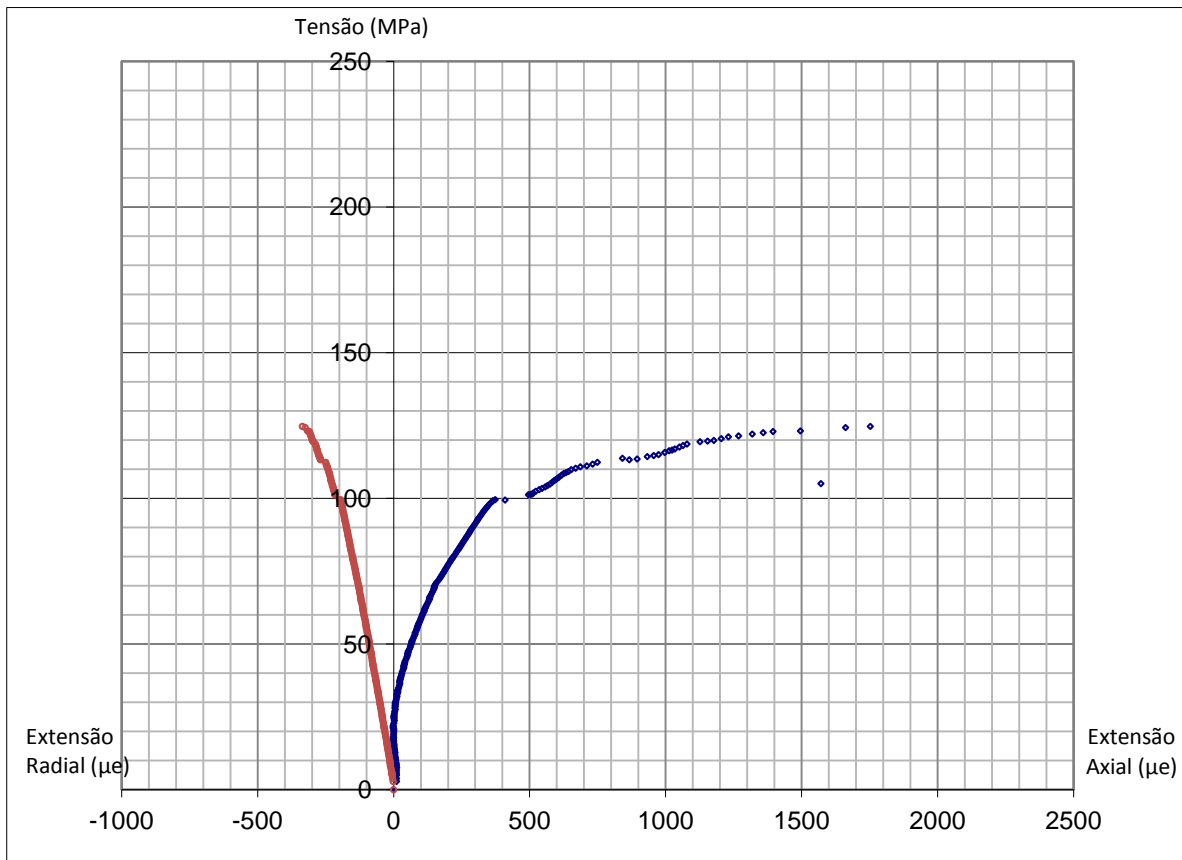
Provete 5



Provete 6

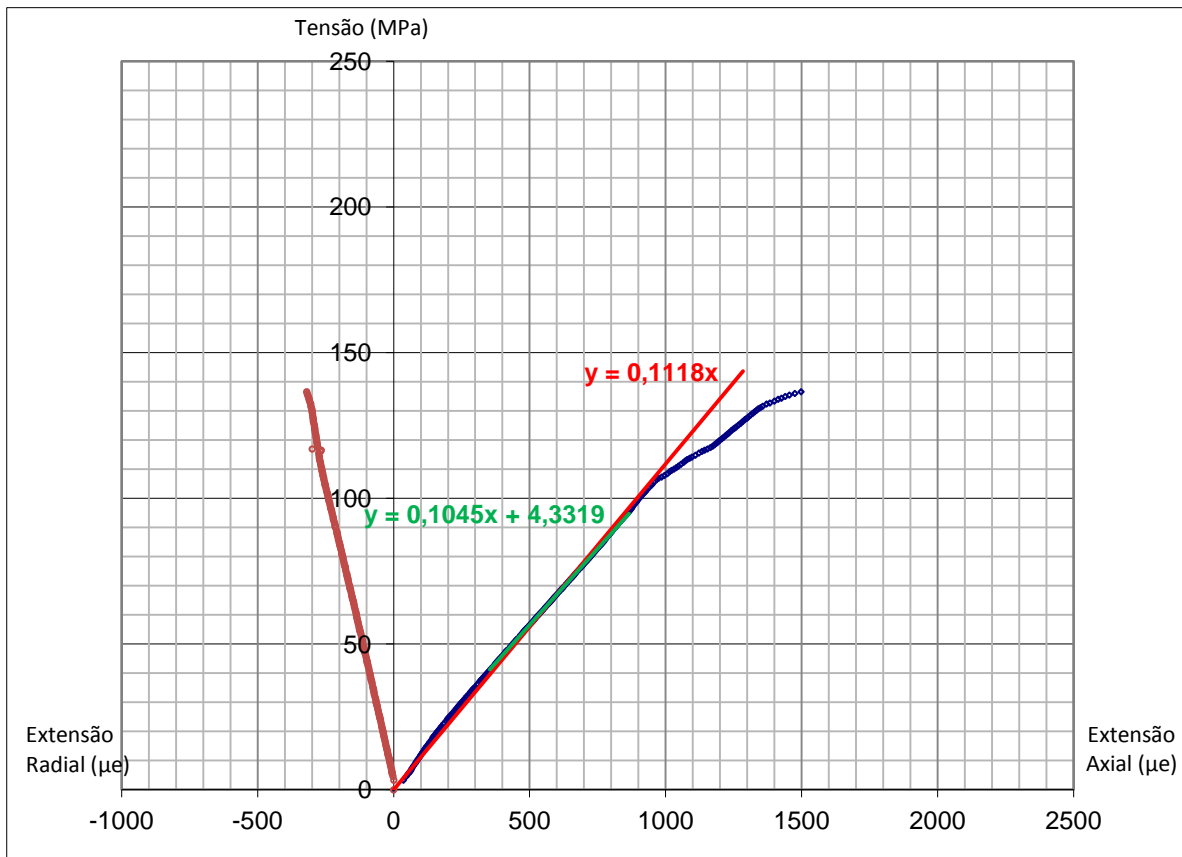


Provete 7

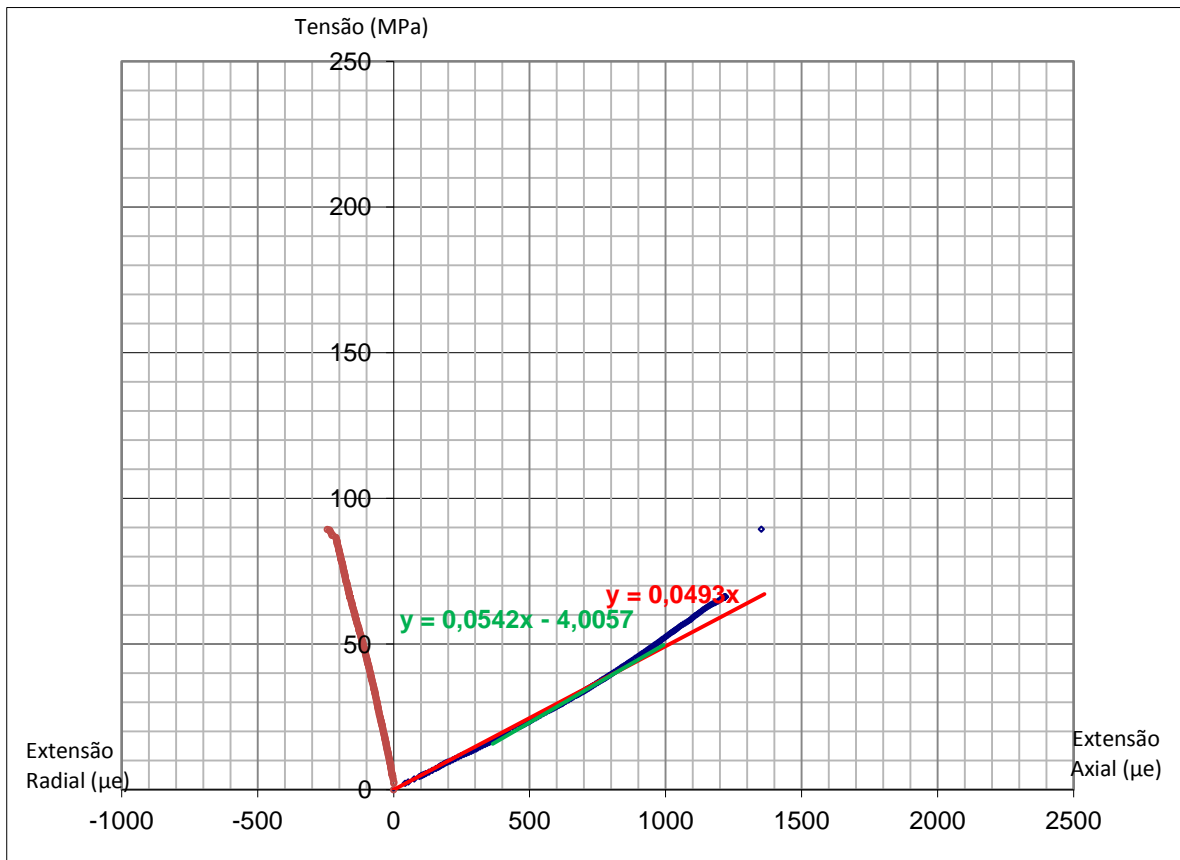


Ponto 4 – Grupo 1

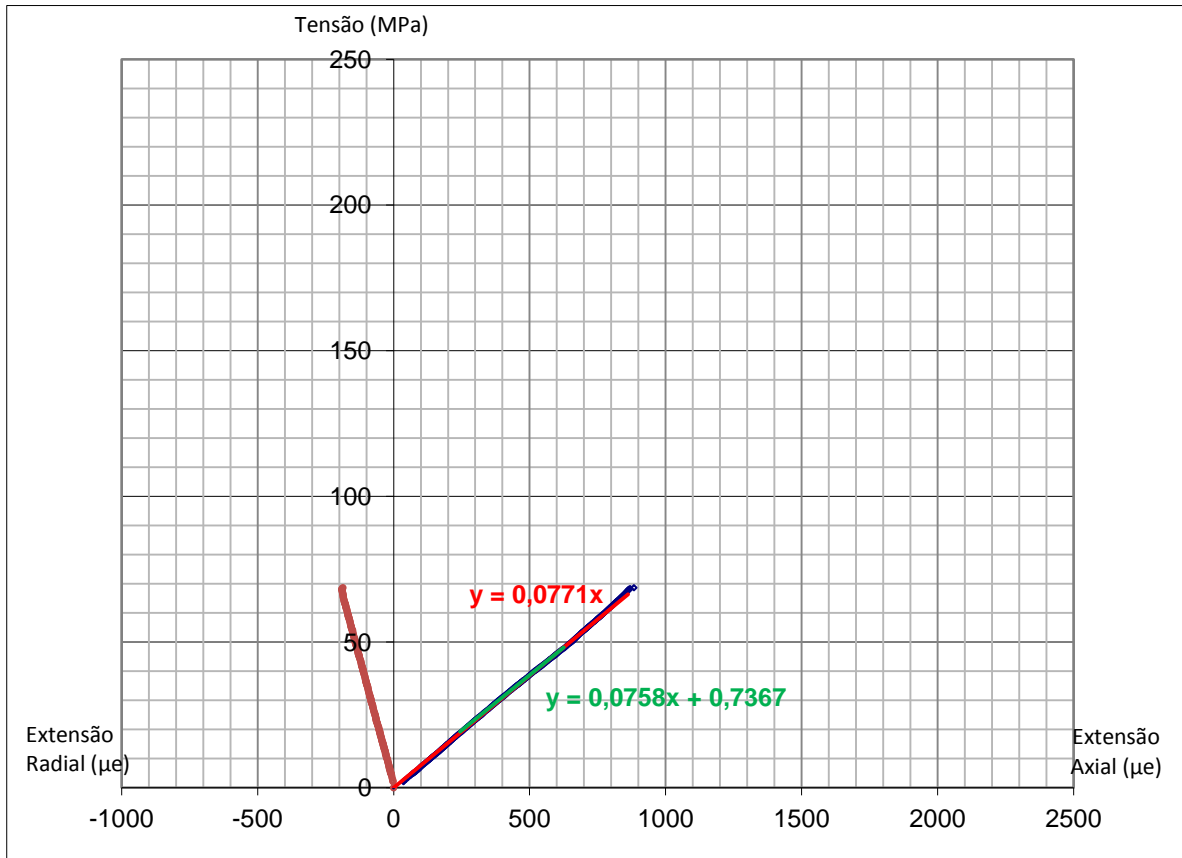
Provete 1



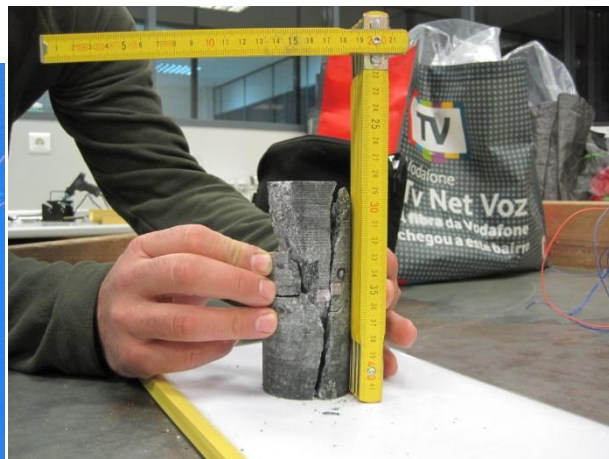
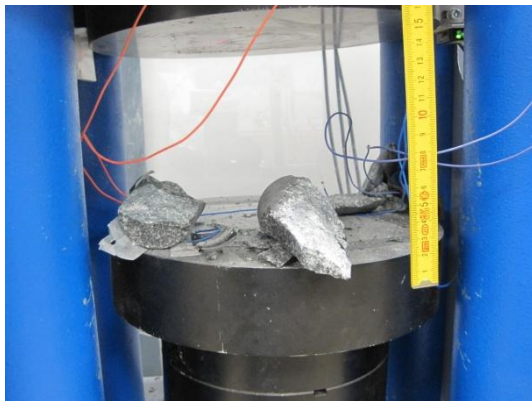
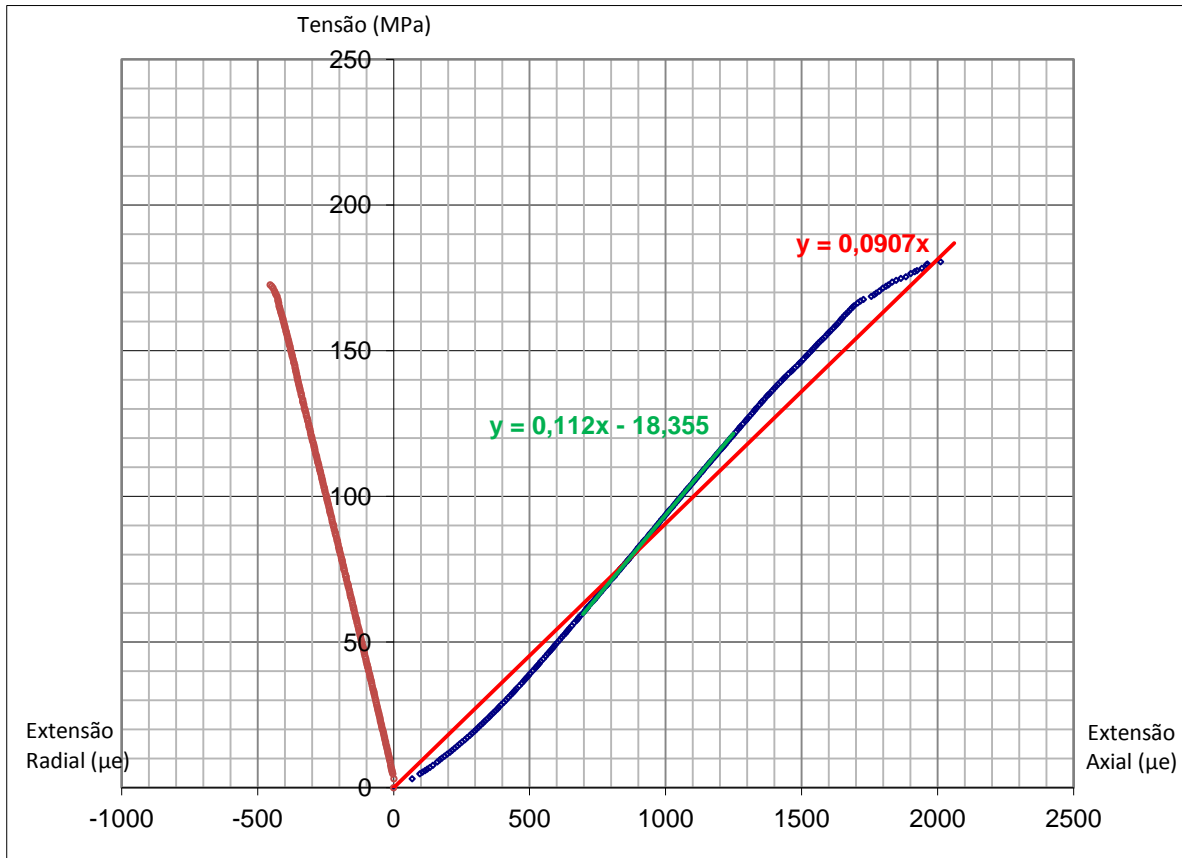
Provete 2



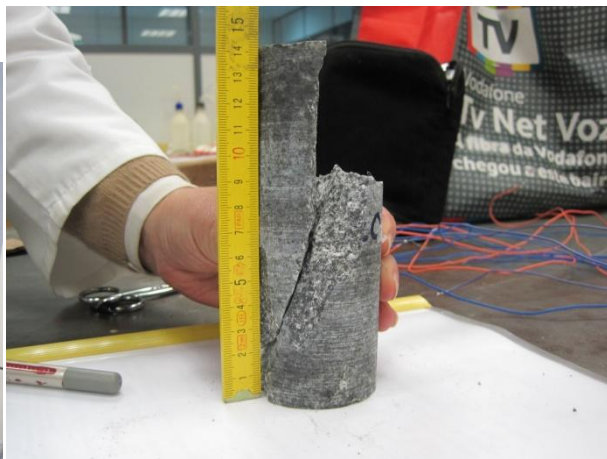
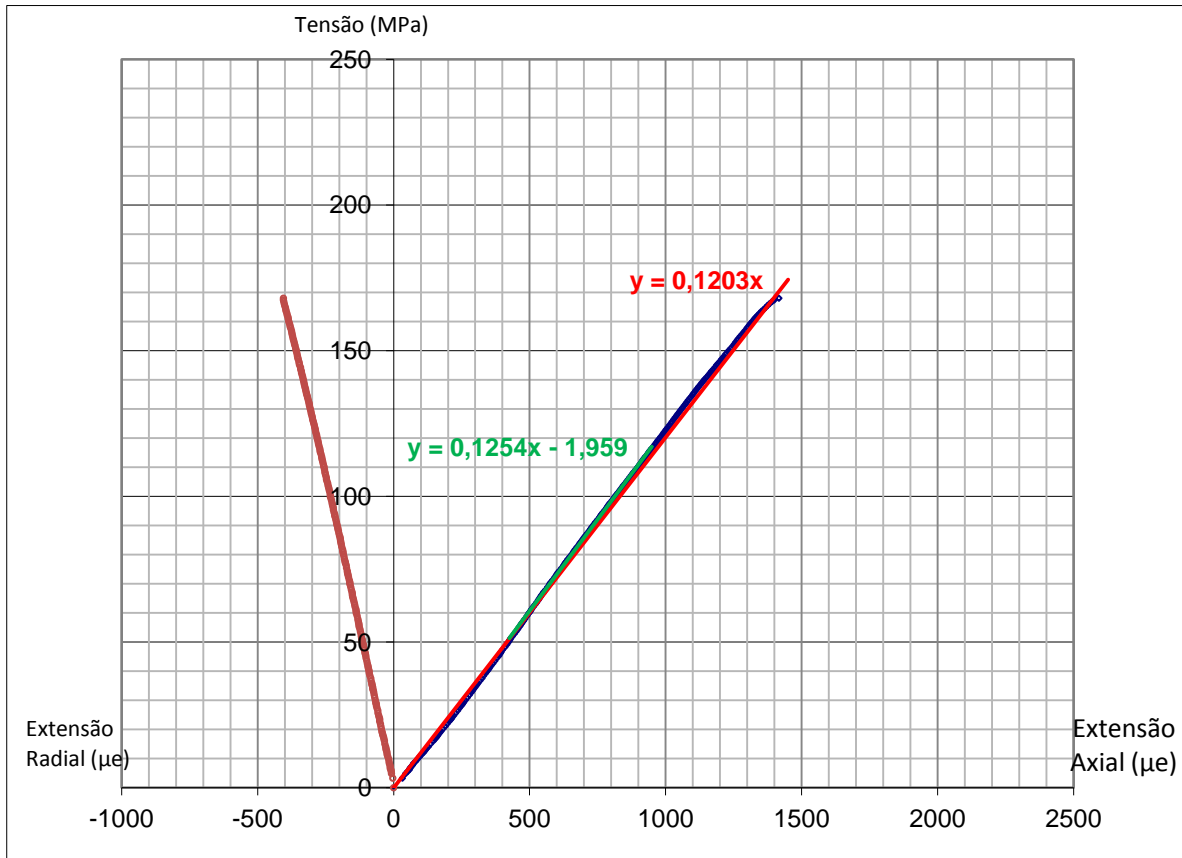
Provete 3



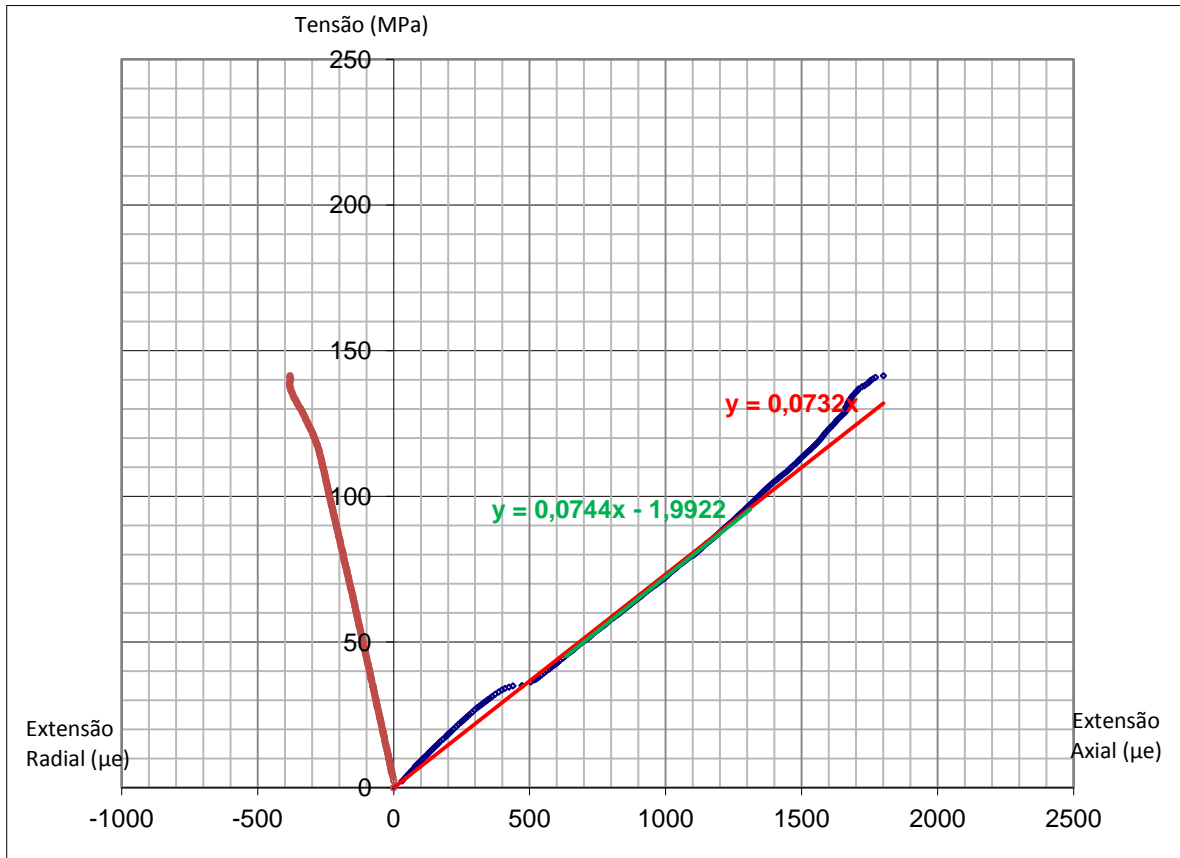
Provete 4



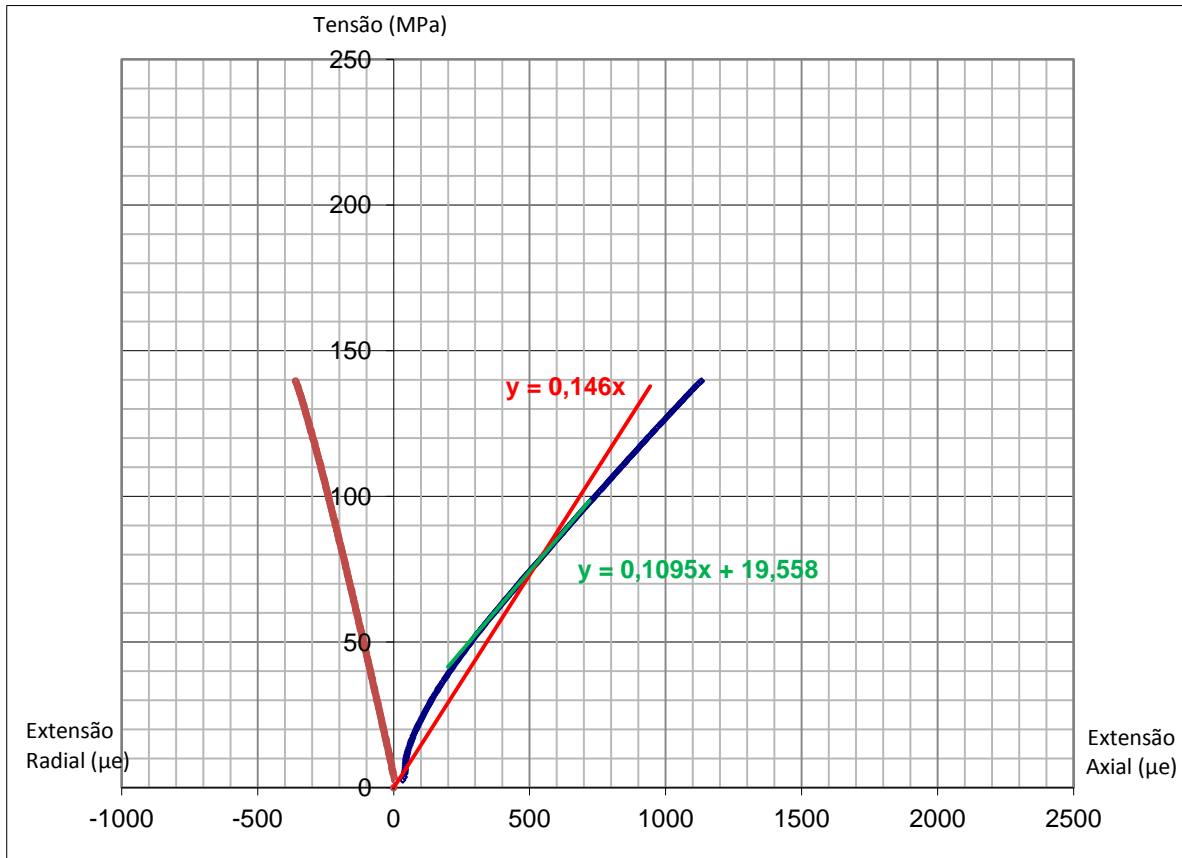
Provete 5



Provete 6

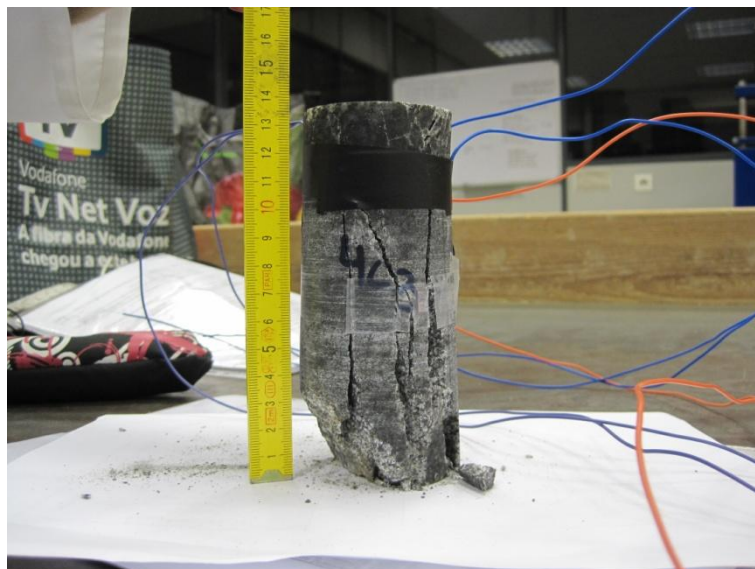
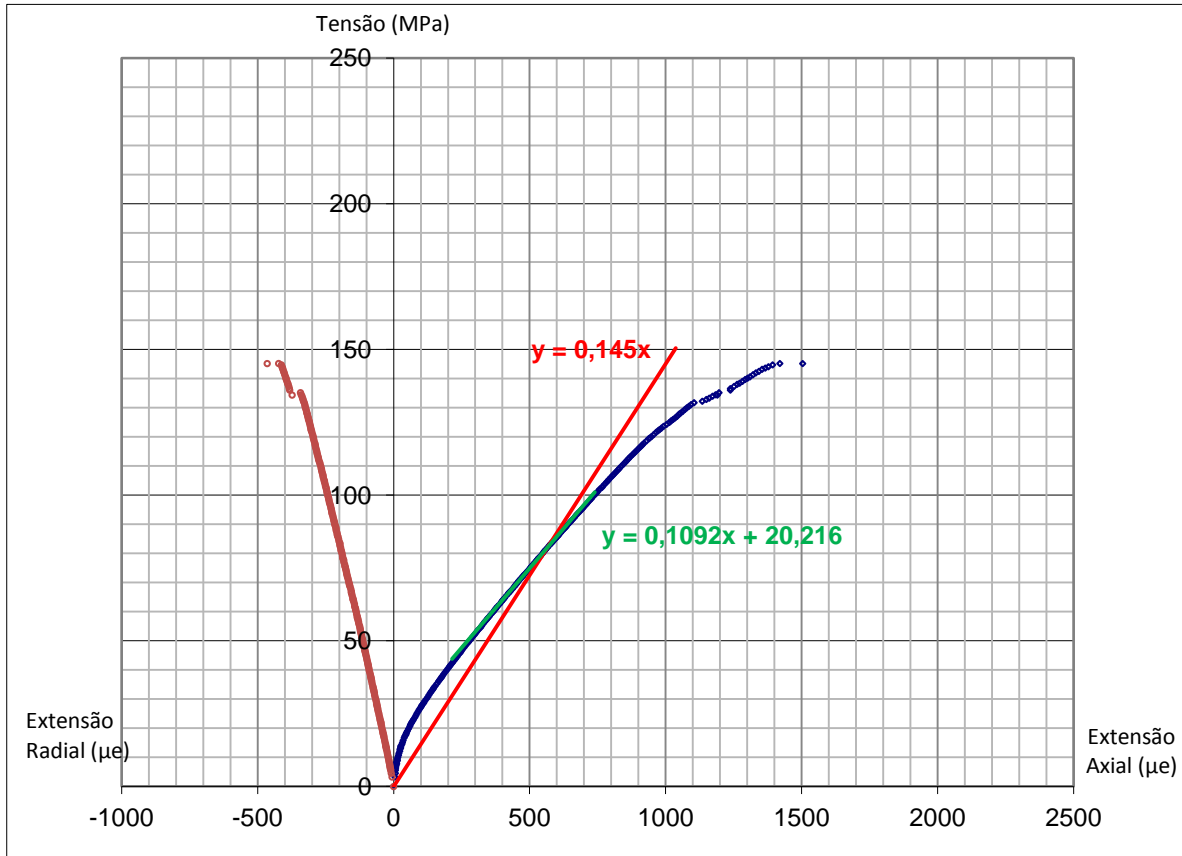


Provete 7

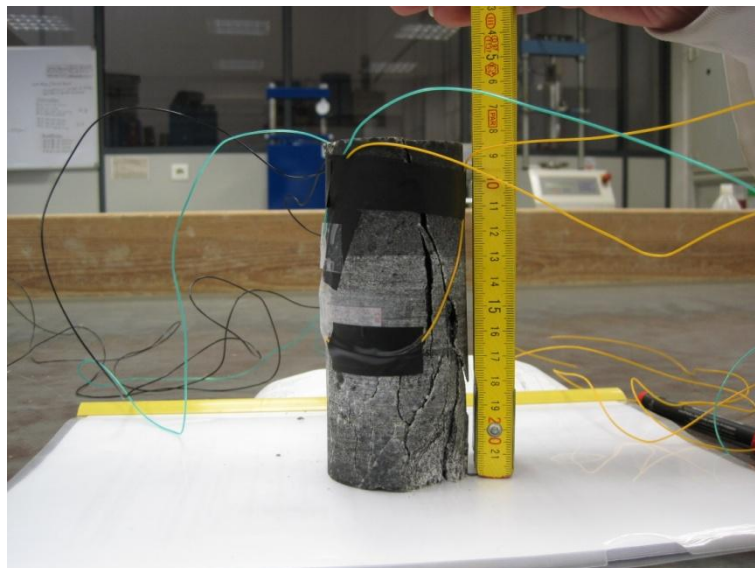
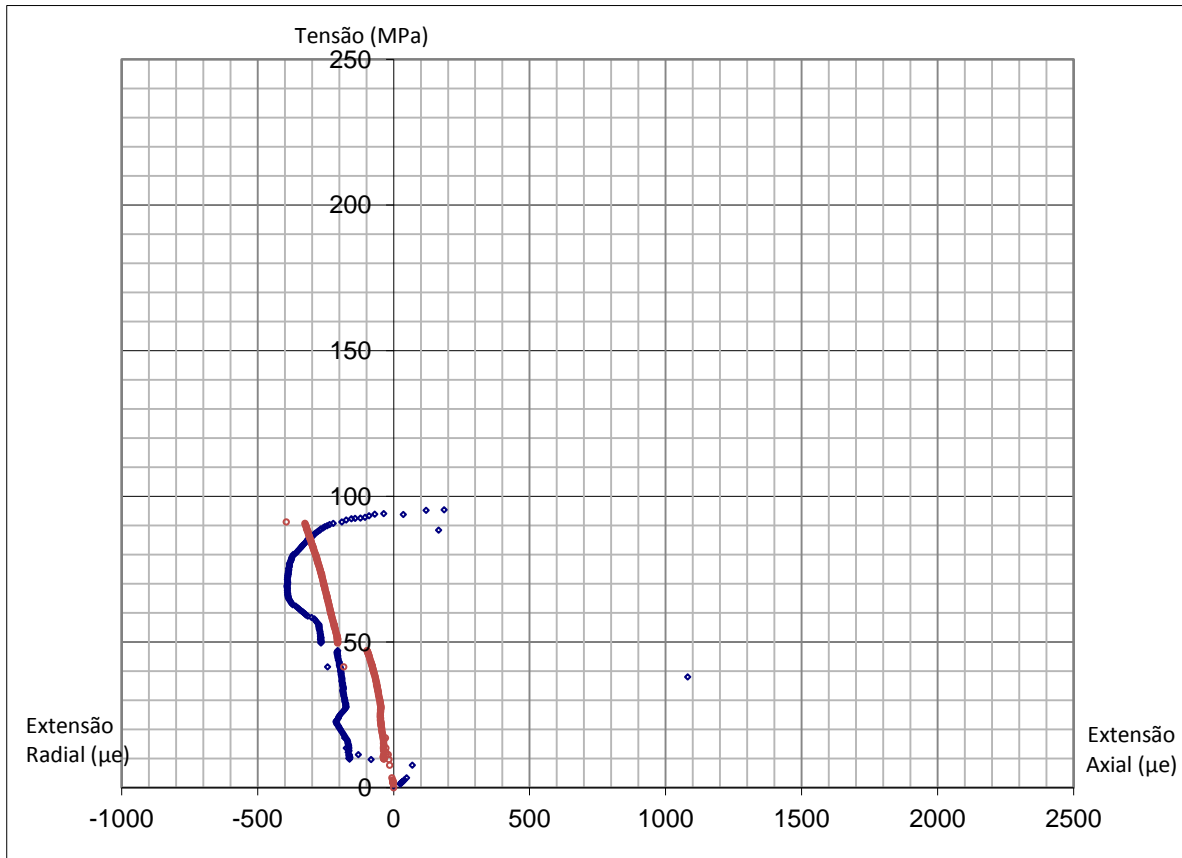


Ponto 4 – Grupo 2

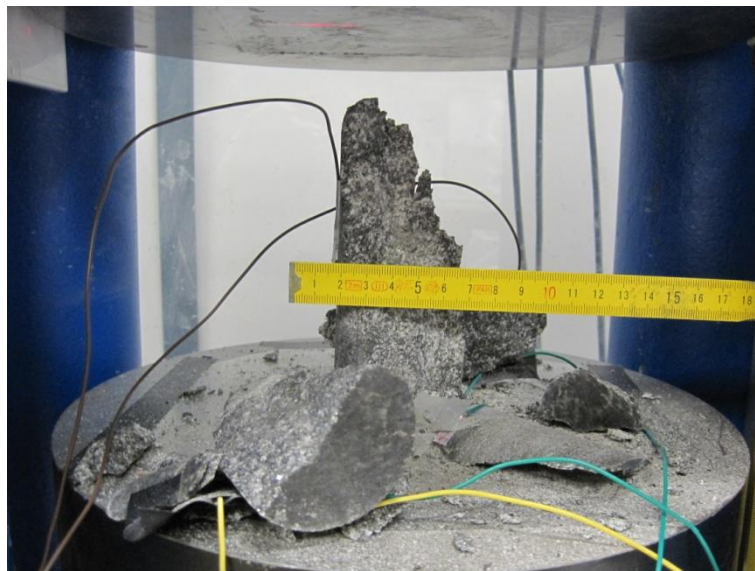
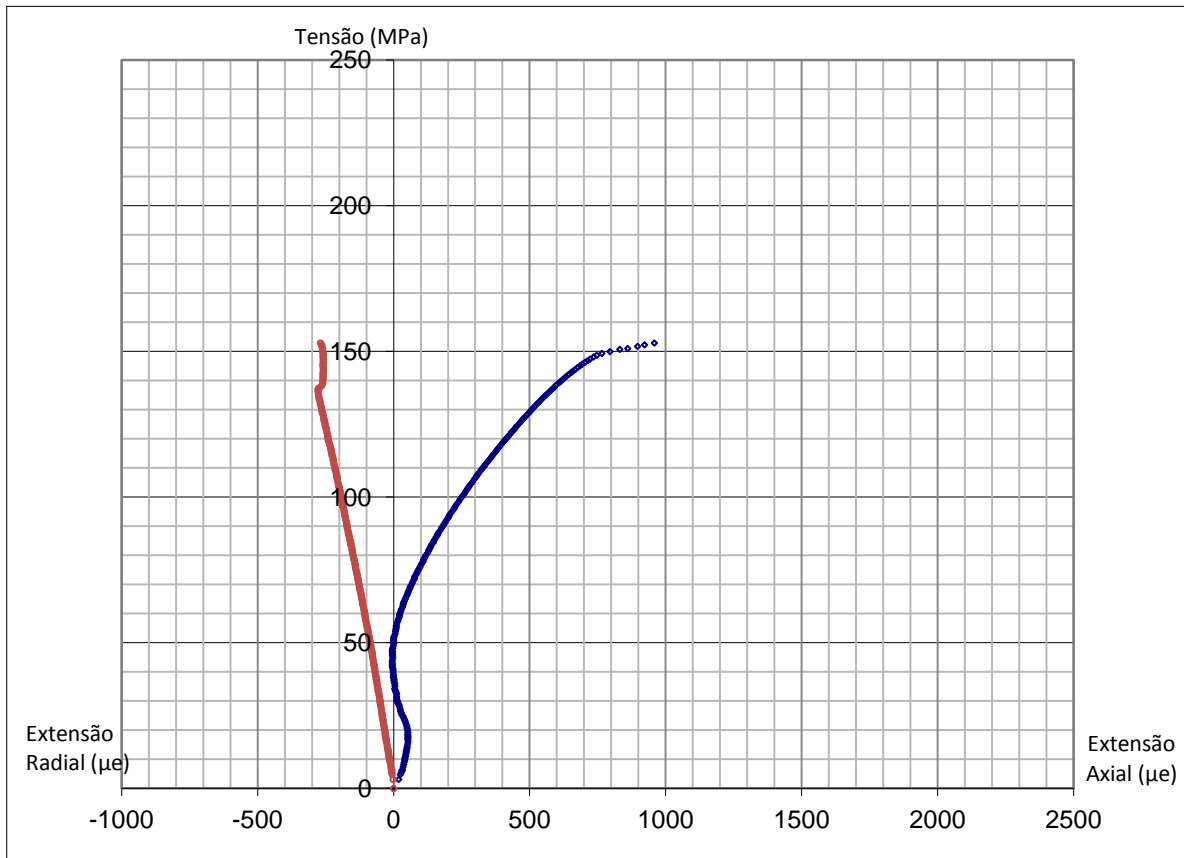
Provete 1



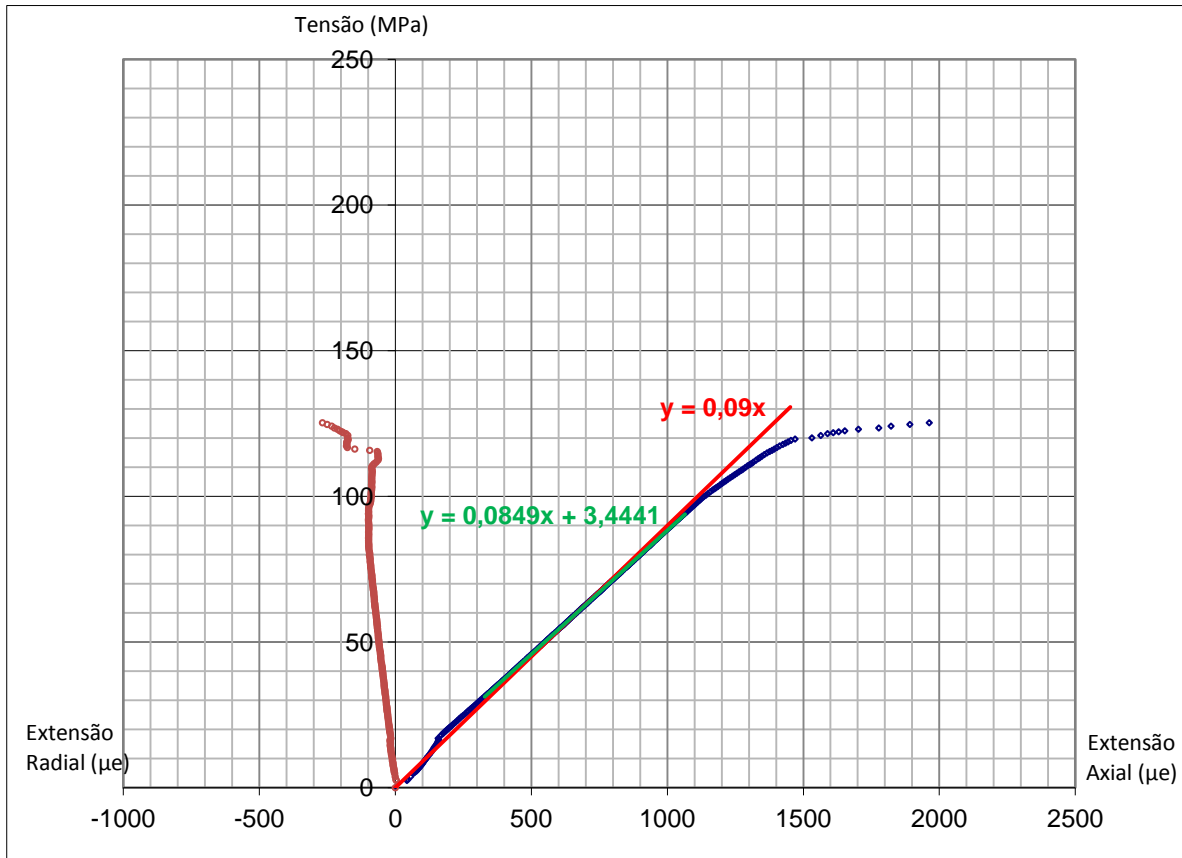
Provete 2



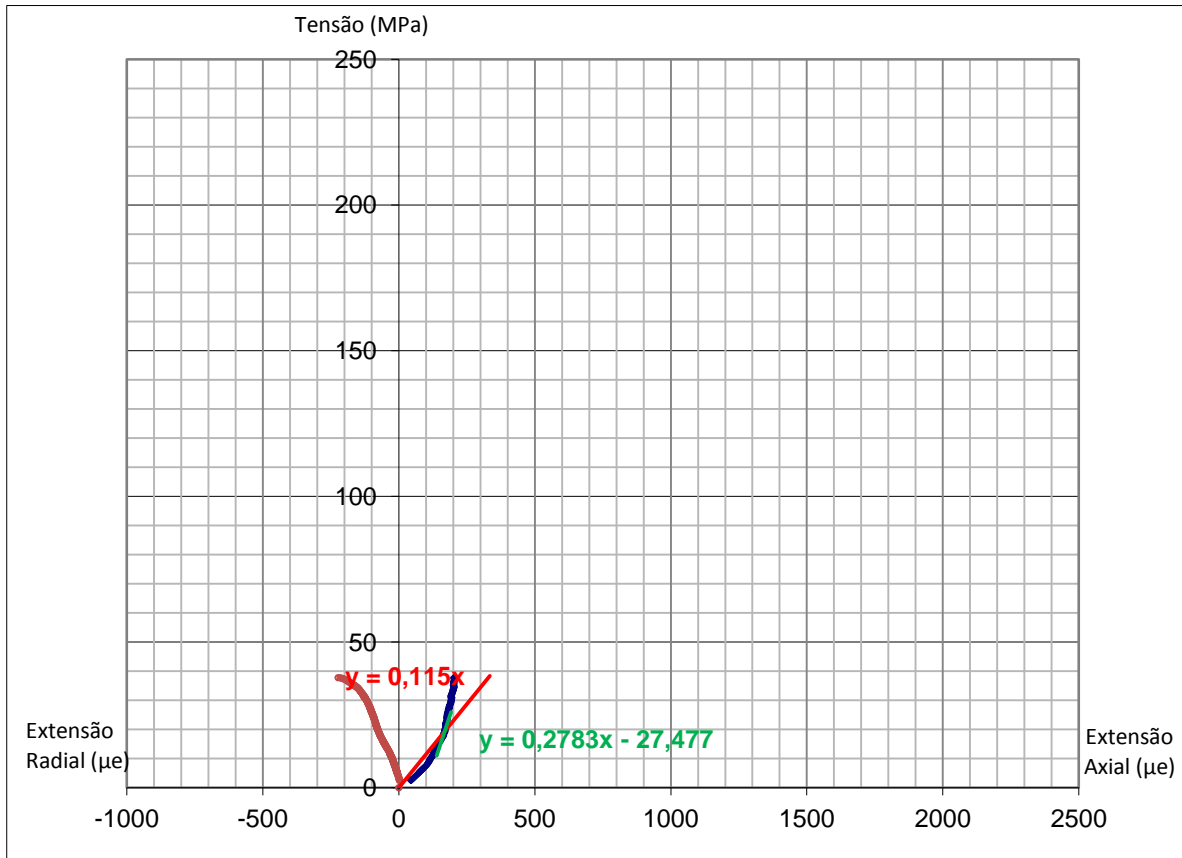
Provete 3



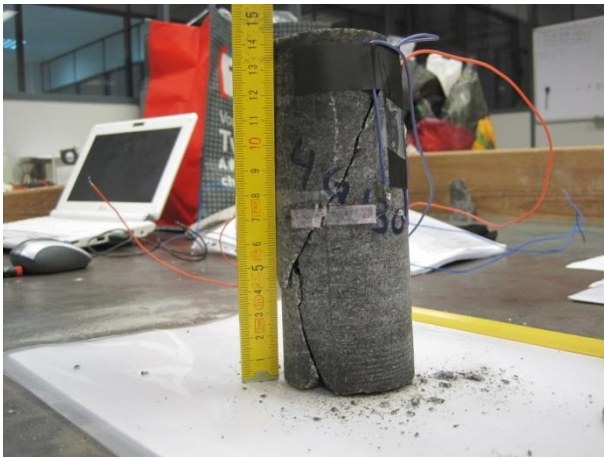
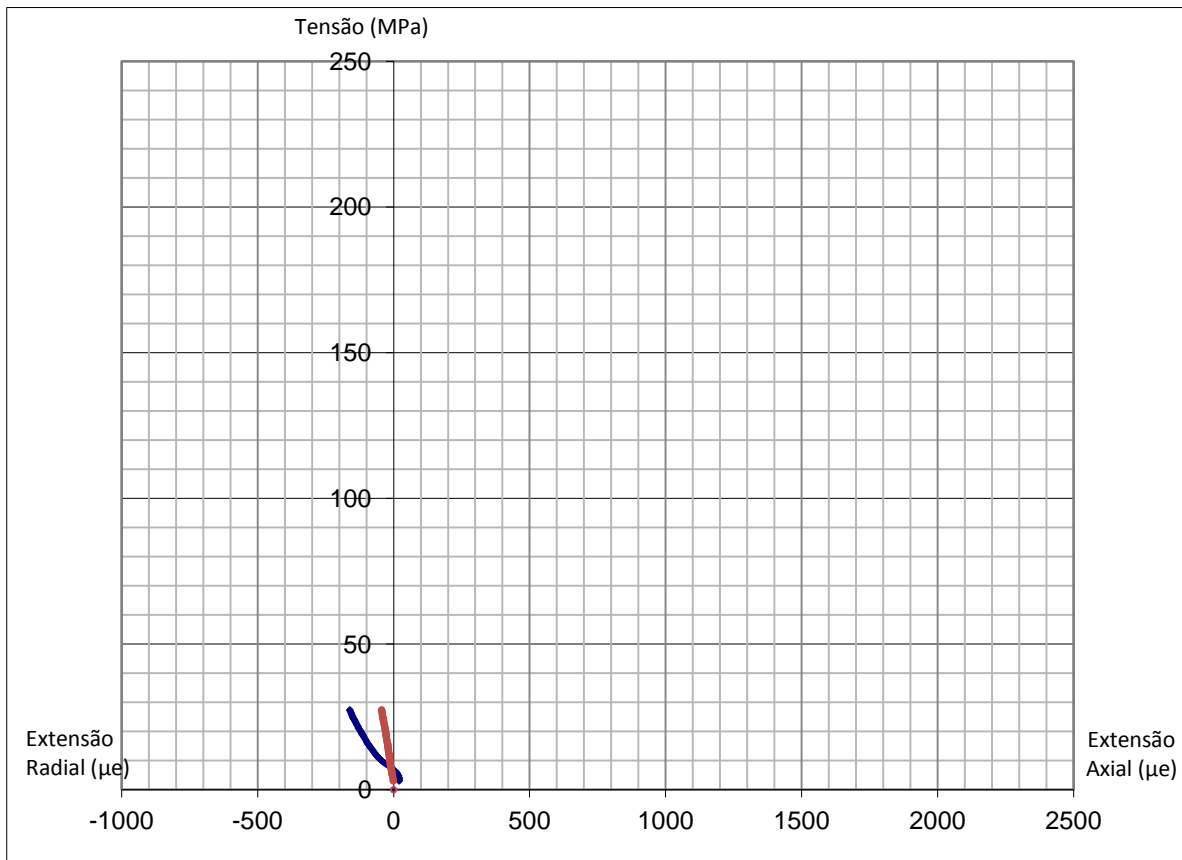
Provete 4



Provete 5



Provete 6



Provete 7

