

## Avaliação da resistência à compressão simples de material-rocha da Curviã: estudo preliminar

CARLOS DANIEL CATARINO DE OLIVEIRA  
Outubro de 2016



# Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

## Avaliação da resistência à compressão simples de material-rocha da Curviã: estudo preliminar

Carlos Daniel Catarino de Oliveira



2016

---

(página propositadamente em branco)



# Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

## Avaliação da resistência à compressão simples de material-rocha da Curviã: estudo preliminar

**Carlos Daniel Catarino de Oliveira**

**1090497**

*Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizada sob a orientação do Professor Doutor Helder I. Chaminé, Professor Coordenador com Agregação do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP e co-orientação do Engenheiro Luís Carlos Ramos, Assistente convidado do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*

---

(página propositadamente em branco)

---

**Presidente**

**Júri**

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé

*Professor Coordenador com Agregação, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva

*Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Doutora Maria Eugénia Oliveira Lopes

*Professora Adjunta, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Doutora Maria José Coxito Afonso

*Professora Adjunta, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Mestre Luís Carlos Correia Ramos

*Director de Produção, Elevo Agregados (Grupo Elevo SA), Porto*

*Assistente convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

---

A tese de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente (MEGG)** foi apresentada e defendida em prova pública, pelo Licenciado **Carlos Daniel Catarino de Oliveira**, no Auditório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Geotécnica (ISEP) em 15 de Novembro de 2016 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **14 (catorze) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.

---

*Dedico esta dissertação a Javé e à minha Mãe...*

---

(página propositadamente em branco)

---

## Agradecimentos

Serve o presente, para agradecer de forma sincera a todos aqueles que, durante a elaboração desta dissertação, deram o seu contributo com o objectivo da conclusão desta. Desta forma, gostaria de expressar em particular, o meu agradecimento:

Ao Professor Helder I. Chaminé (DEG|ISEP), meu orientador, o meu mais sincero obrigado por todo o apoio prestado desde os primeiros anos na licenciatura em engenharia geotécnica e geoambiente até à conclusão do presente ciclo de estudos do mestrado. A sua simpatia, profissionalismo, conhecimento e apoio discreto foram os pilares fundamentais para o sucesso da minha vida académica e todas as palavras de agradecimento não chegariam para mostrar o quanto apreciei e aprendi ao tê-lo conhecido e ter tido o privilégio de ter sido seu aluno. Grato ainda pela revisão cuidada das várias versões do manuscrito e partilha de informação bibliográfica, bem como as discussões desde o trabalho de campo até discussão dos resultados.

Ao Engenheiro Luís Ramos (DEG|ISEP e Grupo Elevo SA), meu co-orientador, expresse o meu profundo agradecimento pelo interesse demonstrado e pelo apoio nas diferentes fases da dissertação. Pela disponibilidade abnegada e pelo tempo despendido na análise e reflexão dos dados, sempre de uma forma clara, simpática, profissional e atenta, o meu mais profundo obrigado. Muito agradecido ainda pelas subtis achegas ao manuscrito e apoio nas várias fases da investigação.

Ao Doutor José Augusto Fernandes (DEG|ISEP), pela celeridade na resolução de alguns problemas com os equipamentos PLT do LGMC|ISEP que foi fulcral para este estudo. À Doutora Maria Eugénia Lopes (DEG|ISEP) e à Doutora Sílvia Spínola (DEG|ISEP) um muito obrigado pela disponibilidade, simpatia e forma como ajudaram a rever alguns conceitos sobre o ensaio de carga pontual. Ao Doutor José Teixeira (LABCARGA|ISEP) grato pela disponibilidade na ajuda do mapeamento GPS dos pontos de amostragem e alguns mapas SIG desta dissertação. À Dra Liliana Freitas (LABCARGA) pelo apoio final em alguns tópicos da dissertação.

Aos Directores do Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA|ISEP) e do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC|ISEP) respectivamente, Doutor Helder I. Chaminé e Doutor José Augusto Fernandes um muito obrigado por toda as facilidades na utilização dos equipamentos e recursos dos laboratórios, peças fundamentais para esta dissertação.

À empresa Secil-Britas SA, muito agradecido pela oportunidade de realização de trabalho de campo e recolha de amostras nas suas instalações da Pedreira da Curviã Nº2.

À empresa GraniBastos Lda uma palavra de agradecimento pela serração das amostras recolhidas em provetes normalizados.

Aos meus colegas João Caldeira e Cláudio Santa pela ajuda preciosa na recolha e preparação das amostras e pela ajuda na realização do ensaio de carga pontual um muito obrigado.

À direcção do Departamento de Engenharia Geotécnica e a todo o corpo docente que me acompanhou durante todo o meu percurso um muito obrigado.

Ao Colegas e Amigos que sempre de forma directa ou indirecta me apoiaram e me ajudaram um forte abraço de agradecimento.

Aos meus Pais, em especial à minha Mãe por todo o apoio e por sempre lutarem para me dar todas as condições para ser um ser humano o mais completo e honrado possível; por todos os ensinamentos e palavras e por serem quem são; à minha Irmã por desde sempre acreditar em mim e ter sido a força motriz por detrás do meu ingresso no Ensino Superior e por todo o apoio incondicional e à minha Rita, um muito obrigado, sem vocês nada disto teria acontecido.

E por fim, mas mais importante, um obrigado a Javé, por toda a graça e ajuda em todos os momentos da minha vida e pelas forças dadas todos os dias, mesmo quando essas pareciam fugir...

---

(página propositadamente em branco)

---

## **Palavras-chave**

Maçiços Rochosos, Material-rocha, Ensaio de resistência à compressão simples, Ensaio de carga pontual

## **Resumo**

Este trabalho centra-se no estudo do maciço rochoso da pedreira da Curviã N.º 2 (Joane, Vila Nova de Famalicão, N de Portugal). Através da caracterização e classificação do material-rocha quanto a sua classe de resistência pretende-se otimizar e valorizar a gestão do georrecurso. Foram seleccionados alguns pontos do maciço rochoso, um da zona de exploração de rocha ornamental e os restante oito da zona de exploração de agregados. Para o estudo da resistência à compressão simples foram utilizadas as técnicas de ensaio de carga pontual e os ensaios com recurso a esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt, tipo L) em laboratório e in situ. Procedeu-se ao tratamento dos dados de amostragem com vista à classificação do maciço conforme a sua resistência. Os dados de resistência à compressão simples foram depois alvo de tratamento estatístico e comparados com uma série de parâmetros do maciço como o grau de alteração, a cota da bancada e a zona geotécnica a que pertencem em articulação com estudos anteriores. Pretende-se que esta metodologia contribua para um melhor conhecimento de maciços rochoso em geral e, em particular, do modelo geotécnico e geomecânico do maciço rochoso da Pedreira de Curviã N.º 2.

---

(página propositadamente em branco)

---

## **Keywords**

Rock masses, Intact Rock, Uniaxial Compressive Strength Test, Point Load Test

## **Abstract**

This work focus on the study of the intact rock of the Curviã N.º 2 quarry (Joane, Vila Nova de Famalicão, North Portugal). The main aim of this study is to optimize and value the georesource, through its characterization and classification concerning its strength parameter. Were selected and studied several points of the rock mass, being one from the zone relative to the ornamental uses and the following eight from the rock for industrial purposes. For the uniaxial compressive strength study not only we used the point load test technics but also tests using portable sclerometer (Schmidt Hammer, Type L) both at the laboratory and investigations in situ. Afterwards, the data was used in order to classify the rock mass strength. In addition, the data were statistical analyzed and compared with a wide range of geotechnical parameters regarding the weathering grade, the elevation's bench and geotechnical zoning defined in previous studies. Using this methodology, we wanted to contribute for a better understanding of the rock masses as a whole and Curviã N.º 2 quarry's rock mass in particular.

---

(página propositadamente em branco)

---

# Índice

1. Introdução.....	3
1.1. Âmbito do trabalho.....	3
1.2. Objectivos .....	3
1.3. Enquadramento e organização da dissertação.....	3
2. Ensaio Geomecânicos para avaliação expedita da resistência à compressão simples .....	7
2.1- Generalidades.....	7
2.2. Ensaio de carga pontual (Point Load Test – PLT) .....	9
2.2.1.Generalidades .....	9
2.2.2. Procedimento de ensaio .....	11
2.2.3. Provetes .....	13
2.2.4. Cálculo.....	13
2.3. Esclerómetro portátil – Martelo de Schmidt .....	19
2.3.1. Princípio de funcionamento.....	19
2.3.2. Registo e tratamento dos dados.....	20
3. Avaliação expedita da Resistência à Compressão em maciços rochosos fracturados: caso de estudo da Pedreira da Curviã.....	29
3.1. Considerações iniciais .....	29
3.2. Enquadramento pedreira SECIL – Curviã nº2 (Joane, Vila Nova de Famalicão) .....	30
3.2.1. Localização .....	30
3.2.2. Acessos.....	31
3.2.3. Rede principal (Estradas Nacionais):.....	31
3.3. Recolha da amostragem .....	34
3.4. Zonamento Geotécnico dos pontos de amostragem .....	36
3.5. Caracterização das amostras .....	39
3.6. Ensaio de carga Pontual – “Point Load Test” (PLT).....	40

---

3.7. - Ensaio com recurso esclerómetro portátil – Martelo de Schmidt .....	77
3.8. Comparação dos resultados.....	79
3.9. Correlação entre os valores de resistência à compressão uniaxial nos diferentes ensaios .....	80
3.10 Análise dos valores de resistência à compressão simples pelos diferentes métodos, em .....	85
cada ponto de amostragem.....	85
3.11. Resistência à compressão simples versus classe de resistência .....	89
3.12. Resistência à compressão simples versus grau de alteração (W).....	91
3.13. Resistência à compressão simples versus zona geotécnica.....	92
3.15 Resistência à compressão simples e cota dos pontos .....	95
4. Conclusões .....	101
5. Referências bibliográficas .....	105

---

## Índice de Figuras

Figura 1 - Equipamento PLT utilizado na presente dissertação (cortesia LGMC ISEP).....	10
Figura 2- Tipos e diâmetros dos ensaios (ISRM, 1985). .....	12
Figura 3 - Validade dos ensaios (ISRM, 1985). .....	13
Figura 4 - Correção do Índice de Resistência à Carga Pontual (ISRM, 1985).....	14
Figura 5 - Gráficos referentes aos factores de correção do PLT (ISRM, 1985).....	15
Figura 6- Ficha de Laboratório para o Ensaio de Carga Pontua .....	17
Figura 7 - Exemplo do Martelo de Schmidt “clássico” ( <a href="http://www.pcte.com.au/original-schmidt-hammer">http://www.pcte.com.au/original-schmidt-hammer</a> ).....	19
Figura 8 - Princípio de funcionamento do esclerómetro portátil (adaptado da ISRM, 2015). ...	20
Figura 9 - Ábaco de Miller (adaptado de ISRM, 2015) .....	23
Figura 10 – Ficha de Laboratório para Ensaio de Esclerómetro Portátil.....	26
Figura 11- Mapa distrital Português e Carta Militar nº70 - Braga (Adaptado IGeoE, 1997). .....	30
Figura 12 - Delimitação da exploração da Pedreira da Curviã (Adaptado do Google Earth Pro) 31	
Figura 13 - Esboço Geológico Regional da área da Pedreira da Curviã nº2 e envolvente (adaptado de Montenegro de Andrade et al., 1986) .....	33
Figura 14- Localização dos pontos de amostragem (imagem aérea adaptada da Google Earth Pro) .....	35
Figura 15 - Maciço do Ponto PLT 4– Pedreira da Curviã nº2 .....	36
Figura 16— Zona de Rocha Ornamental Ponto PLT 1 – Pedreira da Curviã nº2. ....	36
Figura 17— Mapa zonamento geotécnico preliminar da exploração da Curviã, segundo Silva (2014) .....	38
Figura 18- Recolha de amostras do ponto PLT 7– Pedreira da Curviã nº2 .....	39
Figura 19 – Ensaio de Point Load Test nas instalações do Instituto Superior de Engenharia do Porto (LGMC).....	40
Figura 20- Ensaios in situ Pedreira da Curviã nº2. ....	77
Figura 21 - Ensaios Laboratoriais – Instituto Superior de Engenharia do Porto (LGMC ISEP) ...	78
Figura 22 - Correlação entre os Valores de Resistência à Compressão Simples entre o Teste de Carga Pontual e do Martelo Schmidt em Laboratório. ....	80
Figura 23- Correlação entre os Valores de Resistência à Compressão Simples entre Martelo Schmidt em Laboratório e do Martelo Schmidt In Situ.....	81
Figura 24 - Correlação entre os Valores de Resistência à Compressão Simples entre o Teste de Carga Pontual e do Martelo Schmidt In Situ. ....	82
Figura 25 – Gráfico representativo da Análise da UCS por ponto de amostragem .....	86
Figura 26- Resistência à compressão simples dos pontos amostragem (Ensaio PLT).....	87
Figura 27- Resistência à compressão simples dos pontos amostragem (Ensaio Schmidt Laboratório).....	88
Figura 28- Resistência à compressão simples dos pontos amostragem (Ensaio Schmidt in situ) .....	89
Figura 29 - Resistência média de cada classe de resistência. ....	90
Figura 30- Uma proposta do zonamento da resistência .....	91
Figura 31 - -Média da resistência à compressão simples em cada grau de alteração. ....	92
Figura 32 - Resistência à compressão simples média por zona geotécnica.....	94
Figura 33 - Proposta do zonamento geotécnico actualizado da Pedreira da Curviã (Outubro 2016) .....	95
Figura 34 - Média da resistência à compressão simples em intervalos de 20 metros.....	97

---

(página propositadamente em branco)

---

## Índice de Quadros

Quadro 1 - Propriedades índice do maciço e método de determinação (adaptado de González e Vallejo & Fermer., 2002). .....	8
Quadro 2 - Quadro das classes de resistência do maciço rochoso (adaptado da ISRM, 2015)..	21
Quadro 3- Grau de alteração do maciço rochoso (ISRM, 1981; GSE, 1995) .....	22
Quadro 4 - Cota dos Pontos de Amostragem. ....	35
Quadro 5 - Pontos de amostragem e Zona Geotécnica correspondente. ....	37
Quadro 6 - Breve descrição das características petrográficas da rocha (CiCCOPN, 2011). Segundo Silva (2014). ....	39
Quadro 7- Resultados dos Ensaios de Carga Pontual no Ponto de Amostragem 1 .....	41
Quadro 8- Ficha Laboratorial de Ensaio PLT do Ponto de Amostragem 1 .....	43
Quadro 9 - Resultados dos Ensaios de Carga Pontual no Ponto de Amostragem 2 .....	45
Quadro 10 - Ficha Laboratorial de Ensaio PLT do Ponto de Amostragem 2 .....	47
Quadro 11 - Resultados dos Ensaios de Carga Pontual no Ponto de Amostragem 3 .....	49
Quadro 12- Ficha Laboratorial de Ensaio PLT do Ponto de Amostragem 3 .....	51
Quadro 13 - Resultados dos Ensaios de Carga Pontual no Ponto de Amostragem 4 .....	53
Quadro 14- Ficha Laboratorial de Ensaio PLT do Ponto de Amostragem 4 .....	55
Quadro 15 - Resultados dos Ensaios de Carga Pontual no Ponto de Amostragem 5 .....	57
Quadro 16- Ficha Laboratorial de Ensaio PLT do Ponto de Amostragem 5 .....	59
Quadro 17 - Resultados dos Ensaios de Carga Pontual no Ponto de Amostragem 6 .....	61
Quadro 18- Ficha Laboratorial de Ensaio PLT do Ponto de Amostragem 6 .....	63
Quadro 19 - Resultados dos Ensaios de Carga Pontual no Ponto de Amostragem 7 .....	65
Quadro 20- Ficha Laboratorial de Ensaio PLT do Ponto de Amostragem 7 .....	67
Quadro 21 - Resultados dos Ensaios de Carga Pontual no Ponto de Amostragem 8 .....	69
Quadro 22- Ficha Laboratorial de Ensaio PLT do Ponto de Amostragem 8 .....	71
Quadro 23 - Resultados dos Ensaios de Carga Pontual no Ponto de Amostragem 9 .....	73
Quadro 24- Ficha Laboratorial de Ensaio PLT do Ponto de Amostragem 9 .....	75
Quadro 25 - Relação entre o Grau de Alteração, a Resistência à Compressão Simples (PLT) e a Classe de Resistência dos diferentes Pontos de Amostragem.....	77
Quadro 26 - Relação entre a Resistência à Compressão Simples do Martelo Schmidt e Classe de Resistência dos Diferentes Pontos de Amostragem. ....	79
Quadro 27 - Resumo da Resistência à Compressão Simples pelos diferentes métodos dos Pontos de Amostragem. ....	79
Quadro 28 – Quadro -Síntese das Caraterísticas do Maciço - Rochoso.....	83
Quadro 29 - Quadro da Resistência à Compressão Uniaxial nos diferentes pontos de amostragem através dos diversos métodos adoptados. ....	85
Quadro 30 - Classes de Resistência por Pontos de Amostragem.....	89
Quadro 31 - Resistência média de cada classe de resistência .....	90
Quadro 32- Grau de Alteração por Ponto de Amostragem .....	91
Quadro 33 - Média da Resistência à Compressão Simples em cada grau de alteração. ....	92
Quadro 34 - Média da resistência à compressão simples em cada grau de alteração.....	93
Quadro 35 - Média da resistência à compressão simples por zona geotécnica .....	93
Quadro 36 - Cota do Ponto de Amostragem.....	96
Quadro 37 - Média da Resistência à Compressão Simples em intervalos de 20 metros. ....	96

---

## Índice de Equações

Equação 1 - Índice de Resistência à Carga Pontual.....	13
Equação 2 - Fórmula Matemática $I_{S50}$ .....	14
Equação 3 - Expressão numérica de $I_{S50}$ .....	14
Equação 4 - Fórmula Matemática da Distância Equivalente.....	14

---

## Capítulo I – Introdução Geral

---

---

(página propositadamente em branco)

---

## **1.Introdução**

### **1.1. Âmbito do trabalho**

O presente trabalho insere-se na unidade curricular “Dissertação/Estágio/Projecto” do curso de mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente do Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Politécnico do Porto.

A elaboração e defesa pública deste documento, em formato dissertação, são imperativos para a conclusão do segundo ciclo de estudos e consequente obtenção do grau de mestre em engenharia geotécnica e geoambiente.

### **1.2. Objectivos**

Esta dissertação propõe-se estudar a resistência à compressão simples do material-rocha da Pedreira da Curviã nº2 através dos ensaios de carga pontual (PLT – *Point Load Test*) e dos ensaios com recurso a esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt – Proceq, tipo L) em laboratório e *in situ* a um conjunto de provetes normalizados. Pretende-se avaliar a resistência à compressão simples (ISRM) do maciço em 9 pontos de amostragens pré-seleccionados e correlacionar esses dados com a cartografia geotécnica existente na zona (pormenores em Silva, 2014). Desta forma pretende-se obter um refinamento da caracterização geotécnica e geomecânica e um mapeamento das classes de resistência do maciço.

Esse estudo aprofundado da resistência do maciço, aliado ao conhecimento pré-existente das características geotécnicas do mesmo, permitirão um melhor conhecimento das características do maciço rochoso. Além disso, este estudo integra-se na investigação de doutoramento do Engenheiro Luís Ramos em desenvolvimento na FCTUC e no LABCARGA|ISEP.

### **1.3. Enquadramento e organização da dissertação**

Nesta dissertação pretende-se estudar a resistência à compressão simples do material-rocha maciço da Pedreira da Curviã e classificá-lo quanto à sua classe de resistência. Para tal foram escolhidos 9 pontos da pedreira, sendo que 1 deles pertencente à zona onde actualmente se extrai rocha para fins ornamentais e os restantes 8 são referentes à zona de exploração para produção de agregados. Os pontos foram escolhidos e mapeados com recurso ao GPS (no sistema ETRS 1989 Portugal TM06).

---

Em cada ponto de amostragem foram realizados ensaios de esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt) *in situ* e posteriormente em laboratório com as amostras recolhidas e serradas segundo os parâmetros normalizados pela ISRM (1985).

De cada uma das zonas resultaram 11 provetes normalizados, os quais foram submetidos aos ensaios de carga pontual e esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt).

O tratamento dos dados consistiu na conversão dos parâmetros de carga pontual e de resistência do martelo em valores de resistência à compressão simples de forma a classificar o material-rocha em classes de resistência.

Foi tida em consideração o zonamento geotécnico preliminar do maciço rochoso da Curviã (Silva, 2014). Correlacionada essa classificação com os dados do presente estudo, conseguiu-se aprimorar o estudo geotécnico-geomecânico do maciço da Pedreira da Curviã.

Esta dissertação está organizada com a seguinte estrutura:

Capítulo I - Introdução geral ao tema, Capítulo II - Ensaio geomecânico para avaliação expedita da resistência à compressão simples, Capítulo III - Avaliação expedita da resistência à compressão em maciços rochosos fracturados: o caso de estudo da Pedreira da Curviã e Capítulo IV – Conclusões.

---

**Capítulo II – Ensaio Geomecânicos para avaliação expedita da resistência**

---

---

(página propositadamente em branco)

---

## **2. Ensaaios Geomecânicos para avaliação expedita da resistência à compressão simples**

### **2.1- Generalidades**

A mecânica das rochas ocupa-se do estudo teórico-prático das propriedades e comportamento mecânico dos materiais rochosos mediante as forças aplicadas em seu redor (Vallejo et al., 2002). O estudo das rochas, agregado natural, formado por um ou mais minerais, constituintes da crosta terrestre que podem ser de gênese ígnea, sedimentar ou metamórfica, dá lugar em Engenharia ao estudo dos maciços rochosos.

Um maciço rochoso é constituído por duas parcelas, um meio sólido ou rocha intacta designada por matriz rochosa e pelas suas descontinuidades, que compartimentam o maciço rochoso. As descontinuidades actuam como superfícies de fraqueza, separando blocos da “rocha intacta” e influenciando os processos de deformação e ruptura do maciço rochoso.

Se por um lado a presença de descontinuidades confere uma natureza descontínua aos maciços rochosos, por outro lado a presença sistemática destes com determinada orientação implica um comportamento anisotrópico.

Outro factor de realce é a heterogeneidade ou variabilidade das propriedades físicas e mecânicas do maciço, em zonas distintas ou do ponto a ponto. Os factores associados à heterogeneidade de um maciço e a sua variação traduzem-se na prática pela dispersão dos resultados relativos às propriedades determinadas em testes aos quais as amostras do corpo rochoso são submetidas (Vallejo et al., 2002).

A caracterização das rochas e dos maciços rochosos e o estudo do seu comportamento mecânico e deformacional são complexos devido à grande variedade de características e propriedades e o elevado número de factores que as condicionam.

As propriedades físicas dos maciços como a composição mineralógica, a densidade, a porosidade, a permeabilidade ou a dureza, controlam as características da resistência e deformabilidade da matriz rochosa e são resultado da gênese e dos processos geológicos e tectónicos sofridos pela rocha ao longo do tempo.

No comportamento mecânico dos maciços rochosos, têm influência também as características geológicas como a litologia, a estratigrafia, a estrutura geológica, as descontinuidades ou o estado de tensões. A resposta mecânica do maciço é função também de outros factores como condições hidrogeológicas e as condições ambientais que, ao actuarem sobre o meio geológico, dão lugar a processos de alteração e meteorização alterando as características iniciais do material-rocha.

Assim, à superfície, as descontinuidades e a meteorização têm um papel importante no comportamento mecânico do maciço, sendo que em profundidade esse comportamento é influenciado principalmente pelo estado de tensões pré-existentes.

A maior ou menor influência dos blocos da matriz rochosa no comportamento global do maciço depende das propriedades dos componentes e do número e natureza das descontinuidades.

Existem vários parâmetros que se utilizam na identificação e descrição quantitativa das propriedades básicas da rocha e permitem obter uma classificação com fins geotécnicos. Estas propriedades, designadas propriedades índice, serão as que determinam, em primeira instância e juntamente com a composição mineralógica e o tecido rochoso, as propriedades e o comportamento mecânico da matriz rochosa.

O quadro 1 descreve algumas propriedades índice e o seu método de determinação que consideramos relevantes para uma maior compreensão desta temática.

Quadro 1 - Propriedades índice do maciço e método de determinação (adaptado de González e Vallejo & Fermer., 2002).

	<b>Propriedades</b>	<b>Método de determinação</b>
<b>Propriedades de identificação e classificação</b>	Composição mineralógica	Descrição visual
	Textura	Microscopia óptica e electrónica
	Tamanho do grão	Raio-X
<b>Propriedades mecânicas</b>	Resistência compressão simples	Ensaio de compressão uniaxial
		Ensaio de carga pontual
		Martelo de Schmidt
	Resistência à tracção	Ensaio tracção directa/indirecta
	Resistência	Ensaio de compressão triaxial
	Deformabilidade	Ensaio de compressão uniaxial
Ensaio de velocidade sónica		

O objectivo deste trabalho consiste em aferir a resistência à compressão simples do maciço da Pedreira da Curviã N.º2 através do levantamento e caracterização de nove pontos distintos do

---

mesmo de forma a refinar a classificação geotécnica/geomecânica do local e comparar a resistência à compressão simples com as características do maciço..

A resistência à compressão simples será determinada recorrendo a ensaios de Martelo de Schmidt e a ensaios de carga pontual em provetes (ISRM, 1985, 2015).

## **2.2. Ensaio de carga pontual (Point Load Test – PLT)**

### **2.2.1. Generalidades**

A determinação da resistência à compressão simples da rocha recorrendo a ensaios de compressão uniaxial é uma tarefa que requer especiais e morosos cuidados na preparação das amostras e condução dos ensaios.

Em certos casos, o número de ensaios requeridos para determinar as propriedades de um vasto leque de tipos de rocha referentes a um projecto pode assumir um valor extremamente elevado. Todavia, existem outros casos em que a resistência à compressão simples e o comportamento tensão-deformação não necessita de ser estudado em detalhe, bastando o conhecimento aproximado do valor da resistência de pico.

Nestas circunstâncias, haverá vantagem em recorrer a ensaios bastante mais simples e económicos que o ensaio de compressão uniaxial, desde que os resultados destes possam fornecer índices correlacionáveis com a resistência à compressão das rochas (ISRM, 1985). Um método alternativo de aferir a resistência à compressão simples das rochas consiste na determinação do Índice de Resistência ou Índice de Carga Pontual através do designado Ensaio de Carga Pontual (“Point Load Test”).

O Ensaio de Carga Pontual foi concebido como um ensaio de referência para classificação da resistência das rochas e pode ser estreitamente correlacionável com a resistência à compressão uniaxial bem como outros índices de resistência. Este ensaio conduz, em termos genéricos, à determinação de dois índices, a saber: i) o Índice de Resistência à Carga Pontual,  $I_{s(50)}$  e ii) o Índice de Anisotropia,  $I_{a(50)}$ , de carga pontual.

De uma forma geral, este método consiste em levar à rotura amostras de rocha através de uma carga concentrada entre duas ponteiros cónicas, quer sob a forma de blocos prismáticos quer sob a forma de blocos cilíndricos ou de forma irregular, sendo que a direcção de aplicação da carga pode ser axial ou diametral (figura 1). O equipamento do ensaio PLT a utilizar, quer em laboratório quer no campo, é constituído no seu essencial por um sistema de aplicação de carga

---

sem interrupção, um sistema de medição da força ( $P$ ) e um sistema de medição da distância ( $D$ ), entre duas ponteiros, em regra, cónicas através das quais é aplicada a carga.



Figura 1 - Equipamento PLT utilizado na presente dissertação (cortesia LGMC|ISEP).

O sistema de carga deve ser tal que permita romper os provetes de rocha com resistências na ordem dos 50  $kN$  e também deverá permitir o ensaio de provetes de tamanho variável, que poderão ir desde os 15 aos 100  $mm$ . A máquina de ensaio deverá ser concebida de modo que as ponteiros cónicas que transmitem a carga aos provetes deverão ser indeformáveis e, assim, manter-se devidamente alinhadas durante o ensaio.

Uma das consequências directas desta condição é a exigência de rigor e rigidez por parte da máquina. Tanto o sistema de medição de carga como o sistema de medição da distância entre ponteiros deverão ter uma precisão de  $\pm 2\%$ . O sistema de medição da distância entre as ponteiros cónicas, permite a medição da distância  $D$ , através de uma leitura directa da escala. Independentemente do tamanho da amostra ensaiada, as medições de  $D$  devem ter, tal como referido, uma precisão de  $\pm 2\%$ . Para que a precisão de leituras não seja prejudicada pelos respectivos ensaios, o sistema terá de ser, suficientemente, resistente aos choques e às vibrações.

O sistema de medição deverá permitir uma verificação do "zero deslocamento" quando as duas ponteiros estão em contacto. É necessário um instrumento calibrador (paquímetro) ou uma régua de aço, para medir a largura ( $W$ ) de todas as amostras a ensaiar. O equipamento de ensaio deve ser calibrado periodicamente por meio de um certificado, independentemente da carga celular, e por um conjunto de blocos de deslocamento ( $P$  e  $D$ ), bem como a realização de leituras ao longo de toda a gama de cargas e medição dos deslocamentos pertinentes dos ensaios. O

---

ensaio tem um procedimento recomendado pela *International Society for Rock Mechanics* (ISRM, 1985).

### 2.2.2. Procedimento de ensaio

Consoante as características dos provetes, o eixo escolhido para a aplicação da força, o tipo de rocha a ensaiar e a maior ou menor anisotropia evidenciada pela rocha, define-se o tipo de ensaio a efectuar. De uma forma sucinta podemos distinguir três tipos de ensaios (ISRM, 1985), a saber (figura 2):

#### i) **Ensaio diametral**

Este tipo de ensaio é realizado sobre provetes nas quais a relação comprimento/diâmetro é superior a um. O provete deve ser colocado na máquina de ensaio para que a distância entre os pontos de contacto das ponteiros cónicas e a extremidade livre mais próxima seja pelo menos 0,5 vezes o diâmetro do provete. Regista-se o valor da distância entre ponteiros  $D$  e o valor da carga de rotura  $P$ .

Os ensaios cuja superfície de rotura não passe pelos dois pontos de contacto das ponteiros cónicas devem ser rejeitados. Deve-se, por fim, realizar pelo menos 10 ensaios por amostragem em rochas homogéneas e mais de 10 ensaios em rochas anisotrópicas ou heterogéneas.

#### ii) **Ensaio axial**

No ensaio axial também são usados provetes cuja relação comprimento/diâmetro varia entre 0,3 e 1. Os provetes compridos podem ser ensaiados diametralmente de forma a produzirem novos provetes com dimensões adequadas para serem ensaiados axialmente.

O provete é colocado na máquina de ensaio, de modo a que o eixo de ensaio coincida com o eixo perpendicular às faces planas da amostra. Se por um lado, o caso de amostras rochas isotrópicas, o eixo de ensaio coincide com o eixo do cilindro, por outro, no caso de amostras anisotrópicas é perpendicular aos planos de descontinuidade.

Devem-se realizar, pelo menos, 10 ensaios por amostragem em rochas homogéneas e mais de dez ensaios em rochas anisotrópicas ou heterogéneas. Regista-se o valor da distância entre ponteiros ( $D$ ), a largura do provete ( $W$ ) perpendicular à direcção de carga (com uma precisão de  $\pm 5\%$ ) e o valor da carga ( $P$ ).

### iii) Ensaio em blocos e em fragmentos irregulares

Nestes ensaios, são utilizados provetes com formas irregulares desde que a relação entre a distância das ponteiros cónicas e largura do provete varie entre 0,3 a 1, de preferência, um valor próximo da unidade. A carga deve ser aplicada a uma distância superior a 0,5 vezes a largura do provete. O provete é colocado na máquina de ensaio, devidamente centrado e anotam-se a distância entre ponteiros ( $D$ ), a menor dimensão do provete perpendicular ao eixo de ensaio ( $W$ ) e a carga de rotura ( $P$ ).

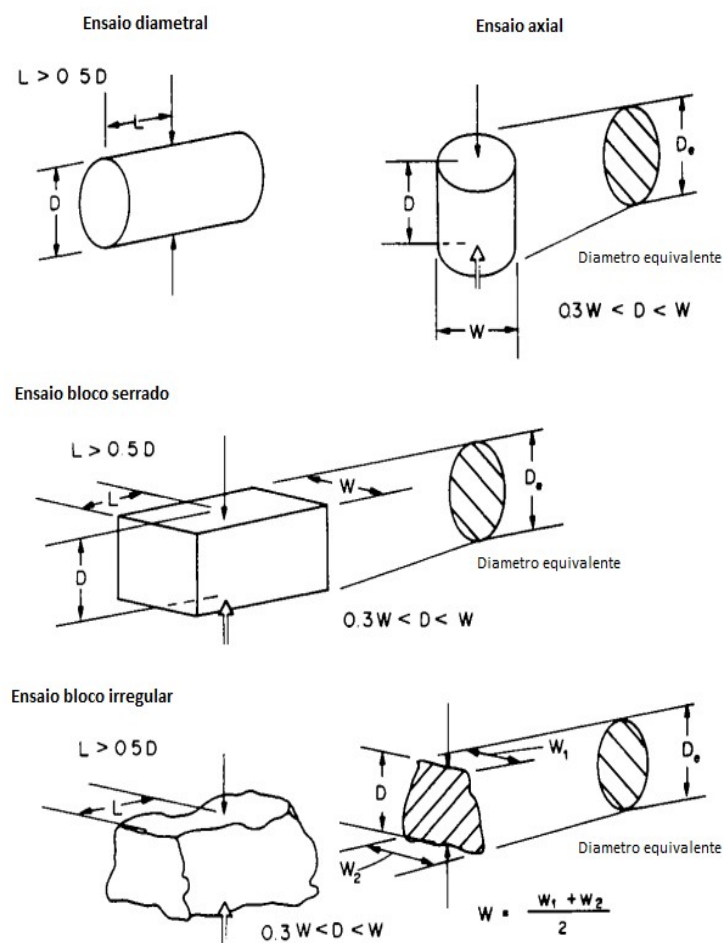


Figura 2- Tipos e diâmetros dos ensaios (ISRM, 1985).

### 2.2.3. Provetes

Geralmente são necessários 10 ensaios válidos por cada tipo de rocha que se pretende caracterizar. Contudo, um número inferior pode ser suficiente caso a dispersão de resultados seja pequena. São considerados válidos somente os resultados dos ensaios cuja superfície de rotura contenha os pontos de aplicação da carga. Se a superfície de rotura passa apenas por um ponto de carga, o ensaio deve ser rejeitado (figura 3).

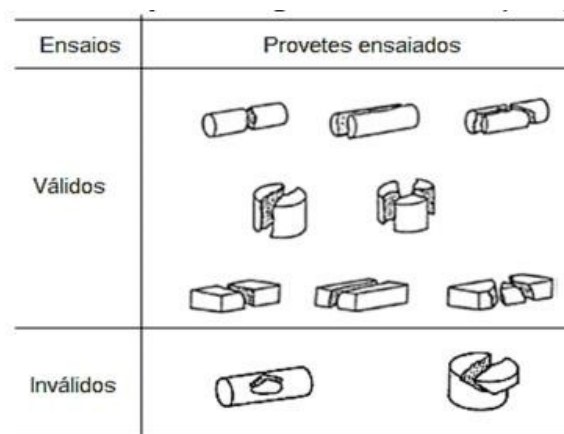


Figura 3 - Validade dos ensaios (ISRM, 1985).

### 2.2.4. Cálculo

O cálculo do índice de resistência à carga pontual ( $I_s$ ) é dado pela seguinte expressão:

$$I_s = \frac{P}{De^2}$$

Equação 1 - Índice de Resistência à Carga Pontual.

Onde  $P$  é a carga de rotura e  $De$  corresponde ao diâmetro equivalente.

O índice de resistência à carga pontual ( $I_s$ ) deve ser corrigido para  $I_{s50}$ , ou seja, para o valor correspondente a  $D=50$  mm, o qual pode ser obtido através do seguinte gráfico (figura 4):

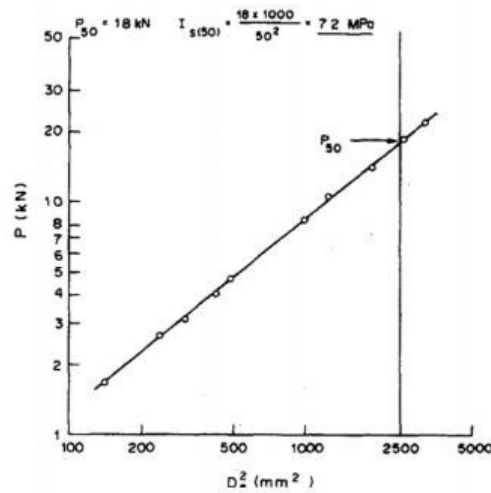


Figura 4 - Correção do Índice de Resistência à Carga Pontual (ISRM, 1985).

Projectando os valores de  $P$  e  $D^2$  num diagrama log-log, obtém-se uma recta da qual é possível extrapolar o valor  $P$  correspondente a  $De^2=2500 \text{ mm}^2$ . A partir dos valores lidos, determina-se:

$$I_{s50} = \frac{P(50)}{2500}$$

Equação 2 – Índice de resistência à carga pontual-  $I_{s50}$

Quando se utilizam amostras de tamanho único, o melhor processo é determinar  $I_{s50}$  numericamente, ou seja, a partir da expressão:

$$F = \left[ \frac{De}{50} \right]^{0.45}$$

Equação 3 - Expressão numérica de  $I_{s50}$ .

Sendo  $De$  a distância equivalente, em ensaios axiais, em blocos ou em fragmentos irregulares dada por:

$$De = 4 \times \frac{A}{\pi}$$

Equação 4 - Fórmula Matemática da Distância Equivalente

Em que  $A = W \times D$

Nos ensaios diametrais,  $De = D$ .

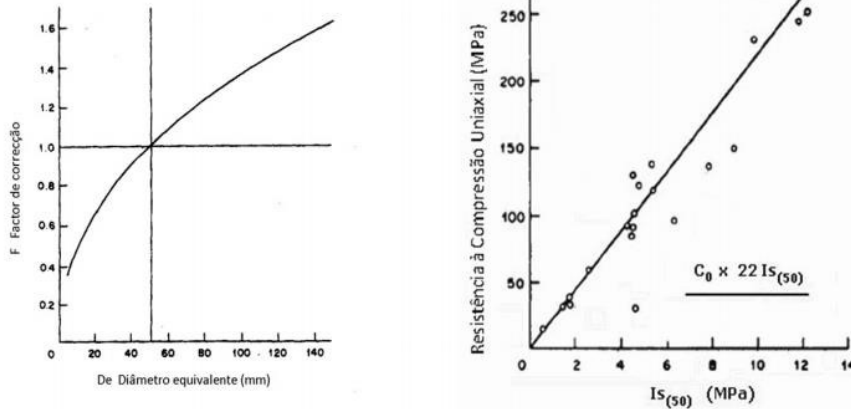


Figura 5 - Gráficos referentes aos factores de correcção do PLT (ISRM, 1985).

O cálculo dos valores médios de  $IS_{50}$  deve ter em conta o seu índice de resistência pontual e de anisotropia. O valor médio de  $IS_{50}$  deve ser calculado retirando os dois valores mais altos e os dois valores mais baixos de dez ou mais testes válidos. No caso de terem sido realizados menos testes, retira-se o valor mais elevado e o mais baixo e procede-se ao cálculo da média dos restantes valores.

Em rochas com anisotropia conferida pela xistosidade, foliação ou estratificação, a realização do ensaio de carga pontual deverá ter em conta a orientação de tais discontinuidades estruturais. Nestes casos, é usual a determinação dos índices de carga pontual, quer na direcção perpendicular, quer na direcção paralela a esses planos; sendo assim possível definir um índice de anisotropia, dado pela relação entre aqueles índices.

O Índice de anisotropia  $Ia_{50}$  é calculado determinando-se a razão entre as medianas dos índices calculados para tensões normais e paralelas aos planos de discontinuidade.  $Ia_{50}$  toma valores próximos de um para materiais isotrópicos e valores mais elevados quando a rocha é anisotrópica.  $IS_{50}$  deve ser utilizado directamente na classificação das rochas, enquanto que as correlações com a resistência a compressão uniaxial são apenas aproximações. A resistência à compressão uniaxial é para provetes de  $D=50\text{ mm}$ , cerca de vinte e duas vezes a resistência à carga pontual (Vallejo et al., 2002)

Todos os dados são registados em fichas-tipo, elaboradas de acordo com o ensaio e os seus objectivos (figura 6):

---

(página propositadamente em branco)



---

(página propositadamente em branco)

---

### 2.3. Esclerómetro portátil – Martelo de Schmidt

O ensaio de “Martelo de Schmidt” (figura 7) fornece uma estimativa rápida, económica e fiável da dureza da rocha, sendo utilizado para estimar propriedades mecânicas do material (Aydin & Basu, 2005).

Este ensaio foi introduzido em 1948 como ensaio de natureza não-destrutivo da dureza do betão (Schmidt, 1951), tendo sido utilizado de forma mais sistemática a partir da década de 60, do século XX, com o objectivo de se estimar a resistência em rocha (Cargill & Sakoor, 1990) através do valor do ressalto ( $R$ ).

O valor do ressalto ( $R$ ) é talvez o índice mais utilizado na mecânica das rochas para estimar resistência a compressão uniaxial e o modulo de elasticidade ( $E$ ) de rocha intacta quer em laboratório, quer *in situ* (Aydin & Basu 2005). O martelo de Schmidt é também utilizado frequentemente para estimar a resistência à compressão das paredes de descontinuidade (Day, 1980).

Nas décadas seguintes ao primeiro método de condução do ensaio publicado pela ISRM, tem sido procurado estabelecer correlações entre os valores de ressalto ( $R$ ) e a resistência à compressão uniaxial para diferentes tipos de rocha (Aydin & Basu 2005).



Figura 7 - Exemplo do Martelo de Schmidt “clássico” ( <http://www.pcte.com.au/original-schmidt-hammer>)

#### 2.3.1. Princípio de funcionamento

O equipamento consiste num pistão accionado por mola o qual é libertado quando o êmbolo é pressionado contra uma superfície. O funcionamento baseia-se no princípio de que a percursão de uma mola de aço, quando impelida com uma certa energia contra uma superfície rochosa, é proporcional à robustez do material. Em função da dureza da rocha, a massa de aço sofre um maior ou menor ressalto (“Rebound”,  $R$ ), sendo o valor ( $R$ ) registado no aparelho, numa escala adimensional de 10 a 100. Antes de se efectuar um novo disparo a mola do aparelho deve estar ligeiramente comprimida (figura 8).

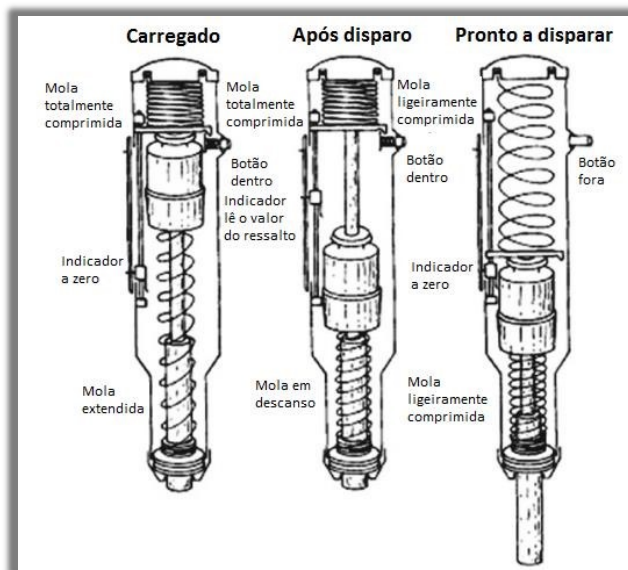


Figura 8 - Princípio de funcionamento do esclerômetro portátil (adaptado da ISRM, 2015).

Existem vários tipos de equipamentos, sendo os mais utilizados os modelos L e N. Os modelos têm diferentes energias de impacto, sendo o Martelo do tipo N indicado para o estudo de betões, com uma energia de impacto de 2.207 N/m<sup>2</sup> e o martelo do tipo L utilizado no estudo de maciços rochosos com uma energia de impacto de 0.735 N/m<sup>2</sup> (três vezes menor que a energia de impacto do martelo do tipo N).

É importante que a superfície a ensaiar seja lisa, sem fissuras e livre de materiais resultantes da meteorização da rocha. A posição do aparelho em relação a superfície a ensaiar (horizontal, vertical ou oblíqua) deve ser anotada para o posterior tratamento de dados. No caso de ensaio a provetes de rocha, estes devem estar apoiados a uma base de aço (mínimo de vinte kg para martelo tipo L e vinte kg para martelo tipo N), firmemente apoiada num local liso e regular.

### 2.3.2. Registo e tratamento dos dados

Para registo dos ensaios, são recomendados vinte valores de ressalto (*R*) (ISRM, 2015). Os valores registados devem ser de impactos independentes separados por uma distância igual ou superior ao diâmetro do embolo. A resistência à compressão uniaxial de um material é fortemente influenciada pela sua densidade e pelos seus elementos microestruturais (Aydin & Basu 2005). Consequentemente, os valores de média, mediana, moda e intervalo entre leituras devem ser representados para melhor exprimir as variações na dureza da superfície.

Os valores de ( $R$ ) devem então ser convertidos numa estimativa da resistência à compressão uniaxial (quadro 2) a partir de ábaco de Miller (Miller, 1965). No tratamento dos valores através do ábaco, devem ser tidos em conta a posição do martelo no momento do ensaio e a densidade média da rocha investigada. Com esta quantificação, o maciço é classificado quanto à sua resistência à compressão simples, numa escala que varia entre resistência muito elevada (S1) e resistência muito baixa (S5) (ISRM, 1981, 2015).

Quadro 2 - Quadro das classes de resistência do maciço rochoso (adaptado da ISRM, 2015).

Classificação	Resistência à Compressão Simples (MPa)	Designação	
S <sub>1</sub>	> 200	Muito elevada	S <sub>1-2</sub>
S <sub>2</sub>	60 a 200	Elevada	Elevada
S <sub>3</sub>	20 a 60	Média	S <sub>3</sub> Média
S <sub>4</sub>	6 a 20	Baixa	S <sub>4-5</sub>
S <sub>5</sub>	<6	Muito baixa	Baixa

Por sua vez, a alteração de uma rocha consiste na sua desagregação e decomposição levadas a cabo por agentes físicos e químicos naturais, que transformam essa rocha noutra produto natural, agora em equilíbrio físico-químico com o meio ambiente (Aires-Barros, 1991). A determinação do estado de alteração de um maciço rochoso ou de material-rocha é um factor importante a considerar. Este aspecto pode ser determinado de uma maneira quantitativa, recorrendo à observação *in situ* e à medição de parâmetros como a resistência da rocha. A ISRM (1981) propôs que os graus de alteração a considerar fossem constituídos por 5 termos, enquanto que a GSE (1995) considera 6 termos. No entanto, outros autores, utilizam frequentemente uma versão simplificada com 3 termos (quadro 3).

Quadro 3- Grau de alteração do maciço rochoso (ISRM, 1981; GSE, 1995)

**Classificação do grau de alteração - “Weathering classification”**

(adaptado de ISRM, 1978, 1981; G.S.L. - working party, 1995)

Zonas	Grau de alteração	Nomenclatura		Significado	
Zona inferior	Sã ou não alterada	W <sub>1</sub>	W <sub>1-2</sub>	Não se observam sinais de alteração na matriz rochosa	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sã e compacta</li> <li>descontinuidades fechadas</li> <li>permeabilidade é praticamente nula</li> </ul>
	Ligeiramente alterada	W <sub>2</sub>		Mudanças na cor original da matriz rochosa (descoloração)	
Zona intermédia	Moderadamente alterada	W <sub>3</sub>	W <sub>3</sub>	Menos de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo, mantendo-se a petrofábrica original	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maciço mais ou menos são</li> <li>intersectado por descontinuidades abertas</li> </ul>
Zona superior	Muito alterada	W <sub>4</sub>	W <sub>4-5</sub>	Mais de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo; a rocha é muito friável	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zona alterada a muito alterada ou mesmo decomposta</li> <li>Permeabilidade do tipo intersticial</li> <li>Pode coexistir uma circulação fissural</li> </ul>
	Completamente alterada	W <sub>5</sub> *		Todo o material rochoso está muito decomposto e/ou desagregado num solo residual	

\* por vezes, na bibliografia é referenciada o termo W<sub>6</sub> (ISRM, 1978; G.S.E. - working party, 1995), i.e., desagregação total do maciço podendo ser considerado como um autêntico solo residual.

De forma a conhecer e a caracterizar o maciço rochoso é importante o conhecimento da resistência à compressão uniaxial do material-rocha. Para esse efeito, foram recolhidas amostras em nove pontos da exploração de forma a que tais amostras fossem submetidas ao ensaio de Carga Pontual (*Point Load Test*) (ISRM, 1985) e à determinação da sua dureza através do esclerómetro portátil (martelo de Schmidt) conduzindo a uma estimativa do valor da resistência à compressão uniaxial (ISRM, 1985, 2007, 2015).

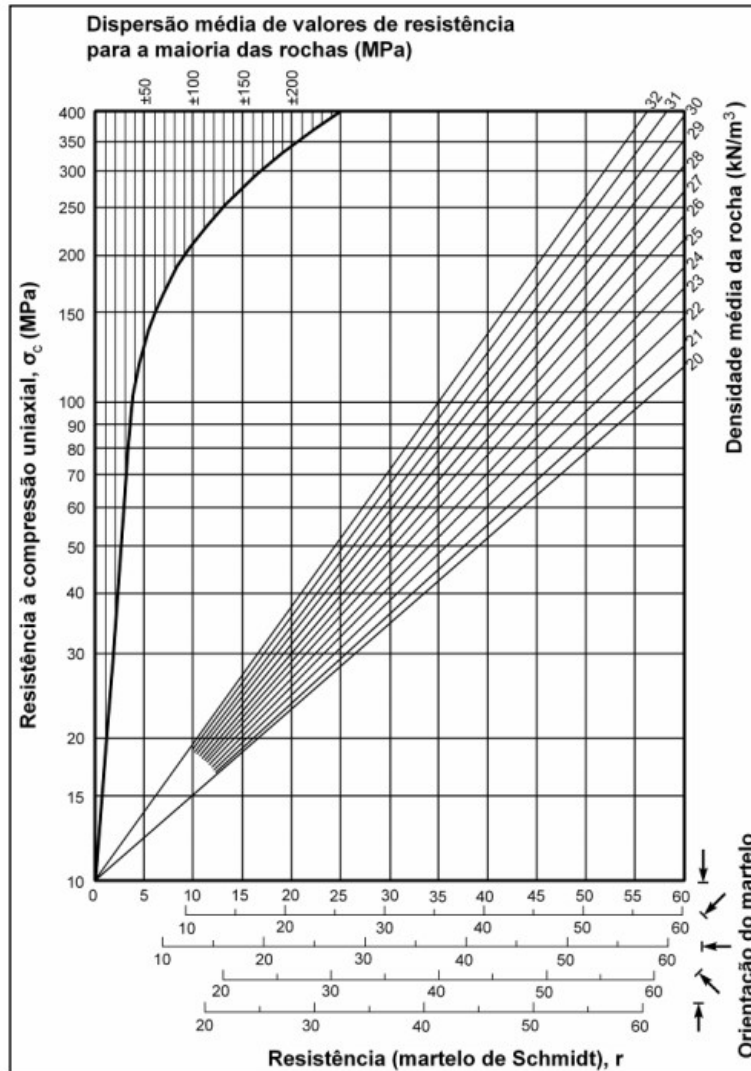


Figura 9 - Ábaco de Miller (adaptado de ISRM, 2015)

### 2.3.3. Factores que influenciam o ensaio (ISRM, 2015)

O ensaio é influenciado pela resistência do grão versus a matriz, pela meteorização e humidade, pela anisotropia e pelas condições de onde e como foi efectuado (ISRM, 2015).

#### i) Tamanho e distribuição dos grãos

O tamanho e a distribuição dos grãos e a resistência relativa da matriz têm uma influência considerável na dispersão dos valores de ressalto. Quando uma superfície contém grãos com tamanhos comparáveis ao diâmetro do embolo as leituras dessas zonas podem desviar-se da média, dependendo na sua resistência relativa à matriz. Em casos destes, os pontos de impacto devem ser seleccionados de forma a obter valores de ressalto separados da matriz e do grão dominante. Calcular a média dos valores juntos em casos destes pode levar a conclusões erradas na determinação da dureza.

---

## ii) Meteorização e humidade

Mudanças microestruturais induzidas por processos de meteorização originam diferentes respostas mecânicas, especialmente em rochas ígneas cristalinas e conseqüentemente, diferentes valores de ressalto.

A meteorização dos diferentes minerais que formam as rochas aumenta a heterogeneidade à escala do grão o que em rochas de grão mais grosseiro, irá aumentar a dispersão dos valores de ressalto. É então crucial que as amostras sejam uniformes em termos de meteorização e descrição petrográfica.

Quando os provetes apresentarem uma superfície com variável grau de meteorização o decréscimo no valor de ressalto entre o primeiro e o segundo impacto no mesmo ponto devem ser interpretados como índice de meteorização mecânica (Aydin & Basu, 2015).

A humidade da rocha na zona de influência do impacto pode afectar consideravelmente os valores de ressalto de acordo com o carácter microestrutural. A humidade facilita o deslizar entre os grãos e conduz ao amaciamento dos grãos e do cimento que juntamente com os grãos forma a matriz. Estes mecanismos têm mais influência em rochas meteorizadas porosas e com pouco cimento, mas também em rochas com microfissuras abundantes.

Como o objectivo do ensaio de Schmidt é o de estabelecer uma correlação entre a resistência à compressão uniaxial e o valor do ressalto (R) todos os testes devem ser realizados em amostras com o mesmo conteúdo de humidade.

## iii) Anisotropia

Os planos de anisotropia em rochas laminadas e xistosas têm influência na resposta ao impacto.

Os valores de ressalto são fortemente reduzidos quando a direcção de impacto é normal à dos planos, já que estes absorvem a energia de impacto, enquanto que a resistência à compressão uniaxial e a elasticidade reduzem drasticamente em planos oblíquos de anisotropia. O uso do martelo de Schmidt não é recomendado em rochas deste tipo.

---

**iv) Ensaios *in situ* versus ensaios em laboratório**

Devido à dificuldade em determinar a presença de fendas e outras descontinuidades directamente por baixo dos pontos de impacto e devido à dificuldade de fixação dos provetes a uma base firme no terreno, a possibilidade de deformação vertical e vibração nas interfaces quando se testa rochas laminadas, exfoliadas ou meteorizadas directamente nas superfícies exposta, deve ser evitado. Na maioria dos casos, a presença de detritos irá afectar a magnitude dos valores de ressalto *in situ*, apresentando estes valores mais baixos quando comparados com os valores em laboratório. Por outro lado, ensaios em laboratório sofrem de limitações quanto ao tamanho-forma do provete.



---

**Capítulo III – Avaliação expedita da Resistência à Compressão em maciços rochosos  
fracturados: caso de estudo da Pedreira da Curviã**

---

---

(página propositadamente em branco)

---

### **3. Avaliação expedita da Resistência à Compressão em maciços rochosos fracturados: caso de estudo da Pedreira da Curviã**

#### **3.1. Considerações iniciais**

À semelhança do que já foi referido em pontos anteriores, o presente trabalho tem como principal objectivo o estudo da resistência à compressão simples do maciço em diversos pontos da Pedreira da Curviã em Joane, Vila Nova de Famalicão.

O estudo comportou duas fases:

##### **i) Definição dos locais de amostragem e recolha das amostras**

Nestes locais foram seleccionados os pontos de amostragem e recolhidas as amostras. Foi efectuado o ensaio de esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt) no maciço em cada ponto de amostragem para obtenção dos dados de resistência *in situ* e descrição do estado de alteração do maciço em cada ponto, com recurso à observação visual e a pancadas com o martelo de Geólogo.

##### **ii) Ensaios laboratoriais e tratamento dos resultados**

Neste ponto, os provetes, serrados e agrupados em lotes por zona, foram medidos com recurso a um paquímetro digital (erro de +/- 0.02) e preparados para o ensaio de carga pontual (PLT). A preparação consistiu, após as medições, na marcação no provete da direcção da largura ( $W$ ) que deve ser perpendicular à aplicação da carga e o ponto médio para aplicação da carga pontual. Além da realização do ensaio de carga pontual (PLT), foram realizados ensaios com recurso ao esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt) nos provetes. Seguidamente foram convertidos os parâmetros  $IS_{50}$  (PLT) e de  $R$  (resistência martelo de Schmidt) em valor de resistência à compressão uniaxial (MPa) através da relação  $22 \times IS_{50}$  no caso do ensaio de carga pontual e através do ábaco de Miller para os valores do ensaio de esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt), de forma a conseguir-se classificar o maciço.

Após o tratamento dos dados relativos ao valor de resistência à compressão, foram elaboradas considerações, tendo como base a cartografia geotécnica existente na pedreira (Silva, 2014). Desta forma, foi-nos permitido correlacionar as características do maciço com o seu valor de resistência,

S, assim como estimar a relação entre as características do maciço e a sua classe de resistência. Com esta estimativa, procurou-se esboçar um mapeamento de auxílio à cartografia geotécnica.

### 3.2. Enquadramento pedra SECIL – Curviã nº2 (Joane, Vila Nova de Famalicão)

#### 3.2.1. Localização

O centro de exploração de rocha industrial e ornamental propriedade da empresa SECIL BRITAS S.A., Pedreira da Curviã N.º 2, localiza-se no lugar da Curviã, nas freguesias de Joane e Portela, concelho de Vila Nova de Famalicão, distrito de Braga (figura 10). O centro de exploração está circunscrito pelas povoações de Portela a nordeste, Telhado a oeste, Airão a este e Joane a sul. Em termos regionais, a área do estudo situa-se na parte norte da bacia hidrográfica do rio Ave (figura 11).

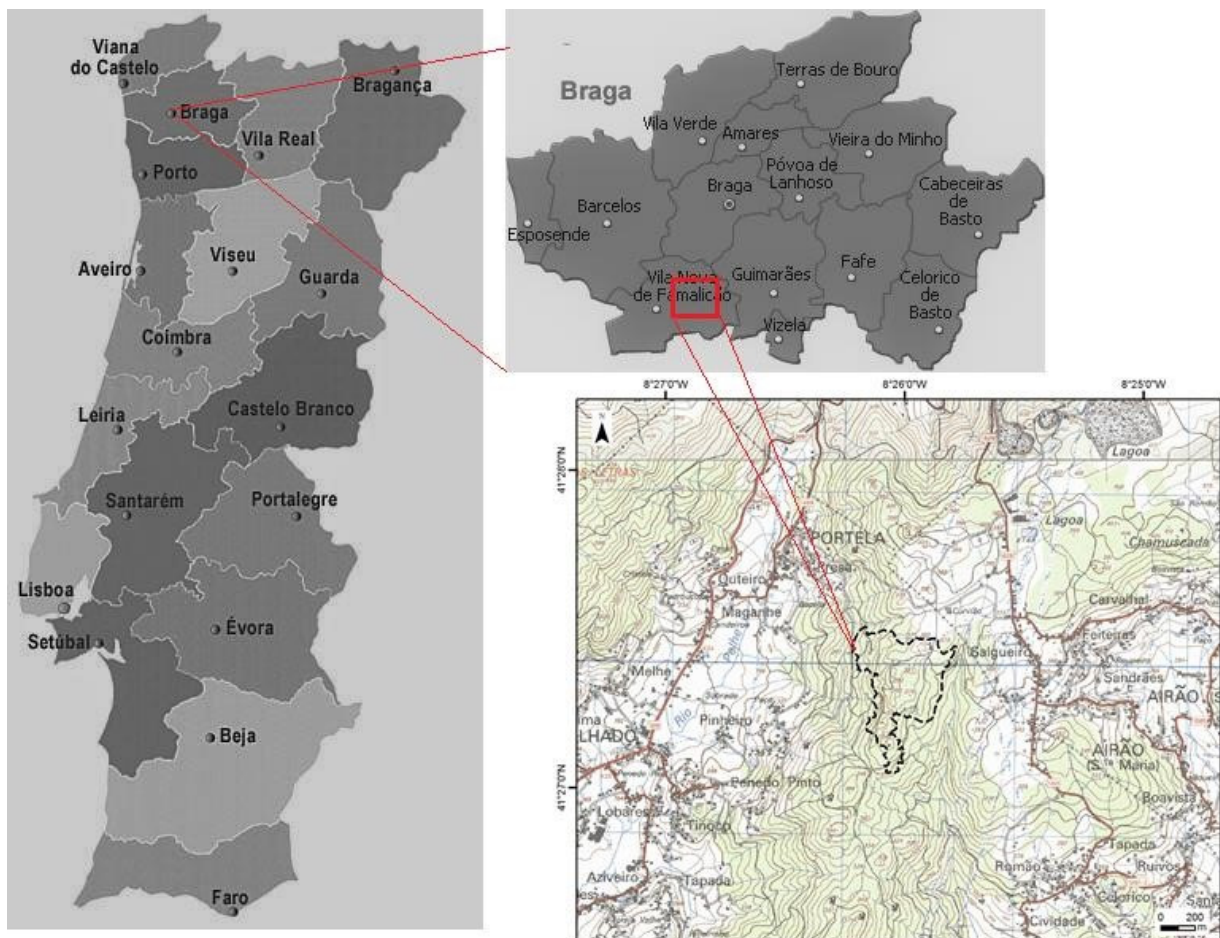


Figura 11- Mapa distrital Português e Carta Militar nº70 - Braga (Adaptado IGeoE, 1997).

As cartas topográficas utilizadas foram as nº 70 (Braga) (IGeoE, 1997) e a nº 84 (Selho – Guimarães) (IGeoE, 1998) dos serviços cartográficos do exército, à escala 1/25 000.



Figura 12 - Delimitação da exploração da Pedreira da Curviã (Adaptado do Google Earth Pro)

### 3.2.2. Acessos

Seguindo da cidade do Porto, seguir pela Autoestrada nº3 (A3) até Vila Nova de Famalicão, chegando a esta localidade seguir pela estrada nº206 em direcção a Guimarães até a km 20, tomando de seguida a estrada nº309 com sentido Braga. Ao km 19 da estrada nº309 surge a primeira placa indicativa de “Pedreira”, 1 km depois, por essa direcção entra-se directamente no caminho da pedreira, sendo que ao fim de, aproximadamente, 200 metros estão localizados os escritórios da exploração.

### 3.2.3. Rede principal (Estradas Nacionais):

Da rede viária que circunda e serve a área da pedreira mais próxima, destaca-se as seguintes vias:

- ER206 - Entre Vila do Conde e Guimarães, constitui a principal ligação entre as estradas municipais e as auto-estradas IP1 (A3) e IC5 (A7);

---

-IP1 (A3) – Serve de ligação entre Porto e Braga.

-IC5 (A7) – Actualmente liga Póvoa do Varzim (IC1) – Famalicão – Guimarães – Fafe – Vila Pouca de Aguiar.

#### **Rede distribuidora e secundária (Estradas municipais):**

- EM309 – liga a freguesia de Portela, Telhado e outras à ER206, no sentido sul e no sentido norte liga com a EN14;

- EM628 – liga as freguesias de Airão (S. João Baptista) e Airão (Sta. Maria) à ER206, no sentido sul e no sentido norte, liga a EM309 que por sua vez liga à EN14 (Porto-Braga).

#### **3.2.4. Aspectos geológicos do georrecurso**

A zona em que a pedreira está localizada insere-se num extenso maciço tardi e pós-tectónico relativamente à última fase de deformação varisca, introduzida nos granitos grosseiros porfiróides. A rocha em questão é um granito de tendência monzonítica, por vezes grano diorítica, de grão médio com tendência porfiróide, de duas micas, essencialmente biotítico (Serviços Geológicos de Portugal à escala 1/50000, Carta 9-B de Guimarães – Montenegro de Andrade et al. 1986), fracturado e às vezes alterado, caso em que adquire tonalidade amarelada (figura 12).

O granito possui cor geralmente cinzenta e textura bastante uniforme. O diaclasamento, por sua vez, apresenta-se, em muitas zonas, relativamente espaçado, características que conferem, ao maciço, interesse industrial para a produção de lajes destinadas ao fabrico de guias de passeio paralelepípedos e elementos de alvenaria. A boa homogeneidade textural, quer quanto à granularidade, quer quanto à cor e o aspecto conferem a esta rocha boas características para ser explorada para britas.

Contudo, algumas zonas de superfície do maciço, nomeadamente a zona mais superficial, apresentam granito de cor amarelada por alteração, tal como acontece em estreitas faixas ao longo dos bordos de algumas diáclases onde a rocha de tom amarelado-acastanhada se circunscreve às zonas de circulação de águas superficiais ou infiltradas. Em outros casos, essa tonalidade está associada a zonas de esmagamento (cisalhamentos, caixas de falha), sendo de realçar uma larga faixa na zona nascente controlada por fracturas paralelas de orientação sensivelmente N10°E, responsáveis pela reactivação de fracturas mais antigas. No seio desta massa fracturada e alterada individualizam-se, em alguns locais, “bolas” de granito duro, ordinariamente com um metro a dois de diâmetro. No que se refere à granularidade, verificam-se ligeiras variações ao longo do maciço,

nomeadamente com ligeiro aumento do grão da matriz e da tendência porfiróide, que se traduz por maior abundância de pequenos cristais feldspáticos, maiores que os da matriz, mantendo-se dispersos outros de maior tamanho (Montenegro de Andrade et al., 1986; Pereira, 1992).

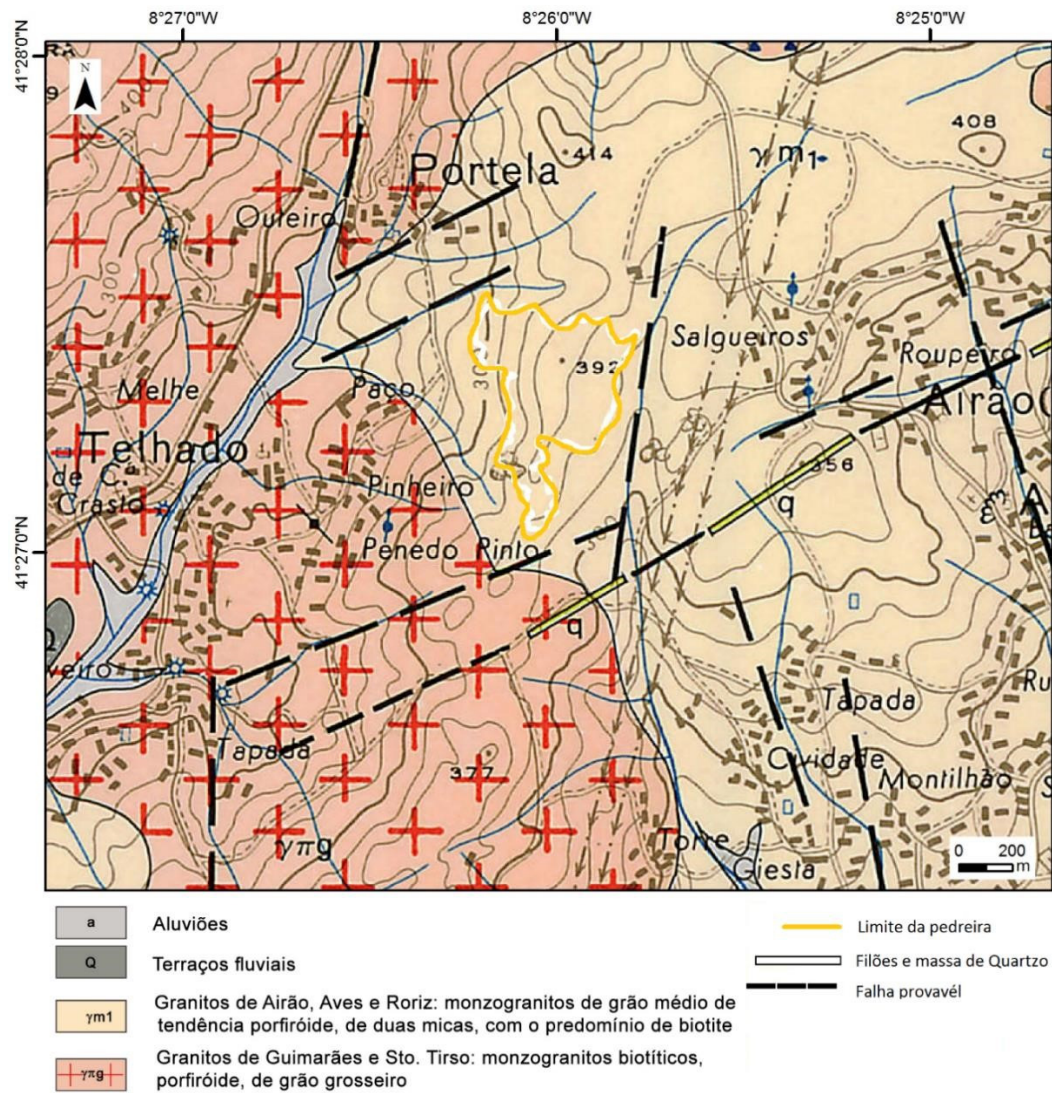


Figura 13 - Esboço Geológico Regional da área da Pedreira da Curviã nº2 e envolvente (adaptado de Montenegro de Andrade et al., 1986)

Do ponto de vista hidrográfico, a zona insere-se regionalmente na parte norte da bacia hidrográfica do rio Ave, cujo leito corre a sul, limitada a norte pela bacia do rio Cavado e oeste pelo Oceano Atlântico. Como principais linhas de água que passam mais próximas ao local da pedraira encontram-se, a nascente, o rio Pele e, a poente o rio Pelhe, ambos a desaguar a sul, no rio Ave. Segundo os dados fornecidos pela carta hidrogeológica de Portugal (Pedrosa, 1998), a permeabilidade atribuída as formações rochosas presentes na área variam entre média a baixa e a

---

sua produtividade aquífera é considerada significativa, com valores situados entre 1 e 3 L/s.km<sup>2</sup> (Pedrosa, 1998).

As unidades aquíferas regionais na zona da pedreira podem caracterizar-se como pertencendo a dois grupos (Pedrosa, 1998):

- i) Aquíferos livres superficiais, na zona de alteração superior do maciço, instalados nos solos residuais resultantes da meteorização do granito, cuja base é o granito do maciço subjacente, que apresentam porosidade em pequeno;
- ii) Aquíferos em meio fissurado, instalados nas zonas diaclasadas do maciço granítico, que recebem a recarga através dos aquíferos livres sobrejacentes descritos no ponto anterior, com um sistema de fissuras que fecha em profundidade. Neste sistema, a água circula através da rede de diaclases, que apresentam, conseqüentemente, porosidade em grande.

### **3.3. Recolha da amostragem**

Para a realização desta dissertação, foram recolhidas amostras de rocha em nove locais da exploração industrial e ornamental, da SECIL Britas SA, em Joane, Vila Nova de Famalicão. Na figura 13 estão representados os pontos de amostragem, sendo que o ponto representado por “PLT 1” encontra-se numa zona da pedreira a explorar rocha para fins ornamentais (figura 14). Este ponto foi recolhido com o intuito de se conseguir comparar a resistência à compressão simples do maciço, em zonas distintas do ponto de vista do objectivo da exploração.

Em cada ponto, foi recolhida uma amostra para posterior serração em provetes prismáticos utilizados para o ensaio de carga pontual, Point Load Test (ISRM, 1985, 2015) e para os ensaios com recurso ao esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt, Proceq, tipo L) em laboratório (quadro 4).



Figura 14- Localização dos pontos de amostragem (imagem aérea adaptada da Google Earth Pro)

Quadro 4 - Cota dos Pontos de Amostragem.

Ponto	Cota do Ponto (m)
PLT 1	354
PLT 2	352
PLT 3	345
PLT 4	344
PLT 5	313
PLT 6	315
PLT 7	313
PLT 8	313
PLT 9	343



Figura 15 - Maciço do Ponto PLT 4– Pedreira da Curviã nº2



Figura 16— Zona de Rocha Ornamental Ponto PLT 1 – Pedreira da Curviã nº2.

### **3.4. Zonamento Geotécnico dos pontos de amostragem**

Estudos geotécnicos preliminares anteriores (Silva, 2014) caracterizam a Pedreira da Curviã em três zonas geotécnicas distintas.

---

Segundo Silva (2014), o zonamento geotécnico da Pedreira da Curviã foi sistematizado conforme a finalidade expectável que as faces expostas do maciço indicavam, ou seja, produção de rocha ornamental (ZG3) e/ou rocha industrial para agregados (ZG1 a ZG2b) e reunidos os seguintes atributos das zonas geotécnicas:

- ZG1: Granito de grão médio, com tendência porfiróide, de duas micas, essencialmente biotítico, são (W1), com espaçamento afastado a médio F2 a F3 (120 a 160 cm / 45 a 60 cm);

- ZG2a: Granito de grão médio, com tendência porfiróide, de duas micas, essencialmente biotítico, são (W1), com espaçamento médio a muito afastado F3 a F1 (90 a 115 cm / 200 a 235 cm);

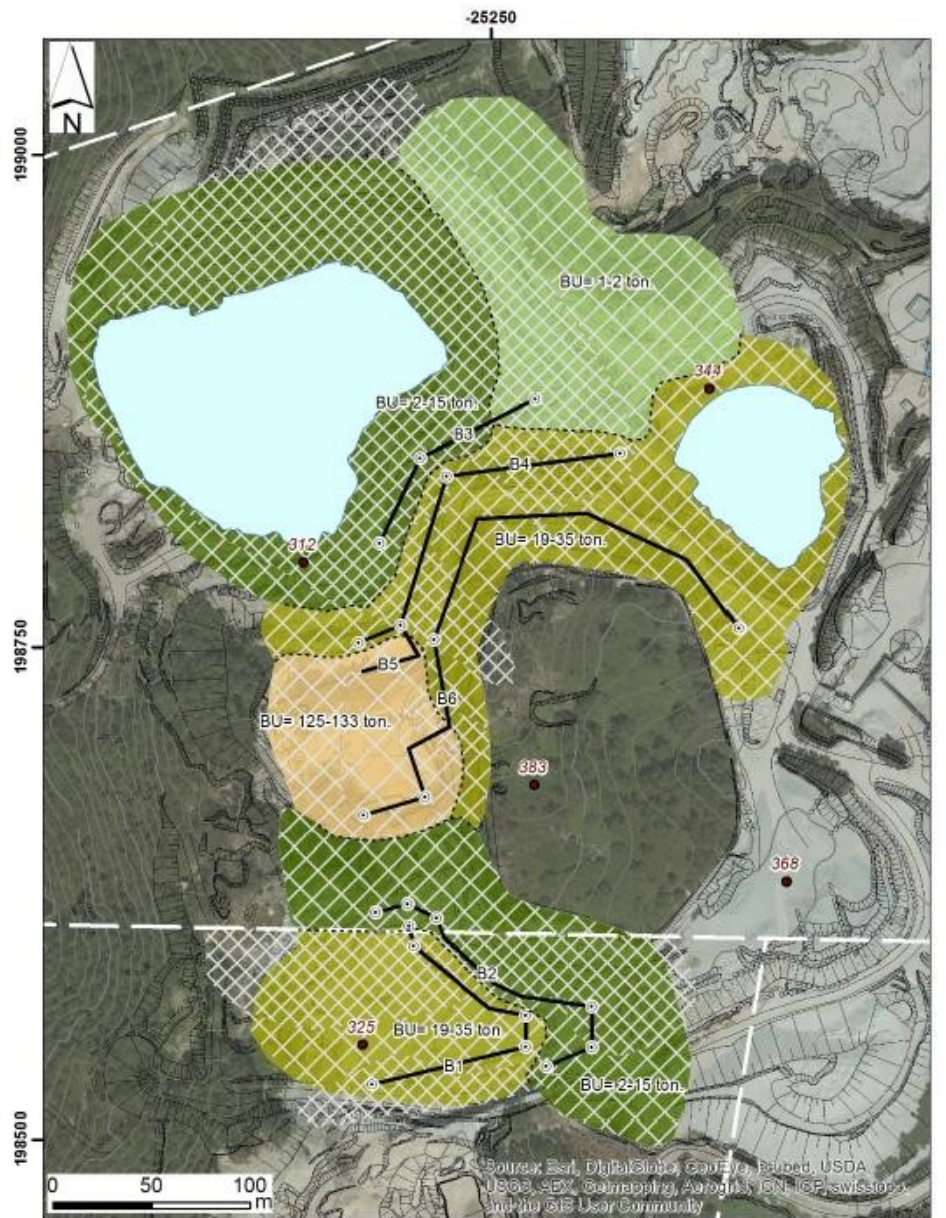
- ZG2b: Granito de grão médio, com tendência porfiróide, de duas micas, essencialmente biotítico, são a pouco alterado (W1 a W2) com espaçamento afastado F2 (80 – 90 cm);

- ZG3: Granito de grão médio, com tendência porfiróide, de duas micas, essencialmente biotítico, são (W1), com espaçamento muito afastado F1 (460 – 475 cm).

Referenciando a posição dos pontos de amostragem deste estudo no mapa de zonamento geotécnico (figura 17) da Pedreira da Curviã (Silva, 2014) podemos classificar os pontos como pertencentes às zonas geotécnicas expressas no quadro 5.

Quadro 5 - Pontos de amostragem e Zona Geotécnica correspondente.

Ponto Amostragem	Zona Geotécnica (Silva, 2014)
1	ZG 3
2	ZG 2a
3	ZG 2b
4	ZG 2b
5	ZG 1
6	ZG 1
7	ZG 1
8	ZG 1
9	ZG 1



Corredor de fraturação: espaçamento médio (F)

- ZG1 - Granito de grão médio, com tendência porfiróide, de duas micas, essencialmente biotítico, são (W<sub>1</sub>); espaçamento afastado a médio F<sub>2</sub> a F<sub>3</sub> (120 a 160 cm / 45-60 cm).
  - ZG2a - Granito de grão médio, com tendência porfiróide, de duas micas, essencialmente biotítico, são (W<sub>1</sub>); espaçamento médio a muito afastado F<sub>2</sub> a F<sub>1</sub> (90 a 115 cm / 200 a 235 cm).
  - ZG2b - Granito de grão médio, com tendência porfiróide, de duas micas, essencialmente biotítico, são a pouco alterado (W<sub>1</sub> a W<sub>2</sub>); espaçamento afastado F<sub>2</sub> (80 - 90 cm).
  - ZG3 - Granito de grão médio, com tendência porfiróide, de duas micas, essencialmente biotítico, são (W<sub>1</sub>); espaçamento muito atestado F<sub>1</sub> (460 - 475 cm).
- ZG1 a ZG2b: Rocha Industrial (Agregados)  
 ZG3: Rocha Ornamental  
 B.U.: Bloco unitário

- F < 2,5 m
- F 2-5 m
- F > 5 m
- Ponto de controle (GPS)
- Linha de amostragem (Scanline)
- Lineamentos tectônicos foto-interpretados
- 383
- Pontes cotadas
- Lago artificial da exploração

Figura 17— Mapa zonamento geotécnico preliminar da exploração da Curviã, segundo Silva (2014)

### 3.5. Caracterização das amostras

As amostras recolhidas nos nove pontos foram enviadas para a serração de forma a se obterem os provetes normalizados (figura 18).



Figura 18- Recolha de amostras do ponto PLT 7– Pedreira da Curviã nº2

No quadro 6 apresenta-se um resumo do estudo petrográfico das amostras recolhidas na exploração.

Quadro 6 - Breve descrição das características petrográficas da rocha (CiCCOPN, 2011). Segundo Silva (2014).

Parâmetro	Breve descrição		
Classificação	Rocha Ígnea Plutónica		
Estrutura	Compacta - composta por minerais leucocratas (feldespato, quartzo e moscovite) e melanocratas (biotite)		
Textura	Holocristalina, fanerítica, com tendência porfiroide		
Superfície	Áspera		
Porosidade	Baixa		
Mineralogia	Quartzo	1 a 5 mm	30%
	Feldespato	1 a 30 mm	60%
	Mica	0,5 a 2 mm	9%
	Outros	-	1%



Através da observação da rocha *in situ* foi possível estimar o grau de alteração do maciço rochoso nas zonas de amostragem. A rocha apresenta-se, assim, maioritariamente sã ou não alterada,  $W_1$ , nos pontos 1, 2, 6, 7, 8 e 9 e sã a ligeiramente alterada,  $W_{1-2}$ , nos pontos 3, 4 e 5.

---

### 3.6. Ensaio de carga Pontual – “Point Load Test” (PLT)

Na realização deste ensaio foram utilizados provetes de forma prismática com dimensões de aproximadamente 100 mm de comprimento, 50 mm de largura e 50 mm de altura (ou diâmetro). Foram ensaiados um total de 99 provetes, 11 por cada um dos nove pontos recolhidos na exploração. Os ensaios (figura 19) foram levados a cabo no Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do Instituto Superior de Engenharia do Porto (LGMC|ISEP).



Figura 19 – Ensaio de Point Load Test nas instalações do Instituto Superior de Engenharia do Porto (LGMC)

O valor médio do Índice de Resistência à Carga Pontual,  $I_{s50}$ , foi obtido, segundo indicação da norma (ISRM, 1985) retirando os dois valores mais altos (azul) e os dois valores mais baixos (vermelho) de 10 ou mais testes validos. O valor da Resistência à compressão simples é 22 vezes o valor médio do Índice de Resistência à Carga Pontual,  $I_{s50}$ , (ISRM, 1985) por isso o valor médio de  $I_{s50}$  foi multiplicado por 22, para se obter a resistência à compressão simples.

Os quadros 7 a 24 mostram de forma resumida e em detalhe os valores do ensaio de carga pontual.

Quadro 7- Resultados dos Ensaios de Carga Pontual no Ponto de Amostragem 1

Amostra	Provete	Carga Ruptura (P) Kn	Is(50) Mpa	Is(50) médio Mpa	Resistência à compressão uniaxial	
					UCS - 22 x Is(50) Mpa	Classe de resistência
1	1.1	34	11.21	8.67	190.79	S2
	1.2	30	9.51			
	1.3	30	10.26			
	1.4	28	9.15			
	1.5	24	7.68			
	1.6	23	7.92			
	1.7	25	8.13			
	1.8	26	8.13			
	1.9	28	9.31			
	1.10	26	8.55			
	1.11	22	7.34			



---

(página propositadamente em branco)



---

(página propositadamente em branco)

Quadro 9 - Resultados dos Ensaios de Carga Pontual no Ponto de Amostragem 2

Amostra	Provete	Carga Rutura (P) kN	Is(50) Mpa	Is(50) médio Mpa	Resistência à compressão uniaxial	
					UCS - 22 x Is(50) Mpa	Classe de resistência
2	2.1	25	8.36	8.55	188.08	S2
	2.2	31	10.15			
	2.3	27	9.40			
	2.4	22	7.66			
	2.5	20	6.86			
	2.6	30	10.01			
	2.7	24	8.27			
	2.8	20	7.045			
	2.9	30	8.84			
	2.10	23	8.41			
	2.11	26	8.62			



---

(página propositadamente em branco)

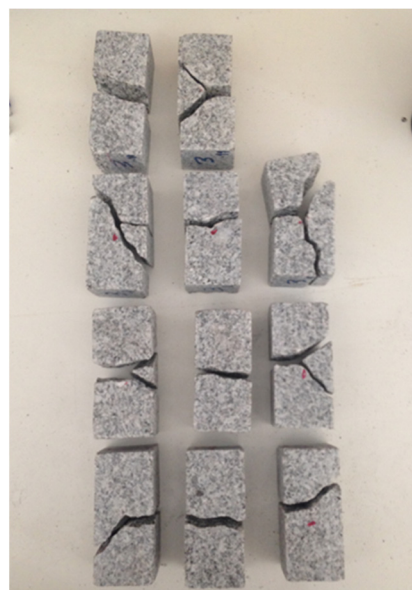


---

(página propositadamente em branco)

Quadro 11 - Resultados dos Ensaios de Carga Pontual no Ponto de Amostragem 3

Amostra	Provete	Carga Rutura (P) Kn	Is(50) Mpa	Is(50) médio Mpa	Resistência à compressão uniaxial	
					UCS - 22 x Is(50) Mpa	Classe de resistência
3	3.1	23	7.69	7.95	174.83	S2
	3.2	26	8.95			
	3.3	23	7.99			
	3.4	24	7.79			
	3.5	20	6.89			
	3.6	23	7.85			
	3.7	21	7.38			
	3.8	24	8.58			
	3.9	20	7.03			
	3.10	22	7.65			
	3.11	29	9.61			



---

(página propositadamente em branco)

Quadro 12- Ficha Laboratorial de Ensaio PLT do Ponto de Amostragem 3

Amostra	Provetes	Ensaio de Carga Pontual ("Point Load Test", ISRM, 1981, 1985, 2007) (UGMC/ISEP)										Resistência à compressão uniaxial					
		Dimensões do provete			Verificação das dimensões do provete			Relação da distância entre ponteiras - largura do provete	Carga de Ruptura	Índice de resistência à carga pontual	Factor de correcção	Índice de resistência à carga pontual (D=50mm)					
		Comprimento	Largura	Distância entre ponteiras	Comprimento	Relação da distância entre ponteiras - largura do provete	is					is(50)	UCS	Classe de resistência			
		L	W	D	L	0,5 x D	0,3 x W	0,3 x W < D < W	A	De2	De	P	is	$is(50) = F \times is$	Valor médio	Mpa	
3	3.1	98,92	51,21	48,29	mm	-	mm	-	mm <sup>2</sup>	mm	kN	Mpa	mm	7,69			
	3.2	100,69	48,91	48,71	V	24,145	V	15,363	2472,93	56,13	23	7,30	1,05	8,95			
	3.3	98,25	48,38	48,63	V	24,355	V	14,673	2382,41	55,09	26	8,57	1,04	7,99			
	3.4	98,61	51,08	50,34	V	24,315	V	14,514	2352,72	2997,09	54,75	23	7,67	1,06	7,79		
	3.5	98,72	48,8	48,77	V	25,17	V	15,324	2571,37	3275,63	57,23	24	7,33	1,04	6,89		
	3.6	97,8	49,31	48,86	V	24,385	V	14,64	2379,98	3031,82	55,06	20	6,60	1,05	7,85		
	3.7	97,63	49,25	47,06	V	24,43	V	14,793	2409,29	3069,15	55,40	23	7,49	1,04	7,38		
	3.8	97,51	49,46	45,86	V	23,53	V	14,775	2317,71	2952,49	54,34	21	7,11	1,03	8,58		
	3.9	100,39	49	47,34	V	22,93	V	14,838	2288,24	2889,47	53,75	24	8,31	1,04	7,03		
	3.10	97,9	48,81	48,16	V	23,67	V	14,7	2319,66	2954,98	54,36	20	6,77	1,04	7,65		
	3.11	99,21	50,81	49,21	V	24,08	V	14,643	2350,69	2994,51	54,72	22	7,35	1,06	9,61		
					24,605	V	15,243	2500,36	3185,17	56,44	29	9,10		174,83		52	

---

(página propositadamente em branco)

Quadro 13 - Resultados dos Ensaios de Carga Pontual no Ponto de Amostragem 4

Amostra	Provete	Carga Rutura (P) kN	Is(50) Mpa	Is(50) médio Mpa	Resistência à compressão uniaxial	
					UCS - 22 x Is(50) Mpa	Classe de resistência
4	4.1	26	9.04	8.24	181.31	S2
	4.2	25	8.65			
	4.3	21	7.21			
	4.4	27	8.77			
	4.5	27	9.37			
	4.6	11	3.20			
	4.7	22	7.17			
	4.8	27	8.79			
	4.9	27	9.03			
	4.10	21	6.14			
	4.11	23	8.09			



---

(página propositadamente em branco)

Quadro 14- Ficha Laboratorial de Ensaio PLT do Ponto de Amostragem 4

Amostra		Provetes		Ensaio de Carga Pontual ("Point Load Test", ISRM, 1981, 1985, 2007) (LGMCI/ISEP)										Resistência à compressão uniaxial						
				Dimensões do provete		Verificação das dimensões do provete		Relação da distância entre ponteiros - largura do provete		Área		Diâmetro equivalente				Carga de Ruptura	Índice de resistência a carga pontual	Factor de correção	Índice de resistência à carga pontual (D=50mm)	
				Comprimento	Largura	Distância entre ponteiros	Comprimento	L	0,5 x D	0,3 x W	0,3 x W < D < W	A	De2			De	P	Is	F	Is(50)
		-	-	-	0,5 x D	L > 0,5 x D	0,3 x W	0,3 x W < D < W	A = W x D	De <sup>2</sup> = $\frac{4 \times A}{\pi}$	De = $\sqrt{\frac{4 \times A}{\pi}}$	-	$Is = \frac{P}{D \cdot e^2}$	$F = \left(\frac{De}{50}\right)^{0,48}$	Is(50) = F x Is	Valor médio	22 x Is(50)	-		
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	mm	mm	kN	Mpa	mm	Mpa	Mpa	Mpa	-		
4.1	97,57	49,14	47,88	23,94	V	14,742	V	2352,82	2997,23	54,75	26	8,67	1,04	9,04						
4.2	99,77	49,21	48,11	24,055	V	14,763	V	2367,49	3015,91	54,92	25	8,29	1,04	8,65						
4.3	98,86	49,07	48,7	24,35	V	14,721	V	2389,71	3044,22	55,17	21	6,90	1,05	7,21						
4.4	96,91	52,47	48,96	24,48	V	15,741	V	2568,93	3272,52	57,21	27	8,25	1,06	8,77						
4.5	98,77	49,98	47,17	23,585	V	14,994	V	2357,56	3003,26	54,80	27	8,99	1,04	9,37						
4.6	98,24	59,96	49,37	24,685	V	17,988	V	2960,23	3770,99	61,41	11	2,92	1,10	3,20			181,31	52		
4.7	95,29	52,52	48,71	24,355	V	15,756	V	2558,25	3258,92	57,09	22	6,75	1,06	7,17		8,24				
4.8	97,62	52,56	48,72	24,36	V	15,768	V	2560,72	3262,07	57,11	27	8,28	1,06	8,79						
4.9	98,8	50,18	49,29	24,645	V	15,054	V	2473,37	3150,79	56,13	27	8,57	1,05	9,03						
4.10	98,95	54,2	54,2	27,1	V	16,26	V	2937,64	3742,22	61,17	21	5,61	1,10	6,14						
4.11	98,38	49,26	47,05	23,525	V	14,778	V	2317,68	2952,46	54,34	23	7,79	1,04	8,09						

---

(página propositadamente em branco)

Quadro 15 - Resultados dos Ensaios de Carga Pontual no Ponto de Amostragem 5

Amostra	Provete	Carga Rutura (P) Kn	Is(50) Mpa	Is(50) médio Mpa	Resistência à compressão uniaxial	
					UCS - 22 x Is(50) Mpa	Classe de resistência
5	5.1	24	8.32	9.47	208.4	S1
	5.2	28	8.85			
	5.3	29	9.41			
	5.4	28	8.99			
	5.5	31	9.69			
	5.6	26	8.94			
	5.7	30	9.65			
	5.8	28	9.44			
	5.9	30	10.88			
	5.10	30	10.19			
	5.11	33	11.34			



---

(página propositadamente em branco)

Quadro 16- Ficha Laboratorial de Ensaio PLT do Ponto de Amostragem 5

Amostra	Ensaio de Carga Pontual ["Point Load Test", ISRM, 1981, 1985, 2007] (LGM/ISEP)										Resistência à compressão uniaxial						
	Dimensões do provete			Verificação das dimensões do provete		Relação da distância entre ponteiros - largura do provete		Área	Diâmetro equivalente	Carga de Ruptura	Índice de resistência à carga pontual	Factor de correção	Índice de resistência à carga pontual (D=50mm)				
	Comprimento	Largura	Distância entre ponteiros	Comprimento	L	0,3 x W	0,3 x W < D < W						A	De2	De	P	Is
Provete	L	W	D	L	L > 0,5 x D	0,3 x W	0,3 x W < D < W	A = $W \times D$	$De2 = \sqrt{\frac{4 \times A}{\pi}}$	De = $\sqrt{\frac{4 \times A}{\pi}}$	P	Is = $\frac{P}{De^2}$	F = $\frac{D \times Is(50)}{Is}$	Is(50) = F x Is	Valor médio	UCS = 22 x Is(50)	Classe de resistência
	mm	mm	mm	mm	-	mm	mm	mm <sup>2</sup>	mm	mm	kN	Mpa	mm	Mpa	Mpa	Mpa	-
5.1	97,32	49,28	47,89	23,945	V	14,784	V	2360,02	3006,39	54,83	24	7,98	1,04	8,32			
5.2	98,18	53,94	49,27	24,635	V	16,182	V	2657,62	3385,51	58,19	28	8,27	1,07	8,85			
5.3	97,92	52,03	49,44	24,72	V	15,609	V	2572,36	3276,90	57,24	29	8,85	1,06	9,41			
5.4	97,94	52,41	49,71	24,855	V	15,723	V	2605,30	3318,85	57,61	28	8,44	1,07	8,99			
5.5	97,76	53,16	50,72	25,36	V	15,948	V	2696,28	3434,75	58,61	31	9,03	1,07	9,69			
5.6	97,69	50,36	47,34	23,67	V	15,108	V	2384,04	3037,00	55,11	26	8,56	1,04	8,94			51
5.7	99,47	52,59	49,45	24,725	V	15,777	V	2600,58	3312,84	57,56	30	9,06	1,07	9,65			
5.8	97,19	49,78	49,18	24,59	V	14,934	V	2448,18	3118,70	55,85	28	8,98	1,05	9,44			
5.9	98,07	49,11	45,33	22,665	V	14,733	V	2226,16	2835,87	53,25	30	10,58	1,03	10,88			
5.10	99,38	49,35	49,1	24,55	V	14,805	V	2423,09	3086,73	55,56	30	9,72	1,05	10,19			
5.11	97,86	49,42	48,32	24,16	V	14,826	V	2387,97	3042,01	55,15	33	10,85	1,05	11,34			

---

(página propositadamente em branco)

Quadro 17 - Resultados dos Ensaios de Carga Pontual no Ponto de Amostragem 6

Amostra	Provete	Carga Rutura (P) Kn	Is(50) Mpa	Is(50) médio Mpa	Resistência à compressão uniaxial	
					UCS - 22 x Is(50) Mpa	Classe de resistência
6	6.1	31	9.91	9.48	208.66	S1
	6.2	28	9.38			
	6.3	33	11.95			
	6.4	31	9.72			
	6.5	28	9.10			
	6.6	35	10.92			
	6.7	26	9.09			
	6.8	29	9.34			
	6.9	28	9.86			
	6.10	26	9.05			
	6.11	26	8.78			



---

(página propositadamente em branco)

Quadro 18- Ficha Laboratorial de Ensaio PLT do Ponto de Amostragem 6

Amostra	Provete	Dimensões do provete				Verificação das dimensões do provete		Ensaio de Carga Pontual ("Point Load Test", ISRM, 1981, 1985, 2007) (LGMC/ISEP)													
		Comprimento		Largura		Distância entre ponteltras		Relação da distância entre ponteltras - largura do provete		Diâmetro equivalente		Carga de Rótura		Índice de resistência à carga pontual		Factor de correção		Índice de resistência à carga pontual (D=50mm)		Resistência à compressão uniaxial	
		L	W	D	W	D	L	W	0,5 x D	0,3 x W	0,3 x W < D < W	A	De2	De	P	Is	F	Is(50)	Is(50) = F x Is	UCS	Classe de resistência
		-	-	-	-	0,5 x D	L > 0,5 x D	0,3 x W	0,3 x W < D < W	A = W x D	De2 = $\sqrt{\frac{4 \times A}{\pi}}$	De	P	Is	F = $\frac{(D_0)^{0,4H}}{(50)}$	Is(50) = F x Is	Valor médio	UCS	Classe de resistência		
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	mm	mm	kN	Mpa	mm	Mpa	Mpa	Mpa	-		
	6.1	99	52,99	49,46	24,73	V	15,887	V	2620,89	3338,71	57,78	31	9,29	1,07	9,91						
	6.2	93,13	50	49,36	24,68	V	15	V	2468,00	3143,95	56,07	28	8,91	1,05	9,38						
	6.3	99,25	49,48	45,11	22,555	V	14,844	V	2232,04	2843,37	53,32	33	11,61	1,03	11,95						
	6.4	98,91	53,29	50,42	25,21	V	15,987	V	2686,88	3422,78	58,50	31	9,06	1,07	9,72						
	6.5	100,21	50,84	50,49	25,245	V	15,252	V	2566,91	3269,95	57,18	28	8,56	1,06	9,10						
	6.6	99,35	53,11	50,93	25,465	V	15,933	V	2704,89	3445,72	58,70	35	10,16	1,07	10,92						
	6.7	99,93	49,41	47,23	23,615	V	14,823	V	2333,63	2972,78	54,52	26	8,75	1,04	9,09						
	6.8	98,62	53,08	48,91	24,455	V	15,924	V	2596,14	3307,19	57,51	29	8,77	1,06	9,34						
	6.9	98,16	49,43	46,82	23,41	V	14,829	V	2314,31	2948,17	54,30	28	9,50	1,04	9,86						
	6.10	98,54	48,58	48,31	24,155	V	14,574	V	2346,90	2989,68	54,68	26	8,70	1,04	9,05						
	6.11	98,99	49,94	48,89	24,445	V	14,982	V	2441,57	3110,28	55,77	26	8,36	1,05	8,78						
6																	9,48	208,66	S1		

---

(página propositadamente em branco)

Quadro 19 - Resultados dos Ensaios de Carga Pontual no Ponto de Amostragem 7

Amostra	Provete	Carga Rutura (P) Kn	Is(50) Mpa	Is(50) médio Mpa	Resistência à compressão uniaxial	
					UCS - 22 x Is(50) Mpa	Classe de resistência
7	7.1	27	9.43	9.42	216.70	S1
	7.2	29	9.71			
	7.3	26	9.03			
	7.4	28	9.15			
	7.5	29	9.70			
	7.6	25	8.53			
	7.7	27	8.74			
	7.8	29	9.85			
	7.9	29	9.99			
	7.10	30	9.69			
	7.11	27	9.24			



---

(página propositadamente em branco)

Quadro 20- Ficha Laboratorial de Ensaio PLT do Ponto de Amostragem 7

Amostra	Provete	Ensaio de Carga Pontual ("Point Load Test", ISRM, 1981, 1985, 2007) (LGMC/ISEP)										Resistência à compressão uniaxial					
		Dimensões do provete			Verificação das dimensões do provete		Relação da distância entre ponteiros - largura do provete	Área	Diâmetro equivalente		Carga de Rótura		Índice de resistência à carga pontual	Factor de correção	Índice de resistência à carga pontual (D=50mm)	Resistência à compressão uniaxial	
		Comprimento	Largura	Distância entre ponteiros	Comprimento	Distância entre ponteiros			De2	De							P
		L	W	D	L > 0,5 x D	0,3 x W	3 x W < D < 3 x W	A	De2	De	P	Is	F	Is(50)	Valor médio	Classe de resistência	
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	mm	mm	kN	Mpa	mm	Mpa	Mpa	Mpa	
		-	-	-	0,5 x D	0,3 x W	3 x W < D < 3 x W	$A = W \times D$	$De^2 = \frac{4 \times A}{\pi}$	$De = \sqrt{\frac{4 \times A}{\pi}}$	-	$Is = \frac{P}{D \cdot s^2}$	$F = \frac{(D_0)^{0,48}}{(50)}$	$Is(50) = F \times Is$			
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	mm	mm	kN	Mpa	mm	Mpa	Mpa	Mpa	
	7.1	98,68	49,46	47,26	23,63	V	14,838	V	2337,48	2977,68	27	9,07	1,04	9,43			
	7.2	99,43	49,88	49,49	24,745	V	14,964	V	2468,56	3144,66	29	9,22	1,05	9,71			
	7.3	98,68	49,55	47,53	23,765	V	14,865	V	2355,11	3000,14	26	8,67	1,04	9,03			
	7.4	100,26	51,36	49,6	24,8	V	15,408	V	2547,46	3245,17	28	8,63	1,06	9,15			
	7.5	98,85	50,12	49,3	24,65	V	15,036	V	2470,92	3147,66	29	9,21	1,05	9,70			
	7.6	98,2	49,31	48,83	24,415	V	14,793	V	2407,81	3067,27	25	8,15	1,05	8,53			
	7.7	98,25	52,22	49,36	24,68	V	15,666	V	2577,58	3283,54	27	8,22	1,06	8,74			
	7.8	98,53	49,46	48,98	24,49	V	14,838	V	2422,55	3086,05	29	9,40	1,05	9,85			
	7.9	98,35	49,27	48,28	24,14	V	14,781	V	2378,76	3030,26	29	9,57	1,04	9,99			
	7.10	98,75	52,46	49,32	24,66	V	15,738	V	2587,33	3295,96	30	9,10	1,06	9,69			
	7.11	99,18	49,16	48,81	24,405	V	14,748	V	2399,50	3056,69	27	8,83	1,05	9,24	9,42	216,70	S1

---

(página propositadamente em branco)

Quadro 21 - Resultados dos Ensaios de Carga Pontual no Ponto de Amostragem 8

Amostra	Provete	Carga Rutura (P) Kn	Is(50) Mpa	Is(50) médio Mpa	Resistência à compressão uniaxial	
					UCS - 22 x Is(50) Mpa	Classe de resistência
8	8.1	22	7.25	9.58	210.85	S1
	8.2	28	9.80			
	8.3	33	1.43			
	8.4	31	10.55			
	8.5	28	9.35			
	8.6	35	11.74			
	8.7	26	8.96			
	8.8	29	9.67			
	8.9	28	9.74			
	8.10	26	9.02			
	8.11	26	8.75			



---

(página propositadamente em branco)



---

(página propositadamente em branco)

Quadro 23 - Resultados dos Ensaios de Carga Pontual no Ponto de Amostragem 9

Amostra	Provete	Carga Rutura (P) kN	Is(50) Mpa	Is(50) médio Mpa	Resistência à compressão uniaxial	
					UCS - 22 x Is(50) Mpa	Classe de resistência
9	9.1	30	10.01	10.39	228.69	S1
	9.2	26	8.88			
	9.3	31	9.83			
	9.4	37	12.75			
	9.5	30	9.78			
	9.6	30	10.00			
	9.7	37	11.83			
	9.8	38	13.09			
	9.9	33	11.00			
	9.10	30	10.3			
	9.11	29	9.21			



---

(página propositadamente em branco)

Quadro 24- Ficha Laboratorial de Ensaio PLT do Ponto de Amostragem 9

Amostra		Dimensões do provete				Verificação das dimensões do provete		Ensaio de Carga Pontual ("Point Load Test", ISRM, 1981, 1985, 2007) (LGM/ISEP)				Índice de resistência à carga pontual		Índice de resistência à carga pontual (D=50mm)		Resistência à compressão uniaxial	
		Comprimento	Largura	Distância entre ponteiros		Comprimento	Relação da distância entre ponteiros - largura do provete	Área	Diâmetro equivalente		Carga de Ruptura	Índice de resistência à carga pontual	Factor de correcção	Índice de resistência à carga pontual (D=50mm)	UCS	Classe de resistência	
Provede	L	W	D	D	L	0,5 x D	0,3 x W	A	De2	De	P	Is	F	Is(50) = F x Is	Valor médio	22 x Is(50)	
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	mm	mm	kN	Mpa	mm	Mpa	Mpa	Mpa	-
9.1	99,11	49,99	49,63	49,63	24,815	V	14,997	2481,00	3160,51	56,22	30	9,49	1,05	10,01			
9.2	97,92	49,34	48,8	48,8	24,4	V	14,802	2407,79	3067,25	55,38	26	8,48	1,05	8,88			
9.3	99,25	52,82	50,11	50,11	25,055	V	15,846	2646,81	3371,73	58,07	31	9,19	1,07	9,83			
9.4	99,06	49,49	48,09	48,09	24,045	V	14,847	2379,97	3031,81	55,06	37	12,20	1,04	12,75			
9.5	97,92	51,21	49,89	49,89	24,945	V	15,363	2554,87	3254,61	57,05	30	9,22	1,06	9,78			
9.6	98,3	51,62	48,12	48,12	24,06	V	15,486	2483,95	3164,27	56,25	30	9,48	1,05	10,00	10,39	228,69	S1
9.7	96,33	52,99	49,46	49,46	24,73	V	15,897	2620,89	3338,71	57,78	37	11,08	1,07	11,83			
9.8	98,92	48,97	48,59	48,59	24,295	V	14,691	2379,45	3031,15	55,06	38	12,54	1,04	13,09			
9.9	98,43	50,99	48,69	48,69	24,345	V	15,297	2482,70	3162,68	56,24	33	10,43	1,05	11,00			
9.10	99,31	49,46	48,22	48,22	24,11	V	14,838	2384,96	3038,17	55,12	30	9,87	1,04	10,32			
9.11	98,6	52,9	49,93	49,93	24,965	V	15,87	2641,30	3364,71	58,01	29	8,62	1,07	9,21			

---

(página propositadamente em branco)

No quadro 16 podemos verificar o grau de alteração do maciço e a resistência à compressão simples em MPa aferidas através do ensaio de carga pontual em cada ponto de amostragem, bem como a classe de resistência correspondente (ISRM, 1985, 2015).

Quadro 25 - Relação entre o Grau de Alteração, a Resistência à Compressão Simples (PLT) e a Classe de Resistência dos diferentes Pontos de Amostragem

Ponto Amostragem	Grau de alteração (ISRM, 1985)	Resistência à compressão simples (PLT) (Mpa)	Classe de resistência (ISRM, 1981)
1	W <sub>1</sub>	190,79	S2
2	W <sub>1</sub>	188,08	S2
3	W <sub>1-2</sub>	174,83	S2
4	W <sub>1-2</sub>	181,31	S2
5	W <sub>1-2</sub>	208,4	S1
6	W <sub>1</sub>	208,66	S1
7	W <sub>1</sub>	216,70	S1
8	W <sub>1</sub>	210,85	S1
9	W <sub>1</sub>	228,69	S1

### 3.7. - Ensaio com recurso esclerómetro portátil – Martelo de Schmidt

A resistência a compressão simples das rochas pode ser correlacionada com a sua dureza. Geralmente é associada com a chamada dureza de Schmidt que é determinada através do ensaio esclerométrico. Este valor pode ser correlacionado com a resistência a compressão simples da rocha constituinte da superfície ensaiada de acordo com o valor do seu peso volúmico.

O estudo da rocha com recurso ao esclerómetro portátil comportou duas fases:

#### i) Ensaio *In situ*



Figura 20- Ensaio in situ Pedreira da Curviã nº2.

## ii) Ensaaios Laboratoriais



Figura 21 - Ensaaios Laboratoriais – Instituto Superior de Engenharia do Porto (LGMC|ISEP)

Os ensaios *in situ* foram realizados na pedra em cada ponto de amostragem directamente no maciço, tendo sido realizados vinte e cinco disparos por ponto.

No caso dos ensaios *in situ*, o tratamento de dados consistiu na selecção dos quinze valores mais altos de vinte e cinco, seguido da sua conversão em valores para a resistência à compressão uniaxial através do ábaco de Miller e realizada a média dos valores para cada ponto de amostragem.

Em laboratório foram realizados nos provetes 3 series de 25 disparos em cada lote, perfazendo 75 disparos, de forma a obter uma maior representação estatística, sendo que foram utilizados em cada série de 25, os 15 disparos com valor mais alto, seguido da sua conversão através do ábaco de Miller e realizada a média dos valores de resistência à compressão.

Os valores da resistência à compressão simples segundo o ensaio do esclerómetro portátil, são os representados no quadro 26 para *in situ* e laboratório.

Quadro 26 - Relação entre a Resistência à Compressão Simples do Martelo Schmidt e Classe de Resistência dos Diferentes Pontos de Amostragem.

Ponto Amostragem	UCS (MPa)		Parâmetros do maciço	
	Esclerômetro portátil (Schmidt Hammer) Laboratório	Esclerômetro portátil (Schmidt Hammer) IN SITU	Classe de resistência S (ISRM, 1981)	Grau de alteração W (ISRM, 1995)
1	190,98	162,41	S2	W1
2	182,11	153,53	S2	W1
3	176,58	168,64	S2	W1-2
4	183,43	167,91	S2	W1-2
5	205,53	204,95	S1	W1-2
6	199,95	192,42	S1	W1
7	201,56	199,05	S1	W1
8	202,66	193,17	S1	W1
9	208,92	198,43	S1	W1

### 3.8. Comparação dos resultados

Os resultados da aferição da resistência à compressão simples, através do ensaio de carga pontual e do ensaio com esclerômetro portátil, podem ser apresentados no quadro 27.

Quadro 27 - Resumo da Resistência à Compressão Simples pelos diferentes métodos dos Pontos de Amostragem.

Ponto Amostragem	UCS (MPa)			Parâmetros do maciço	
	PLT	Esclerômetro portátil (Schmidt Hammer) Laboratório	Esclerômetro portátil (Schmidt Hammer) <i>in situ</i>	Classe de resistência S (ISRM, 1981)	Grau de alteração W (ISRM, 1995)
1	190,79	190,98	162,41	S2	W1
2	188,08	182,11	153,53	S2	W1
3	174,83	176,58	168,64	S2	W1-2
4	181,31	183,43	167,91	S2	W1-2
5	208,41	205,53	204,95	S1	W1-2
6	208,65	199,95	192,42	S1	W1
7	216,70	201,56	199,05	S1	W1
8	210,85	202,66	193,07	S1	W1
9	228,69	208,92	198,43	S1	W1

### 3.9. Correlação entre os valores de resistência à compressão uniaxial nos diferentes ensaios

Para se aferir a correlação entre os resultados obtidos pelos diferentes ensaios de resistência à compressão simples realizados, foi aplicado o modelo de regressão linear para determinar a correlação entre os valores.

Foi utilizado o modelo de regressão linear para análise da correlação entre os resultados obtidos pelos diferentes ensaios de resistência à compressão simples.

Desta forma, para além de determinar o modelo que melhor explica a correlação entre estes resultados, conseguimos determinar através da análise do  $R^2$ , o maior ou menor ajuste da regressão.

Foram comparados os valores de resistência à compressão simples dos ensaios PLT – Schmidt Laboratório, PLT – Schmidt *in situ* e Schmidt *in situ* – Schmidt Laboratório.

A figura 22 evidencia uma muito boa correlação ( $R^2=0.92$ ) entre os valores de resistência à compressão simples obtidos através do ensaio de carga pontual (PLT) e os valores obtidos através do ensaio com recurso ao esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt) em laboratório.

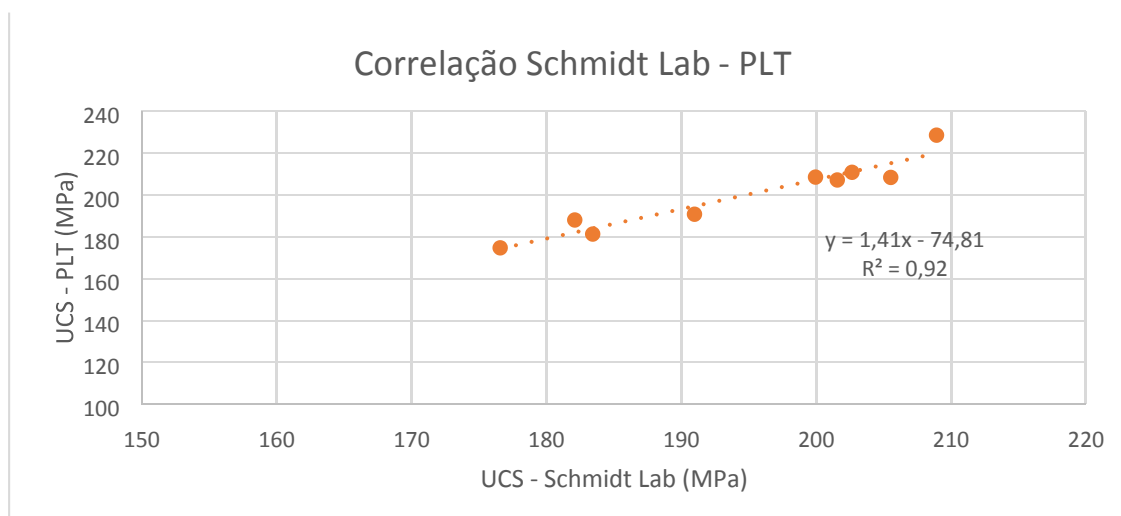


Figura 22 - Correlação entre os Valores de Resistência à Compressão Simples entre o Teste de Carga Pontual e do Martelo Schmidt em Laboratório.

A Figura 23 correlaciona os valores de resistência à compressão simples (UCS) dos ensaios com recurso a esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt) *in situ* e em laboratório, observamos que existe uma boa correlação entre os ensaios ( $R^2=0,79$ ). Seria de esperar que os valores de resistência à compressão simples obtidos *in situ* fossem menores do que os obtidos em laboratório porque na maioria dos casos, a presença de detritos no maciço afecta a magnitude dos valores de ressalto in

situ, apresentando estes valores mais baixos quando comparados com o tamanho-forma do provete (Aydan & Basu, 2015).

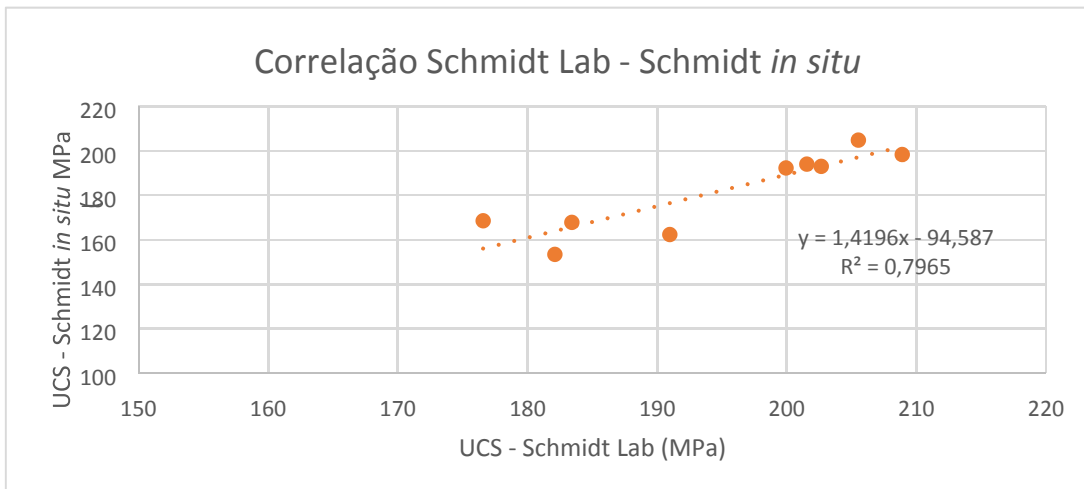


Figura 23- Correlação entre os Valores de Resistência à Compressão Simples entre Martelo Schmidt em Laboratório e do Martelo Schmidt In Situ.

A correlação entre os valores de resistência à compressão simples dos ensaios de carga pontual (PLT) e de ensaio com recurso a esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt) *in situ* é a mais baixa de todas ( $R^2=0.67$ ). Embora sendo uma correlação aceitável é a mais baixa pela natureza diferente dos dois tipos de metodologias e pelo facto de, como referido na análise da correlação entre os diferentes tipos de ensaio Schmidt (Laboratório e *in situ*) valores *in situ* tenderem a ser inferiores aos valores em laboratório, quer pelas possíveis dificuldades inerentes aos ensaios *in situ* e pelo facto de os ensaios Schmidt *in situ* terem sido efectuados directamente no maciço rochoso ao contrário dos ensaios em laboratório são em que os valores são referentes a ensaios em provetes normalizados.

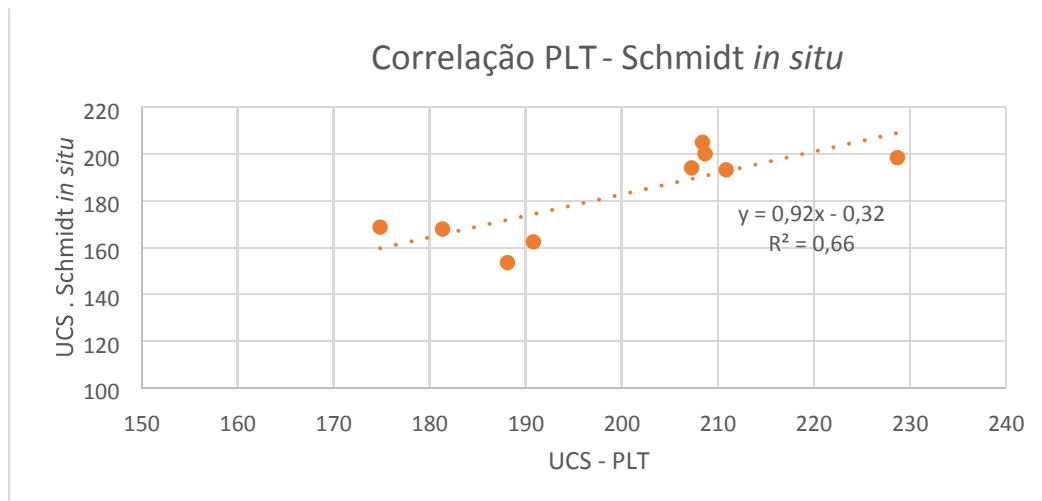


Figura 24 - Correlação entre os Valores de Resistência à Compressão Simples entre o Teste de Carga Pontual e do Martelo Schmidt *In Situ*.

A utilização das equações das rectas de regressão linear dos gráficos de correlação entre os diversos gráficos, permitirão achar o valor correspondente de resistência à compressão simples nos diversos ensaios. No quadro 28 estão representadas as resistências à compressão simples dos pontos em estudo, aferidas pelos ensaios de carga pontual e de esclerómetro portátil *in situ* e em laboratório bem como os parâmetros do maciço em estudo.

Quadro 28 – Quadro -Síntese das Características do Maciço - Rochoso

Ponto Amostragem	UCS (MPa)			Parâmetros do maciço			
	Point Load Test	Esclerómetro portátil -Schmidt Hammer - Laboratório	Esclerómetro portátil - Schmidt Hammer - <i>in situ</i>	Classe de resistência S (ISRM, 1981)	Grau de alteração W (ISRM, 1995)	Zona Geotécnica (Silva, 2014)	Cota de bancada (m)
1	190,79	190,98	162,41	S2	W1	ZG 3	354
2	188,08	182,11	153,53	S2	W1	ZG 2a	352
3	174,83	176,58	168,64	S2	W1-2	ZG 2b	345
4	181,31	183,43	167,91	S2	W1-2	ZG 2b	344
5	208,4	205,53	204,95	S1	W1-2	ZG 2b	313
6	208,65	199,95	192,42	S1	W1	ZG 1	315
7	216,70	201,56	199,05	S1	W1	ZG 1	313
8	210,85	202,66	193,17	S1	W1	ZG 1	313
9	228,68	208,92	198,43	S1	W1	ZG 1	343

---

(página propositadamente em branco)

De forma a estudar a relação entre as propriedades do maciço e a resistência à compressão simples, foram relacionados os seguintes parâmetros:

- i) Análise dos valores de resistência à compressão simples pelos diferentes métodos, em cada ponto de amostragem;
- ii) Resistência à compressão simples *versus* classe de resistência (S);
- iii) Resistência à compressão simples *versus* grau de alteração (W);
- iv) Resistência à compressão simples *versus* zonamento geotécnico existente (Silva, 2014);
- v) Resistência à compressão simples *versus* cota da bancada.

### 3.10 Análise dos valores de resistência à compressão simples pelos diferentes métodos, em cada ponto de amostragem

No quadro 29 apresentam-se os valores de resistência à compressão simples nos diferentes pontos obtidos pelos diferentes métodos em estudo.

Quadro 29 - Quadro da Resistência à Compressão Uniaxial nos diferentes pontos de amostragem através dos diversos métodos adoptados.

Ponto Amostragem	UCS (MPa)			Parâmetros do maciço	
	PLT	Esclerómetro portátil -Schmidt Hammer - Laboratório	Esclerómetro portátil - Schmidt Hammer - <i>in situ</i>	Classe de resistência S (ISRM, 1981)	Grau de alteração W (ISRM, 1981; GSE, 1995)
1	190,79	190,98	162,41	S2	W1
2	188,08	182,11	153,53	S2	W1
3	174,83	176,58	168,64	S2	W1-2
4	181,31	183,43	167,91	S2	W1-2
5	208,4	205,53	204,95	S1	W1-2
6	208,65	199,95	199,05	S1	W1
7	216,70	201,56	194,05	S1	W1
8	210,85	202,66	193,17	S1	W1
9	228,68	208,92	198,43	S1	W1

Por análise da figura 25, obtemos uma vista privilegiada dos valores de resistência à compressão simples em cada ponto de amostragem, pelas diferentes técnicas utilizadas. É perceptível que em cada ponto de amostragem, há uma tendência para os valores de resistência à compressão simples através do ensaio de carga pontual serem maiores que os valores de resistência encontrados através dos ensaios com recurso a esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt) em laboratório e *in situ*, respectivamente.

Conseguimos ainda facilmente reparar que entre os pontos 5 e 9 os valores de resistência à compressão simples são os superiores, sendo o ponto 9 o ponto que apresenta melhores índices de resistência à compressão simples e, em oposto, o ponto 3 com os valores mais baixos.

O ponto 5 foi o que obteve valores de resistência à compressão simples mais próximo pelos diferentes métodos.

Nos pontos 1 e 2 a diferença de valor entre os ensaios com recurso a esclerómetro portátil *in situ* apresentam uma maior diferença dos valores em laboratório, mais acentuada que nos restantes pontos onde a tendência são os valores em laboratório serem superiores aos *in situ*.

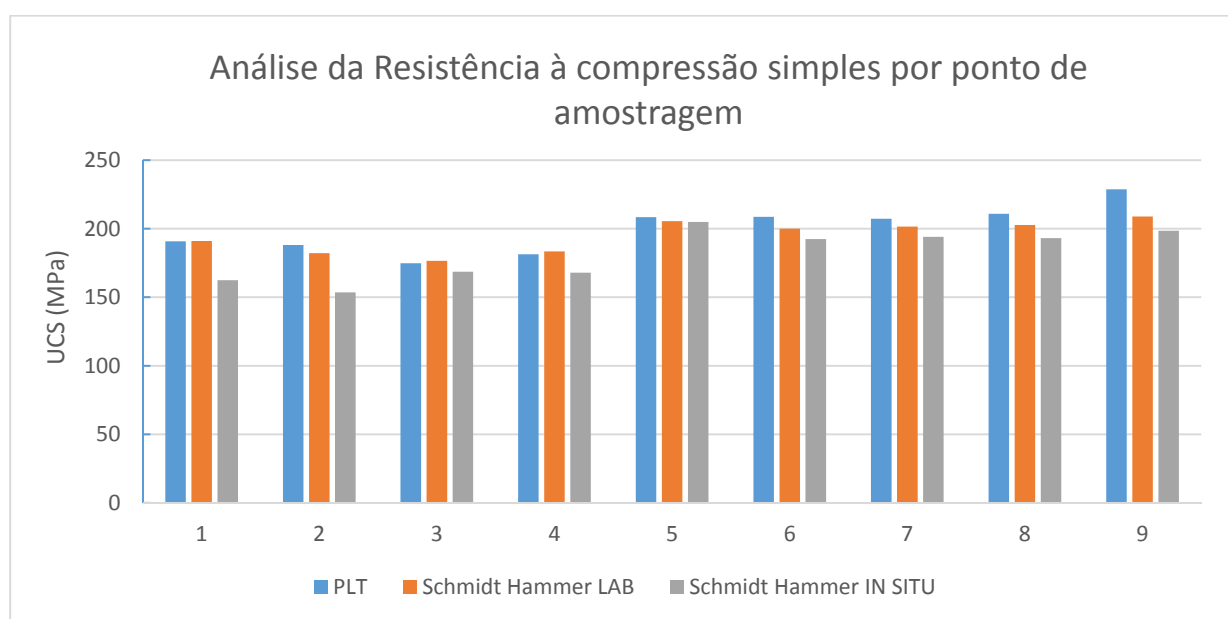


Figura 25 – Gráfico representativo da Análise da Resist por ponto de amostragem

Nos mapas das figuras 26 a 28 podemos analisar com mais detalhe os valores de resistência à compressão simples aferidos através dos diferentes métodos de ensaio e analisar a sua posição relativa.

Pela análise da figura 26, referente aos valores de resistência à compressão simples aferidos pelo ensaio de carga pontual (PLT) aferimos que os pontos com maior valor de resistência à compressão simples são aqueles localizados na Zona Geotécnica 1, sendo os mais elevados, os pontos PLT 8 e PLT 9. Estes 2 pontos estão muito próximos da Zona Geotécnica 2b e 2a respectivamente, mas apresentam valores mais elevados comparativamente aos pontos das zonas referidas.

Os valores de resistência dos ensaios nos pontos PLT 4 e PLT 3 são os mais baixos em termos de resistência estando localizados na Zona Geotécnica 2b. O Ponto PLT 7 (ZG1), está muito próximo

da fronteira entre a Zona Geotécnica 1 e a Zona Geotécnica 2b, mas comparativamente apresenta valores de ordem superior.

O ponto PLT 1 localizados na Zona Geotécnica 3, zona de exploração de rocha ornamental, apresenta valores de resistência à compressão simples através de ensaio de carga pontual, superior aos valores da Zona Geotécnica 2 (2a e 2b) mas inferiores aos pontos da Zona Geotécnica 1.

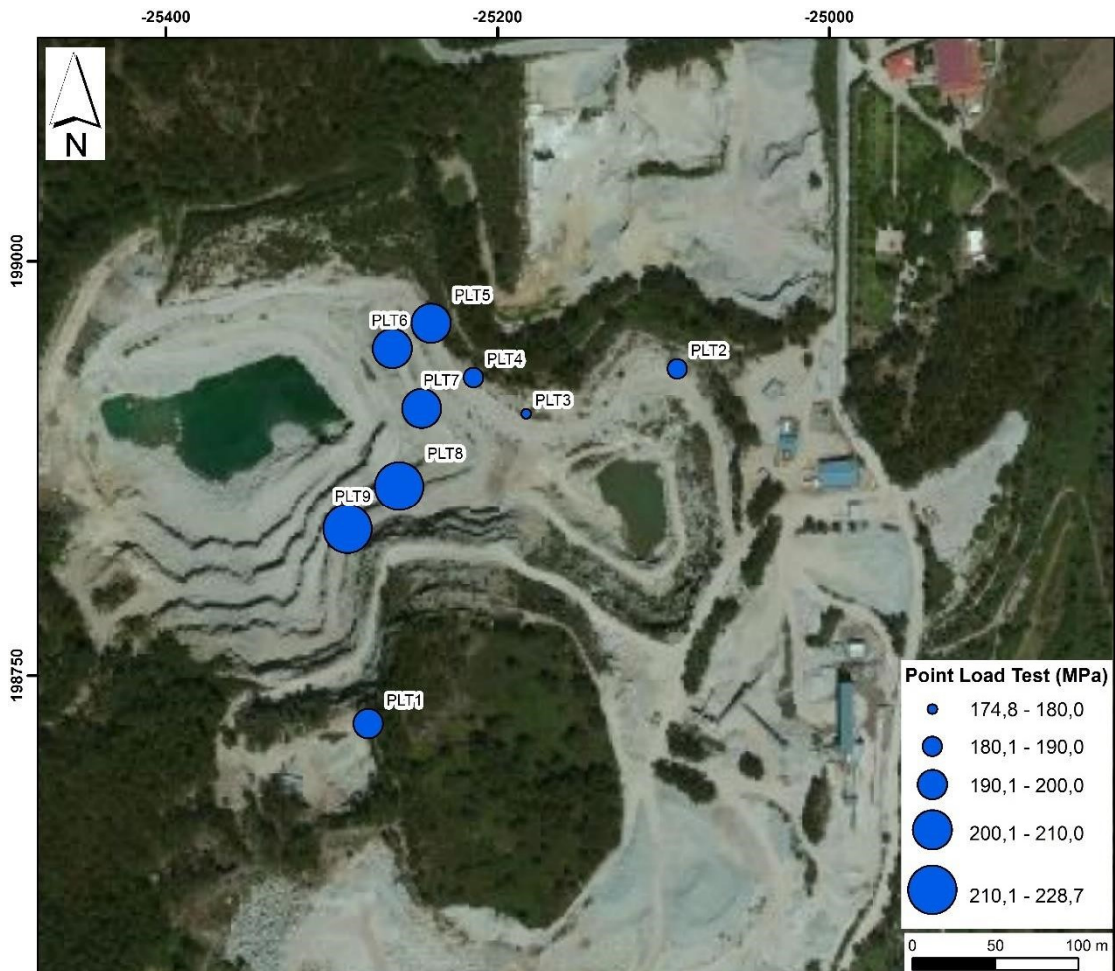


Figura 26- Resistência à compressão simples dos pontos amostragem (Ensaio PLT)

Os valores de resistência à compressão simples aferidos através do ensaio de esclerômetro portátil em Laboratório têm tendência para ser muito próximos dos valores aferidos através do ensaio de carga pontual. Pela análise da figura 27 concluímos que os pontos da Zona Geotécnica 1 apresentam resistências mais elevadas. Os pontos PLT3 e PLT4 da zona 2b e PLT2 da zona 2a são os que apresentam valores de resistência mais baixos.

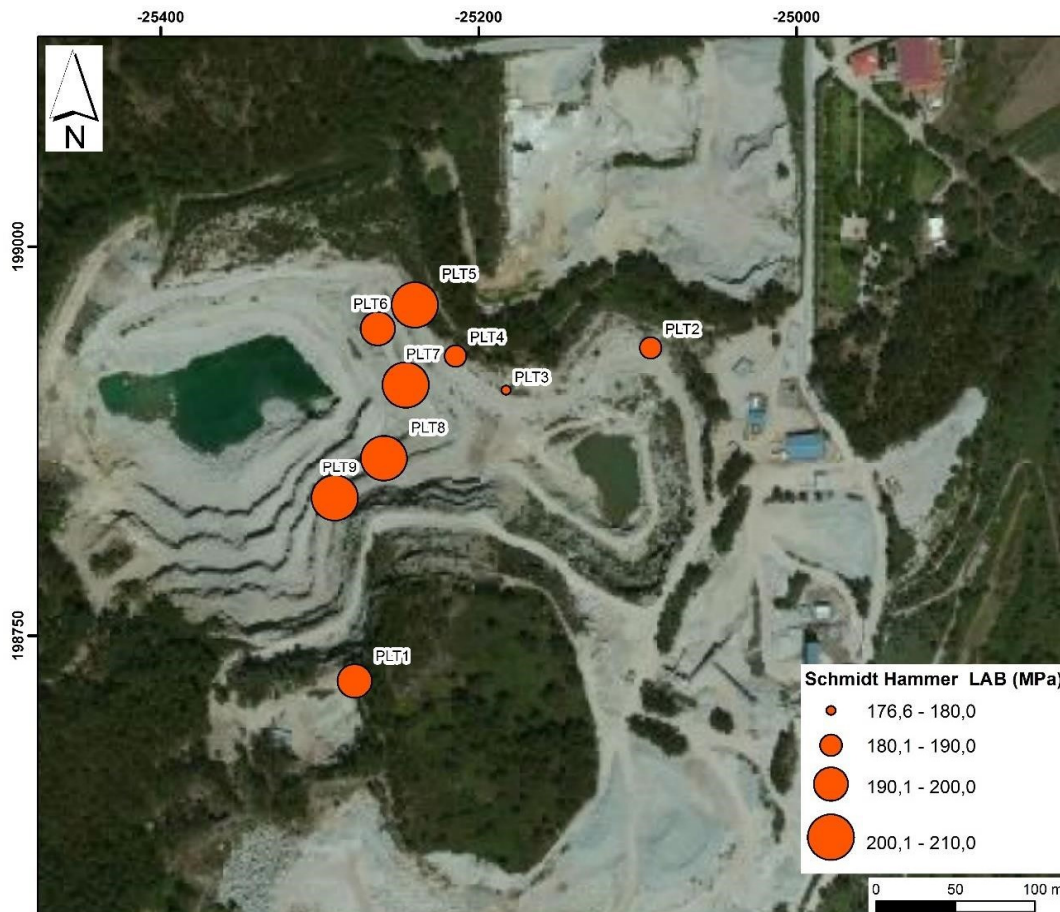


Figura 27- Resistência à compressão simples dos pontos amostragem (Ensaio Schmidt Laboratório)

Na figura 28, estão representadas as resistências à compressão simples aferidas com recurso ao ensaio de esclerómetro portátil *in situ*.

Comparativamente aos valores aferidos com recurso ao ensaio de carga pontual e ao ensaio de esclerómetro portátil em laboratório, os resultados do ensaio *in situ* apresentam valores mais baixos que os anteriores.

Por análise da figura 28, observa-se que o ponto PLT5 é o que apresenta maior resistência à compressão simples em detrimento do ponto PLT9 que apresentava os valores mais elevados nos outros dois ensaios (Carga pontual e Schmidt Lab). Não obstante, continua a haver tendência para os pontos PLT2, PLT3 e PLT4 das zonas 2a e 2b respectivamente, apresentarem os valores de resistência à compressão simples mais baixos sendo que o Ponto PLT1 (ZG3) através deste ensaio apresenta o seu valor mais baixo.

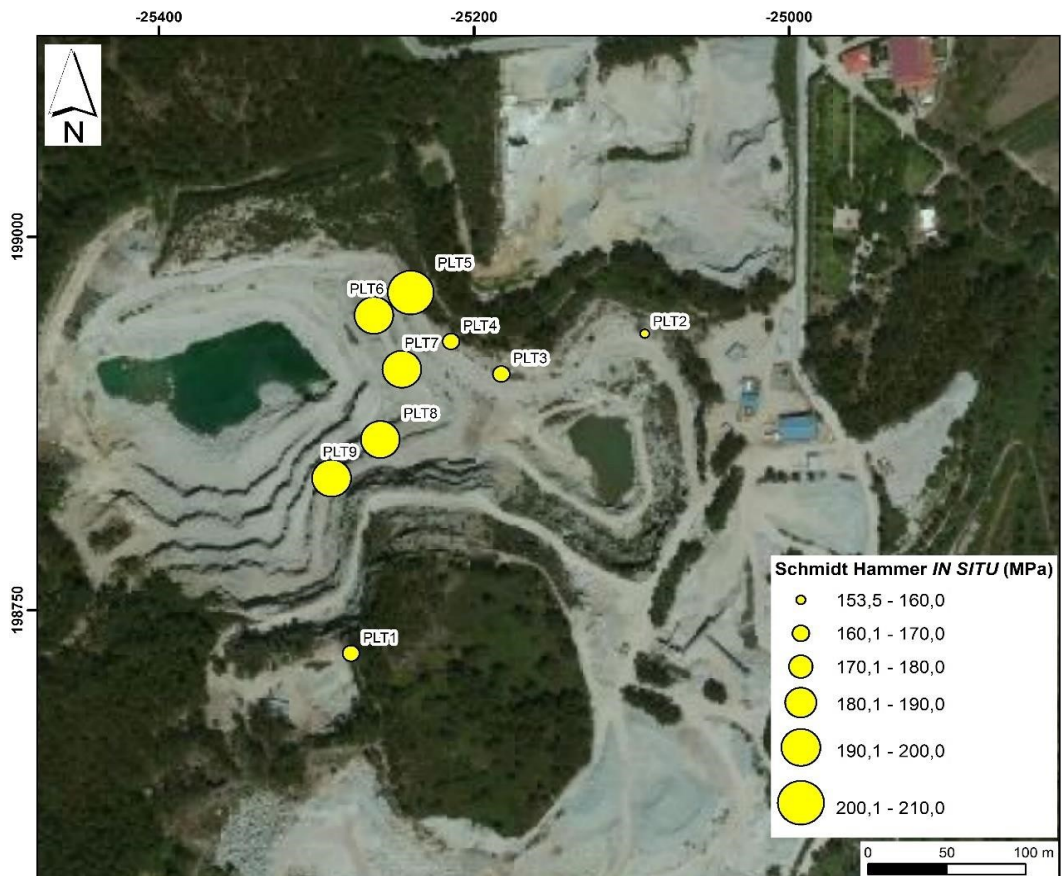


Figura 28- Resistência à compressão simples dos pontos amostragem (Ensaio Schmidt in situ)

### 3.11. Resistência à compressão simples versus classe de resistência

Anteriormente, classificamos os pontos de amostragem, em classes de resistência com base no seu valor de resistência à compressão simples (quadro 30).

Quadro 30 - Classes de Resistência por Pontos de Amostragem

Ponto Amostragem	Classe de Resistência (S) (ISRM, 1981)
1	S2
2	S2
3	S2
4	S2
5	S1
6	S1
7	S1
8	S1
9	S1

Agrupando os pontos em classes de resistência e calculando a resistência média de cada classe obtemos o quadro 31.

Quadro 31 - Resistência média de cada classe de resistência

Classe de resistência (ISRM, 1981)	Média da UCS (MPa)		
	PLT	Esclerómetro portátil -Schmidt Hammer - Laboratório	Esclerómetro portátil - Schmidt Hammer - <i>in situ</i>
S1	212,8	203,7	196,6
S2	183,8	183,3	163,1

A média da resistência à compressão simples de cada classe mostra que há uma tendência nos valores obtidos por ensaio de carga pontual serem superiores aos de Schmidt em laboratório e *in situ* respectivamente.

Nos pontos pertencentes à classe S<sub>1</sub> a resistência média obtida através dos ensaios de esclerómetro portátil, quer em laboratório, quer *in situ* é muito próxima da resistência à compressão simples correspondente ao limite inferior da classe de resistência S<sub>1</sub> (200 MPa), sendo que os valores de resistência para ensaio de Schmidt *in situ* são mesmo inferiores a esse limite, porém com uma diferença mínima.

Já nos os valores de S<sub>2</sub>, os resultados da resistência à compressão simples são muito próximos entre os valores correspondentes ao ensaio de carga pontual e o ensaio de esclerómetro portátil em laboratório (figura 29).

Os pontos pertencentes à classe S<sub>1</sub> pertencem todos à Zona Geotécnica 1, sendo os valores de S<sub>2</sub> correspondentes às restantes Zonas Geotécnicas (figura 30).

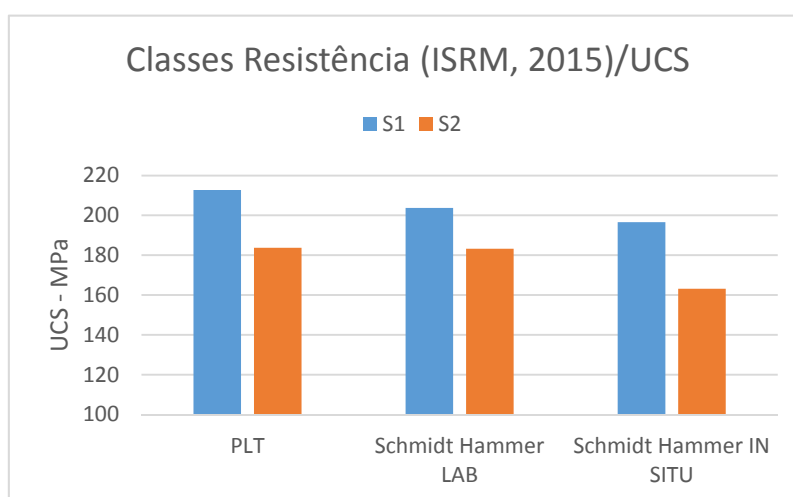


Figura 29 - Resistência média de cada classe de resistência.

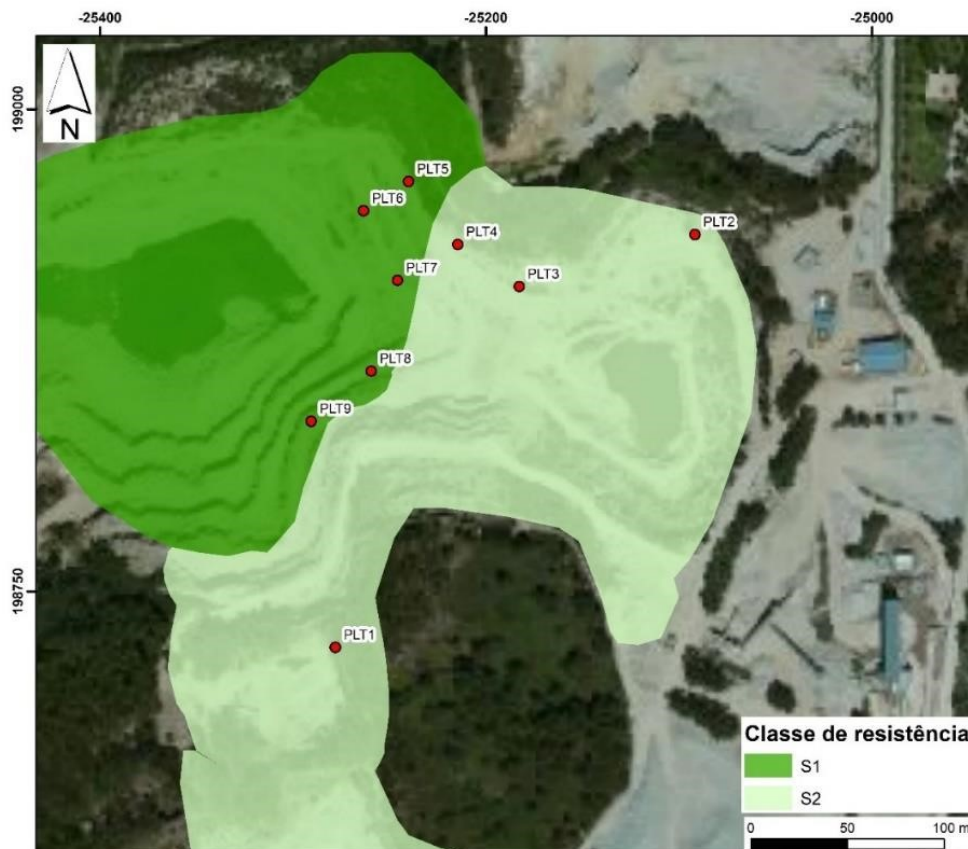


Figura 30- Uma proposta do zonamento da resistência à compressão simples em classes de resistência (ISRM, 2015)

### 3.12. Resistência à compressão simples versus grau de alteração (W)

Cada ponto de amostragem foi classificado quanto ao seu grau de alteração. Desse arranjo resultou o quadro 32.

Quadro 32- Grau de Alteração por Ponto de Amostragem

Ponto Amostragem	Grau de alteração (W) (ISRM, 1981)
1	W1
2	W1
3	W1-2
4	W1-2
5	W1-2
6	W1
7	W1
8	W1
9	W1

Calculando a média da resistência à compressão simples em cada grau de alteração por método utilizado obtemos o quadro 33.

Quadro 33 - Média da Resistência à Compressão Simples em cada grau de alteração.

Grau de alteração (W) (ISRM, 1985)	Média da UCS (Mpa)		
	PLT	Esclerómetro portátil - Schmidt Hammer - Laboratório	Esclerómetro portátil - Schmidt Hammer - <i>in situ</i>
W1	205,7	197,7	182,3
W1-2	188,2	188,5	180,5

Os valores de resistência à compressão simples, independentemente do método utilizado, são superiores nos pontos onde a rocha apresenta maior qualidade ( $W_1$ ). Nos valores obtidos pelo método de ensaio de carga pontual, essa diferença é mais acentuada quando comparada com os valores encontrados com recurso a esclerómetro portátil, sendo a resistência à compressão simples nas zonas do maciço classificadas como  $W_1$  muito próximas das da zona classificada como  $W_{1-2}$  (figura 31).

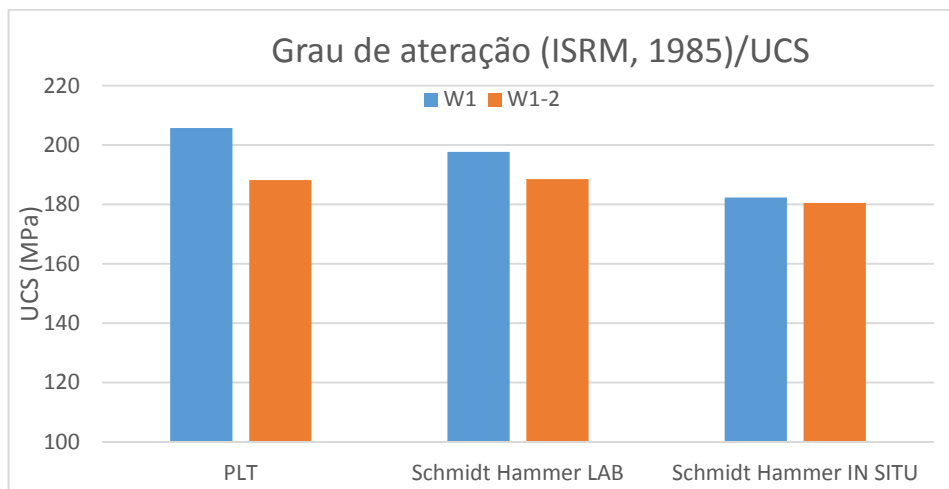


Figura 31 - Média da resistência à compressão simples em cada grau de alteração.

### 3.13. Resistência à compressão simples versus zona geotécnica

Como referido anteriormente, referenciando a posição dos pontos de amostragem deste estudo no mapa de zonamento geotécnico da Pedreira da Curviã (figura 33) podemos classificar os pontos como pertencentes às zonas geotécnicas da seguinte forma como se observa no quadro 34.

Quadro 34 - Média da resistência à compressão simples em cada grau de alteração.

Ponto Amostragem	Zona Geotécnica (Silva, 2014)
1	ZG 3
2	ZG 2a
3	ZG 2b
4	ZG 2b
5	ZG 1
6	ZG 1
7	ZG 1
8	ZG 1
9	ZG 1

Os pontos foram agrupados em zonas geotécnicas e foi calculada a média da resistência à compressão simples por zona geotécnica (quadro 35).

Quadro 35 - Média da resistência à compressão simples por zona geotécnica

Zona Geotécnica (Silva, 2014)	UCS (Mpa)		
	PLT	Esclerómetro portátil -Schmidt Hammer - Laboratório	Esclerómetro portátil - Schmidt Hammer - <i>in situ</i>
ZG 1	212,8	203,7	198,1
ZG 2a	188,1	182,1	153,5
ZG 2b	178,1	180,0	168,3
ZG 3	190,8	191,0	162,4

Por análise da figura 32 observamos que a Zona Geotécnica 1 é a zona que apresenta maior valor de resistência à compressão simples, seguida das Zona Geotécnica 3, 2a e 2b.

Se agruparmos a resistência à compressão simples média das Zonas Geotécnicas em classes de resistência temos que a Zona Geotécnica 1 corresponderia à classe de resistência  $S_1$  e as restantes zonas pertenceriam a classe  $S_2$ .

Conclui-se que a Zona Geotécnica 1 é a zona mais capaz do ponto de vista de resistência à compressão simples, estando as restantes três zonas com valores de resistência à compressão simples muito aproximados.

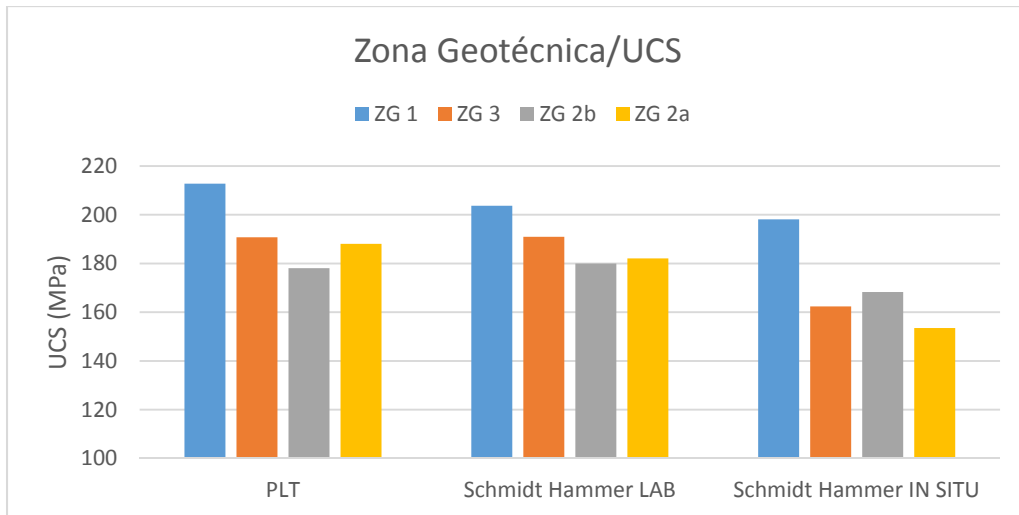
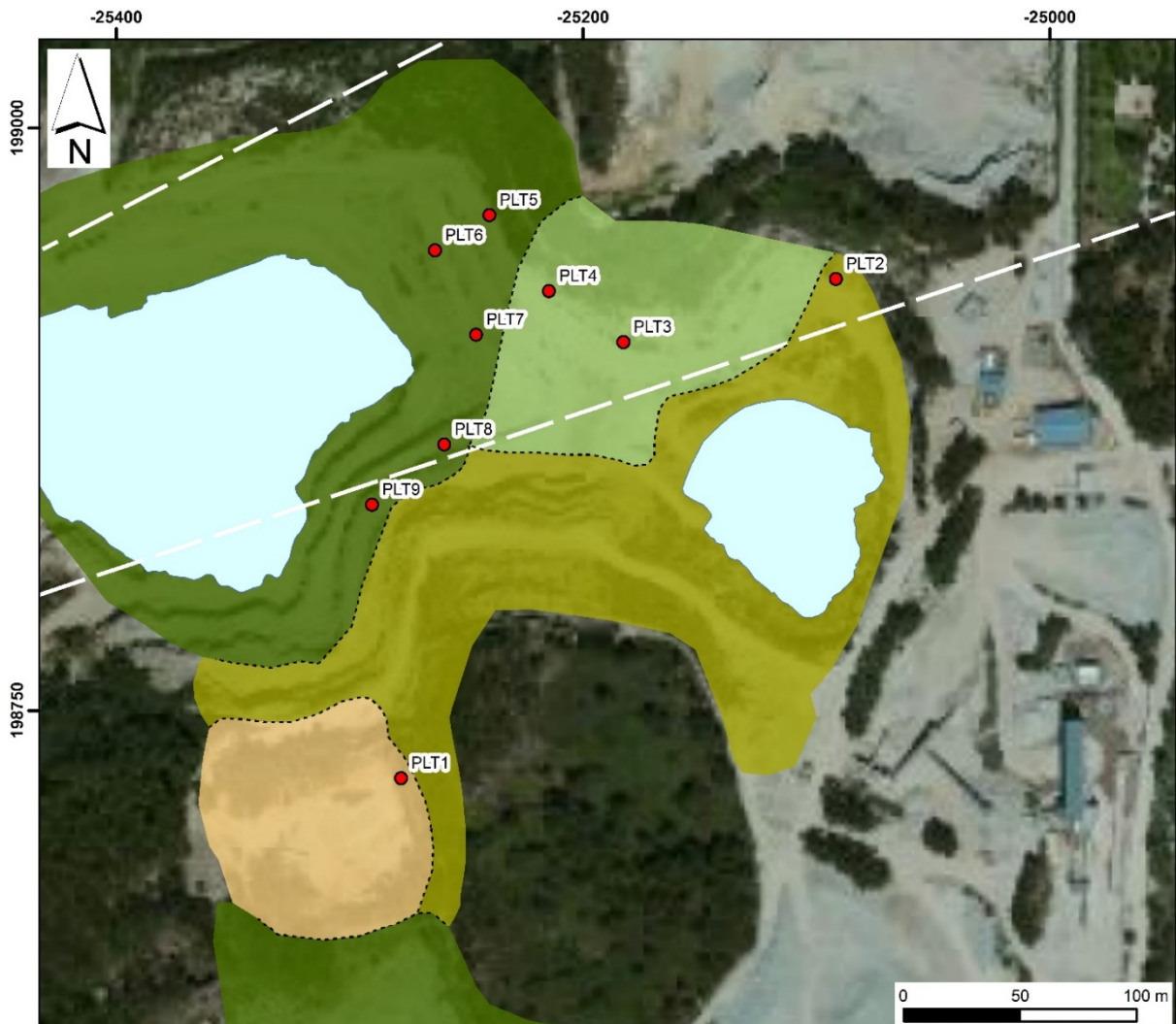


Figura 32 - Resistência à compressão simples média por zona geotécnica.

Recorrendo à localização dos pontos nas Zonas Geotécnicas e aos seus valores de resistência à compressão simples foi possível actualizar o mapa de Zonas Geotécnicas da Pedreira da Curviã (figura 33). A informação sobre as Zonas Geotécnicas e o comportamento expectável do material em pontos distintos da exploração, permitem um maior aproveitamento do georrecurso com vantagens do ponto de vista operacional e económico.



**Zonas Geotécnicas: versão preliminar (Outubro de 2016)**

- ZG1 - Granito de grão médio, com tendência porfiróide, de duas micas, essencialmente biotítico, são ( $W_1$ ); resistência à compressão uniaxial elevada  $S_1$  (200 - 210 MPa); espaçamento afastado a médio  $F_2$  a  $F_3$  (120 a 160 cm / 45-60 cm).
- ZG2a - Granito de grão médio, com tendência porfiróide, de duas micas, essencialmente biotítico, são ( $W_1$ ); resistência à compressão uniaxial elevada  $S_2$  (180 - 190 MPa); espaçamento médio a muito afastado  $F_3$  a  $F_1$  (90 a 115 cm / 200 a 235 cm).
- ZG2b - Granito de grão médio, com tendência porfiróide, de duas micas, essencialmente biotítico, são a pouco alterado ( $W_1$  a  $W_2$ ); resistência à compressão uniaxial elevada  $S_2$  (170 - 180 MPa); espaçamento afastado  $F_2$  (80 - 90 cm).
- ZG3 - Granito de grão médio, com tendência porfiróide, de duas micas, essencialmente biotítico, são ( $W_1$ ); resistência à compressão uniaxial elevada  $S_2$  (190 MPa); espaçamento muito afastado  $F_1$  (460 - 475 cm).

- Lineamentos tectónicos foto-interpretados
- Lago artificial da exploração

ZG1 a ZG2b: Rocha Industrial (Agregados)  
 ZG3: Rocha Ornamental

Figura 33 - Proposta do zonamento geotécnico actualizado da Pedreira da Curviã (Outubro 2016)

### 3.15 Resistência à compressão simples e cota dos pontos

As cotas de bancada dos pontos de amostragem, referidas no quadro 36, permitem-nos estudar a variação da resistência à compressão simples de pontos localizados a cotas diferentes.

Quadro 36 - Cota do Ponto de Amostragem.

Ponto	Cota Ponto (m)
PLT 1	354
PLT 2	352
PLT 3	345
PLT 4	344
PLT 5	313
PLT 6	315
PLT 7	313
PLT 8	313
PLT 9	343

As cotas dos pontos foram agrupadas em intervalos de 20 metros e foi feita a média da resistência à compressão simples nesses intervalos obtendo os valores indicados no quadro 37.

Quadro 37 - Média da Resistência à Compressão Simples em intervalos de 20 metros.

Cotas (m)	PLT	UCS (Mpa)	
		Esclerómetro portátil -Schmidt Hammer - Laboratório	Esclerómetro portátil - Schmidt Hammer - <i>in situ</i>
310-330	208,8	202,4	196,1
330-350	194,9	189,6	178,3
350	189,4	186,5	158,0

A figura 34 ilustra que independentemente do método utilizado para determinar a resistência à compressão simples, esta é maior nos pontos localizados a cotas inferiores do maciço entre os 310 e 330 metros. Podemos também observar que os valores de resistência à compressão simples aumentam à medida que a cota decresce, sendo os pontos localizados a cotas mais elevadas caracterizados por resistência à compressão simples inferior aos de cotas mais baixas.

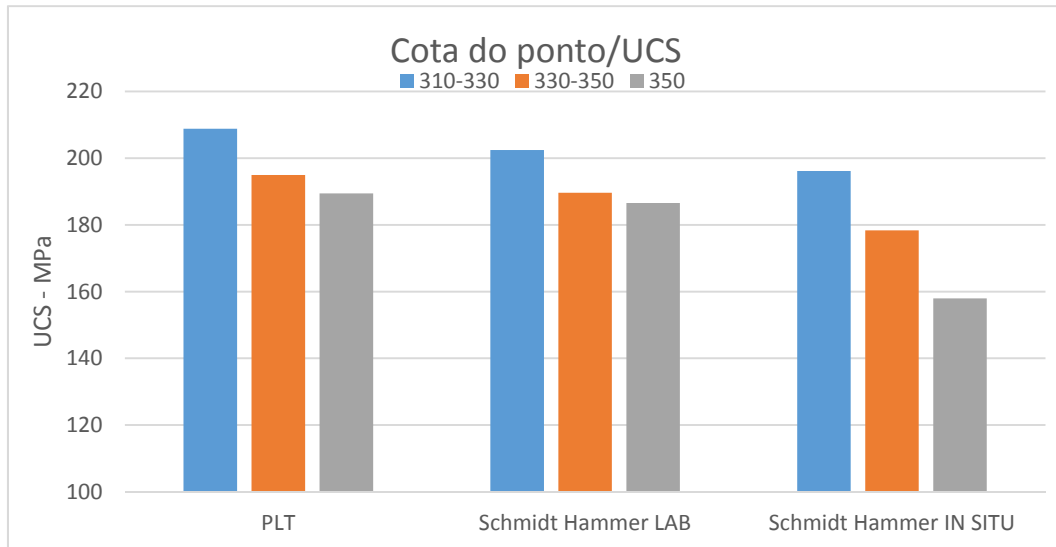


Figura 34 - Média da resistência à compressão simples em intervalos de 20 metros.

---

(página propositadamente em branco)

---

## Capítulo IV - Conclusões

---

---

(página propositadamente em branco)

---

#### 4. Conclusões

Esta dissertação investigou a resistência à compressão simples do maciço da Pedreira da Curviã nº2 através dos ensaios de carga pontual (PLT – *Point Load Test*) e dos ensaios com recurso a esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt – Proceq, Tipo L) a um conjunto de provetes normalizados em laboratório e *in situ* de forma a classificar o georrecurso numa óptica da valorização futura.

O conhecimento do maciço rochoso e do zonamento geotécnico permitem uma gestão otimizada do maciço rochoso.

Do estudo geológico-geotécnico e geomecânico efectuado resultam os seguintes aspectos conclusivos:

O material rochoso em estudo corresponde a um monzogranito de grão médio, de tendência porfiróide, de duas micas, com predomínio de biotite. Possui cor geralmente cinzenta e textura bastante uniforme. A análise dos dados do grau de alteração do material-rocha permitiu classificar como maioritariamente, são a pouco alterado, W1, ocorrendo em percentagens, algo expressivas descontinuidades ligeiramente alteradas, W<sub>1-2</sub>.

Dos nove pontos em análise, os valores de resistência à compressão simples são mais elevados no ensaio de carga pontual, seguidos dos valores dos ensaios por esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt) em laboratório e *in situ*.

O ensaio de esclerómetro portátil em laboratório e o ensaio de carga pontual são os ensaios que apresentam melhor correlação entre si ( $R^2=0.92$ ).

Os valores de resistência à compressão simples são menores em cotas mais elevadas e aumentam com a profundidade da cota, variando aproximadamente 10 MPa entre os pontos em cotas superiores a 350 metros e os pontos à cota 330 e aproximadamente 15 MPa entre os pontos situados à cota 330 e os pontos à cota 310.

O zonamento geotécnico da Pedreira da Curviã foi sistematizado conforme a finalidade expectável que as faces expostas do maciço indicavam, ou seja, produção de rocha ornamental (ZG3) e/ou rocha industrial para agregados (ZG1 a ZG2b) e reunidos os seguintes atributos das zonas geotécnicas:

- ZG1: Granito de grão médio, com tendência porfiróide, de duas micas, essencialmente biotítico, são (W1), com espaçamento afastado a médio F2 a F3 (120 a 160 cm / 45 a 60 cm) e resistência à compressão simples muito elevada S<sub>1</sub> (200-210 MPa);

---

- ZG2a: Granito de grão médio, com tendência porfiróide, de duas micas, essencialmente biotítico, são (W1), com espaçamento médio a muito afastado F3 a F1 (90 a 115 cm / 200 a 235 cm) e resistência à compressão simples elevada  $S_2$  (180-190 MPa).

-ZG2b: Granito de grão médio, com tendência porfiróide, de duas micas, essencialmente biotítico, são a pouco alterado (W1 a W2) com espaçamento afastado F2 (80 – 90 cm) e cm resistência à compressão simples elevada  $S_2$  (170-180 MPa);

- ZG3: Granito de grão médio, com tendência porfiróide, de duas micas, essencialmente biotítico, são (W1), com espaçamento muito afastado F1 (460 – 475 cm) e com resistência à compressão simples elevada  $S_2$  (190 MPa).

O zonamento geotécnico permitiu definir e classificar o maciço rochoso de acordo com as suas características geotécnicas a curto e a longo prazo. A análise das características do maciço aliadas à cartografia tornam o estudo do comportamento geotécnico e geomecânico um auxiliar valioso na gestão sustentável dos recursos geológicos, na medida em que permitirá o conhecimento da resistência do maciço aliado as características do mesmo. Trata-se assim, de um zonamento do maciço rochoso dentro de limites bem definidos e aceitáveis em termos de homogeneidade litológica, grau de alteração (W) e grau de resistência (S).

Numa perspectiva de aproveitamento de georrecurso, recomenda-se que estudos futuros incidam sobre:

A realização de ensaios de carga pontual (“Point Load Test”) a novos provetes, referentes a nova campanha de colheita de amostras como complemento à caracterização mecânica do maciço rochoso em corroboração directa com os valores de resistência à compressão uniaxial obtidos através do ensaio esclerométrico (“Martelo de Schmidt”, Proceq, tipo L).

A prospecção geológica de superfície, aplicando a técnica de amostragem linear, aos troços das bancadas onde não foi possível a cartografia das superfícies expostas do maciço rochoso com vista ao refinamento da cartografia geotécnica e ao estudo da compartimentação do georrecurso.

---

## **Capítulo V – Referências Bibliográficas**

---

---

(Página propositadamente em branco)

---

## 5. Referências bibliográficas

Aydin, A. & Basu, A. 2005. The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*, 41, 211–14.

Aydin A., 2008. ISRM suggested method for determination of the Schmidt Hammer rebound hardness: revised version. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(3): 627-634.

Cavalheiro A., Baptista J. S., Carvalho J.S., (2002). Estudo da pedreira da Curviã N.º2 da Secil Britas S.A. – relatório técnico e parecer relativo à produção de balastro normal de acordo com a instrução técnica IT/DIF/01/75 da CP. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

Chaminé H.I., Afonso M.J., Teixeira J., Ramos L., Fonseca L., Pinheiro R. & Galiza A.C. (2013). Using engineering geosciences mapping and GIS-based tools for georesources management: lessons learned from rock quarrying. *European Geologist Journal*, 36: 27-33.

Dias A., 2013. Influência dos parâmetros geotécnicos na qualidade do desmonte de maciços rochosos fracturados. Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP. (tese de mestrado).

Farinha Ramos J.M., Casal Moura A., Moreira A. & Oliveira A., 2003. Estudo geológico da pedreira da Curviã N.º2 (Joane, V. N. Famalicão): características da fracturação. In: Portugal Ferreira M. (coord.), *A Geologia de Engenharia e os Recursos Geológicos: recursos geológicos e formação*. Volume de Homenagem ao Prof. Doutor Cotelos Neiva, Imprensa da Universidade, Série Investigação, Coimbra. 2:323-334.

Ferrer M. & González de Vallejo L., 2007. Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. Publicaciones ITGE, Madrid.

González de Vallejo, L. I.; Ferrer, M.; Ortuño, L. & Oteo, C. [coords.], 2002. *Ingeniería geológica* Prentice Hall, Madrid, 715 pp. González de Vallejo, L.I. & Ferrer, M. (2011). *Geological engineering*. CRC Press, Taylor-Francis group, 725 pp.

GSE - Geological Society Engineering Group Working Party Report, 1995. The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Geological Society, 28 (3): pp. 207-242.

IGeoE - Instituto Geográfico do Exército, 1997. Carta Militar de Portugal, à escala 1/25.000, Série M888: folha 70 (Braga).

IGeoE - Instituto Geográfico do Exército, 1998. Carta Militar de Portugal, à escala 1/25.000, Série M888: folha 84 (Selho-Guimarães).

---

ISRM [International Society for Rock Mechanics], 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomechanics*. 15 (6): pp. 319-368.

ISRM [International Society for Rock Mechanics], 1981. Basic geotechnical description of rock masses *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 18: pp. 85-110.

ISRM [International Society for Rock Mechanics], 1985. Suggested method for determining point load strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 22: 51-60.

ISRM [International Society for Rock Mechanics] 2007. The complete ISRM suggested methods for characterization, testing and monitoring: 1974-2006. In: Ulusay, R. & Hudson, J.A. (eds.), suggested methods prepared by the Commission on Testing Methods, ISRM. Ankara, Turkey. 628 pp.

ISRM [International Society for Rock Mechanics] 2015. The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014. In: Ulusay, R. (ed.), suggested methods prepared by the Commission on Testing Methods, ISRM. Springer, Berlin, 293 p.

Montenegro de Andrade, M.; Noronha, F. & Rocha, A. 1986. Carta Geológica de Portugal, folha 9BGuimarães, escala 1:50000. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

Pedrosa, M.Y., 1998. Carta Hidrogeológica de Portugal - Notícia Explicativa da Folha 1, escala 1:200000. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa.

Pereira, E., 1992. Carta Geológica de Portugal - Notícia Explicativa da Folha 1, Escala 1/200000. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 76 pp.

Schmidt, E., 1951. A non-destructive concrete tester. *Concrete*, 59 (8): 34-35.

Silva D., 2014. Cartografia de zonamento geotécnico no apoio ao planeamento e valorização da exploração do georrecurso: o caso do maciço rochoso da Curviã (Joane). Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP. (Tese de Mestrado).