



Proposta de modelo para obtenção do Work Index das rochas

SÉRGIO TABORDA PASSOS COUTINHO

Outubro de 2015



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA



Proposta de modelo para obtenção do *Work Index* das rochas

Sérgio Taborda Passos Coutinho



2015



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Proposta de modelo para obtenção do *Work Index* das rochas

Sérgio Taborda Passos Coutinho

1081705

*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 Doutor José Augusto de Abreu Peixoto Fernandes, Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*

[esta folha só será preenchida pelo director do mestradona versão final:

NÃO COLOCAR NA VERSÃO FINAL PROVISÓRIA]

Júri

Presidente

Doutor NOME COMPLETO

Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor NOME COMPLETO

Professor Associado com Agregação, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

Doutor NOME COMPLETO

Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutora NOME COMPLETO

Professora Adjunta, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Mestre NOME COMPLETO

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

[esta folha será o verso da folha anterior e
só é preenchida pelo director do mestrado
e a incluir APENAS na versão final]

A tese de mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente (MEGG) foi defendida em prova pública, pelo(a) Licenciado(a) XXXXXXXX, no Auditório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Geotécnica (ISEP) em XX de XXXXX de 2015 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de XX (XXXXXXX) valores, cuja fundamentação se encontra em acta.

Dedico esta tese:

Ao meu Avô e à minha família....

Agradecimentos

Estendo os meus profundos agradecimentos às seguintes entidades e pessoas sem as quais a realização e conclusão desta tese teriam sido impossíveis.

Ao meu orientador, Professor José Fernandes (ISEP), pela orientação e apoio incansável ao longo da elaboração desta tese de mestrado, mesmo quando esta não mostrava fim à vista.

À Professora Sílvia Spínola (ISEP) pela cedência das amostras de rocha utilizadas nesta tese, assim como pelo esclarecimento de qualquer dúvida relacionada com as mesmas.

Ao Director do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC), do Instituto Superior de Engenharia do Porto, por me ter permitido realizar todos os ensaios necessários, pelo apoio contínuo na execução deles e no esclarecimento de qualquer dúvida que surgiu relacionada com os mesmos.

Ao Laboratório de Preparação de Minérios da FEUP pela permissão da utilização dos seus equipamentos para redução do calibre de amostras e à Professora Cristina Vila (FEUP) pelo seu auxílio nessas operações.

Palavras-chave

Work Index, Fragmentabilidade, Rochas, Propriedades físicas.

Resumo

Este trabalho pretende estabelecer uma relação entre o *Work Index* e algumas propriedades das rochas. Através da pesquisa bibliográfica foram identificadas varias propriedades com possível influência no valor do *Work Index*, das quais foram seleccionadas a massa volúmica aparente, a resistência à carga pontual, a composição química, a composição mineralógica e a abrasividade. Adicionalmente a porosidade aberta e resistência à compressão também foram analisadas. Assim foram analisadas 10 amostras de rocha, quatro de granitos, uma de quartzodiorito, uma de ardósia, uma de serpentinito, uma de calcário, uma de mármore e uma de sienito nefelínico, sobre as quais já eram conhecidos os valores de cinco das propriedades referidas previamente, tendo sido determinados os valores das ainda desconhecidas, resistência à carga pontual e a abrasividade que está representada através do resultado do ensaio capon. Devido à dificuldade de execução do ensaio de determinação do *Work Index* de Bond foram recolhidos dados bibliográficos de valores do *Work Index* para as amostras de rocha seleccionadas e adoptado o valor médio para cada uma. Os dados obtidos foram tratados estatisticamente através do método de análise de componentes principais assim como através de regressões lineares simples e múltiplas. A análise de componentes principais permitiu identificar várias propriedades da rocha com possível influência sobre o *Work Index* de entre as analisadas. Foi possível estabelecer uma relação entre o *Work Index* e quatro das propriedades seleccionadas, designadamente a porosidade aberta, a resistência à compressão, a resistência à carga pontual e a abrasividade.

Keywords

Work Index, Crushability, Rocks, Physical properties

Abstract

This work's intention is to establish a relation between *Work Index* and rock properties. Through bibliographic research several properties with possible influence on the *Work Index* were identified, of which the following five were selected for in this work, such as density, point load strength, chemical composition, mineralogical composition and abrasivity. Additionally porosity and compressive strength were also analysed. Thus ten rock samples were gathered, four samples of granites, one sample of quartzdiorite, one sample of serpentinite, one sample of limestone, one sample of marble and one sample of nepheline syenite. The results of five properties of rock samples were already known and the unknown values of the remaining properties were evaluated. Those properties were point load strength and abrasivity which is represented through the results of the capon test. Due to the difficult execution of the tests needed to determine the Bond *Work Index* bibliographical data for the *Work Index* of selected rock samples was gathered and a medium value for each one was adopted. The gathered data was treated statistically through Principal Component Analysis as well as through linear and multiple regressions. Principal component analysis allowed the identification of several rock properties among those analyzed with possible influence over the *Work Index*. It was possible to establish a valid relation between *Work Index* and four of the selected properties, such as porosity, compressive strength, point load strength and abrasivity.

Índice

1.	Introdução	23
1.1.	Enquadramento.....	24
1.2.	Objectivos.....	25
1.3.	Estrutura.....	25
2.	Estado da arte.....	27
2.1.	Propriedades físicas.....	29
2.2.	Propriedades Químicas	37
2.3.	Propriedades Morfológicas	40
3.	Enquadramento geográfico e geológico das rochas em estudo	47
3.1.	Granito Cristal Azul.....	49
3.2.	Granito Amarelo Vila Real	50
3.3.	Granito Cinzento Claro de Pedras Salgadas	51
3.4.	Quartzodiorito Cinzento Favaco.....	52
3.5.	Granito Rosa Monção.....	54
3.6.	Sienito Nefelínico Cinzento Monchique	55
3.7.	Calcário Moleanos Macio	56
3.8.	Xisto Ardósia, Ardósia de Valongo	57
3.9.	Serpentinito Verde Donai.....	59
3.10.	Calcário Cristalino Branco Rosado.....	60
4.	Metodologias de análise	62
4.1.	Análise química	64
4.2.	Composição mineralógica	65
4.3.	Massa volúmica aparente e porosidade aberta	66
4.4.	Resistência à compressão	68
4.5.	Carga pontual	69
4.6.	Ensaio capon.....	71
5.	Análise e interpretação de resultados de ensaios de identificação.....	73
5.1.	Análise química	74
5.2.	Composição mineralógica	75
5.3.	Resistência à compressão	77
5.4.	Massa volúmica e porosidade aberta	77
5.5.	Carga pontual	79
5.6.	Ensaio capon.....	86

6.	Análise Estatística.....	87
6.1.	Recolha de Valores <i>Work Index</i>	88
6.2.	Análise de componentes principais	90
6.3.	Regressão simples e múltipla	96
6.3.1.	Análise de regressão linear simples	98
6.3.2.	Análise de regressão linear múltipla	105
7.	Conclusões e perspectivas futuras.....	109
8.	Bibliografia	113

Índice de Figuras

Figura 1: Mapa de Portugal com as zonas de extracção das amostras.....	48
Figura 2: Extracto da Carta Geológica, Folha 9-B Guimarães, Escala 1:50 000 (Spínola, 2015).....	49
Figura 3: Amostra de Cristal Azul.	50
Figura 4: Extracto da Carta Geológica de Portugal, Folha 2, Escala 1:200 000 (Spínola, 2015).....	50
Figura 5: Amostra de Amarelo Vila Real.....	51
Figura 6: Extracto da Carta Geológica de Portugal, Folha 2, Escala 1:200 000 (Spínola, 2015).....	52
Figura 7: Amostra de Granito Cinzento Claro de Pedras Salgadas.....	52
Figura 8: Extracto da Carta Geológica de Portugal, Folha 33-C Campo Maior, Escala 1:50 000 (Spínola, 2015).....	53
Figura 9: Amostra de Cinzento Favaco.....	53
Figura 10: Extracto da Carta Geológica de Portugal, Folha 1, Escala de 1:200 000. (Pereira et al., 1992).....	54
Figura 11: Amostra de Rosa Monção.	55
Figura 12: Extracto da Carta Geológica de Portugal, Folha 7, Escala de 1:200 000. (Spínola, 2015).	55
Figura 13: Amostra de Cinzento Monchique.....	56
Figura 14: Extracto da Carta Geológica de Portugal, Folha 26-B, Alcobaça, Escala 1:50 000. (Spínola, 2015).....	57
Figura 15: Amostra de Moleanos Macio.	57
Figura 16: Extracto da Carta Geológica de Portugal, Folha 9-D, (Campo – Valongo), com local de extracção, Escala 1:50000. (Spínola, 2015).	58
Figura 17: Amostra de Ardósia de Valongo.....	58
Figura 18: Extracto da Carta Geológica de Portugal, Folha 2, Escala 1:200 000 (Spínola, 2015).	59
Figura 19: Amostra de Verde Donai.	60
Figura 20: Extracto da Carta Geológica do Anticlinal de Estremoz, Escala 1:25 000 (Carvalho, 2008).	61
Figura 21: Amostra de Branco Rosado.	61
Figura 22: Máquina de fluorescência de raios-x e <i>software</i> (LGMC) (direita) e provetes utilizados para o ensaio de fluorescência raios-x (LGMC) (esquerda).	64
Figura 23: Esquema de funcionamento do equipamento de Fluorescência de raios-x. (Adaptado de http://www.thermoscientific.com/content/dam/tfs/ATG/CAD/CAD%20Documents/Catalogs%20&%20Brochures/Elemental%20Analysis/XRF/D00831~.pdf).	65
Figura 24: Picnómetro (LGMC).....	66
Figura 25: Balança hidrostática para pesagens de provetes submersos (LGMC).	67

Figura 26: Exemplo de equipamento utilizado na determinação da resistência à compressão (LGMC).....	69
Figura 27: Equipamento para ensaio carga pontual com provete pronto a ensaiar (LGMC).	70
Figura 28: Equipamento necessário para realizar o ensaio capon (LGMC).....	72
Figura 29: Provetes após submetidos ao ensaio de carga pontual.....	85
Figura 30: Provetes capon (após ensaio).	86
Figura 31: Projecções nos planos factoriais 1 e 2, das variáveis (à esquerda) e das amostras (à direita).....	94
Figura 32: Projecções nos planos factoriais 1 e 3, das variáveis (à esquerda) e das amostras (à direita).....	95
Figura 33: Projecção conjunta das variáveis e das amostras nos eixos 1 e 2 (esquerda) e eixos 1 e 3 (direita).....	95
Figura 34: Gráfico regressão linear WI <i>versus</i> porosidade aberta.	99
Figura 35: Gráfico regressão linear WI <i>versus</i> massa volúmica aparente.	100
Figura 36: Gráfico regressão linear WI <i>versus</i> porosidade resistência à carga pontual.	101
Figura 37: Gráfico regressão linear WI <i>versus</i> resistência à compressão.	102
Figura 38: Gráfico regressão linear WI <i>versus</i> capon.	103

Índice de Tabelas

Tabela 1: Variação dos Índices de moabilidade de Bond em amostras de cola para fracções de peso específico (adaptado de Deniz et al., 2013).	33
Tabela 2: Resultados da análise química (valores em %) (adaptado de Spínola, 2015).	75
Tabela 3: Resultados da análise da composição mineralógica das Rochas (valores em %), (adaptado de Spínola, 2015).	76
Tabela 4: Valores médios de resistência à compressão (adaptado de http://rop.lneg.pt/rop/index.php , 15/04/2014).	77
Tabela 5: Valores de massa volúmica e porosidade aberta das rochas estudadas, (adaptado de Spínola, 2015).	78
Tabela 6: Resultados do ensaio de determinação da resistência à carga pontual.	79
Tabela 7: Resultados obtidos com o ensaio capon.	86
Tabela 8: Valores de WI obtidos através de pesquisa bibliográfica.	89
Tabela 9: Estatísticos básicos relativos às propriedades das amostras em avaliação neste estudo.	90
Tabela 10: Matriz de correlação Pearson para as variáveis em estudo.	92
Tabela 11: Análise em Componentes Principais	93
Tabela 12: Coordenadas das variáveis.	93
Tabela 13: Tabela resumo, valores de <i>Work Index</i> e resultados dos ensaios das propriedades físicas.	98
Tabela 14: Resumo das regressões lineares simples, PA versus MV e MV versus RC.	104
Tabela 15: Resultado da regressão linear múltipla, WI versus PA, MV, RP, e CP.	105
Tabela 16: Resultado da regressão linear múltipla, WI versus MV, RP, RC, e CP.	106
Tabela 17: Resultado regressão linear múltipla, WI versus PA, MV, RC, e CP.	106
Tabela 18: Resultado da regressão linear múltipla, WI versus PA, MV, RP, e RC.	107
Tabela 19: Resultado da regressão linear múltipla, WI versus PA, RP, RC, e CP.	107

Índice de equações

Equação 1: Equação de Bond para determinar energia específica (Weiss, 1985).....	28
Equação 2: Relação entre a moabilidade e as propriedades físico-mecânicas do material (Deniz & Umucu, 2013).....	29
Equação 3: Determinação do <i>Work Index</i> (Ozkahraman, 2005).....	30
Equação 4: Relação linear entre a moabilidade e friabilidade (Ozkahraman, 2005).....	30
Equação 5: Relação linear entre a moabilidade e friabilidade (Ozkahraman, 2005).....	30
Equação 6: Determinação do <i>Wi</i> (adaptado de Swain & Rao, 2009).....	31
Equação 7: Determinação da friabilidade (adaptado de Swain&Rao, 2009).....	31
Equação 8: Determinação do <i>Wi</i> através da friabilidade (Swain & Rao, 2009)	32
Equação 9: Relação entre índice de Hardgrove e dureza do martelo de Schmidt (adaptado de Tiryaki, 2005).....	32
Equação 10: Relação entre moabilidade e peso específico para o carvão Kale (Deniz et al., 2013).	33
Equação 11: Relação entre moabilidade e peso específico para o carvão Soma-I (Deniz et al., 2013).	33
Equação 12: Relação entre moabilidade e peso específico para o carvão Soma-II (Deniz et al., 2013).	33
Equação 13: Determinação do <i>Wi</i> (Jankovic et al., 2010).....	34
Equação 14: Equação de Bond para determinar energia específica (Jankovic et al., 2010).....	34
Equação 15: Equação de Rittinger para determinação de energia específica (Jankovic et al., 2010).	34
Equação 16: Determinação de G_{σ} , (Deniz & Ozdag, 2003).....	35
Equação 17: Determinação de E_d (Deniz & Ozdag, 2003).	35
Equação 18: Determinação de K_d (Deniz & Ozdag, 2003).	35
Equação 19: Determinação do <i>Wi</i> (Deniz & Ozdag, 2003).	36
Equação 20: Relação entre <i>Wi</i> e K_d para rochas sedimentares (adaptado de Deniz & Ozdag, 2003).	36
Equação 21: Relação entre <i>Wi</i> e K_d para rochas volcânicas (adaptado de Deniz & Ozdag, 2003).36	
Equação 22: “Energia de tensão de um corpo por unidade de volume” (adaptado de Refahi et al., 2007).	37
Equação 23: Determinação do <i>WiB</i> utilizando o <i>Universal Bond-Mill</i> (Mucsi et al., 2011).....	38
Equação 24: Determinação do <i>HGI</i> utilizado o <i>Universal Hardgrove-Mill</i> (Mucsi et al., 2011).	38
Equação 25: Determinação do <i>WiB</i> através do índice de Hardgrove proposto in Csöke et al. (2003).	38

Equação 26: Determinação do <i>WiB</i> através do índice de Hardgrove segundo Bond, (<i>in</i> Mucsi et al., 2011).....	38
Equação 27: Determinação do <i>WiB</i> corrigido para a moagem de bauxites em temperaturas variáveis (adaptado de Mucsi et al., 2011).	39
Equação 28: Relação entre moabilidade e propriedades químicas do material (Deniz & Umucu, 2013).....	40
Equação 29: Correlação entre <i>BWI</i> e <i>VH</i> para minerais silicatos e óxidos com um <i>VH</i> menor que 1200 (Gent et al., 2012).....	41
Equação 30: Correlação entre <i>BWI</i> e <i>VH</i> para minerais silicatos e óxidos com um <i>VH</i> menor que 1200 (Gent et al., 2012).....	41
Equação 31: Determinação do <i>BWI</i> a partir do valor de <i>VH</i> em minerais carbonatos, sulfatos e iodetos (Gent et al., 2012).....	42
Equação 32: Determinação da dureza dos espécimes rochosos (Kulu et al., 2009).	42
Equação 33: Determinação do <i>Work Index</i> de Bond (Ipek et al., 2005).	42
Equação 34: Determinação do <i>Wi</i> utilizando um moínho que permite a determinação da energia específica utilizada (Stamboliadis et al., 2011).	44
Equação 35: Cálculo do <i>Work Index</i> de Bond (Deniz et al., 2003).	45
Equação 36: Determinação da massa volúmica aparente, EN 1936 (2006).	67
Equação 37: Determinação da porosidade aberta, EN 1936 (2006).	68
Equação 38: Determinação da resistência à compressão, EN-1926-06.....	68
Equação 39: Determinação da distância equivalente, ASTM D 5731-02.	70
Equação 40: Determinação do índice de resistência à carga pontual não corrigido, ASTM D 5731-02.....	71
Equação 41: Determinação do factor de correcção de dimensão, ASTM D 5731-02.	71
Equação 42: Determinação do índice de resistência à carga pontual corrigido, ASTM D 5731-02. 71	
Equação 43: Determinação da corda da calote corrigida.	72
Equação 44: Equação matricial da análise de componentes principais.....	90
Equação 45: Modelo de regressão linear simples, (Martins, 2002).....	96
Equação 46: Equação de regressão linear simples, (adaptado de Martins, 2002).	97
Equação 47: Modelo de regressão linear múltipla, (Martins, 2002).....	97
Equação 48: Equação de regressão linear múltipla, (adaptado de Martins, 2002).	97
Equação 49: Equação de regressão de <i>WI versus</i> porosidade aberta.....	99
Equação 50: Equação de regressão de <i>WI versus</i> porosidade aberta excluindo Moleanos Macio. 99	
Equação 51: Equação de regressão de <i>WI versus</i> massa volúmica aparente.	100

Equação 52: Equação de regressão de WI <i>versus</i> massa volúmica aparente excluindo Cinzento Monchique.	100
Equação 53: Equação de regressão de WI <i>versus</i> resistência à carga pontual.	101
Equação 54: Equação de regressão de WI <i>versus</i> resistência à carga pontual excluindo Verde Donai.	101
Equação 55: Equação de regressão de WI <i>versus</i> resistência à compressão.	102
Equação 56: Equação de regressão de WI <i>versus</i> resistência à compressão excluindo Cinzento Monchique.	102
Equação 57: Equação de regressão de WI <i>versus</i> capon.	103
Equação 58: Equação de regressão de WI <i>versus</i> capon excluindo Ardósia de Valongo.	103
Equação 59: Equação de regressão do modelo de regressão múltipla linear valido, WI <i>versus</i> PA, RP, RC, e CP.	108

Lista de símbolos e abreviaturas

ACP: Análise de componentes principais.

ASTM: American Society for Testing and Materials.

C: Comprimento.

CP: Capon.

D: Diâmetro.

DWT: *Drop Weight Test*.

E_d : Módulo de elasticidade.

G_d : Módulo de cisalhamento.

ISRM: International Society for Rock Mechanics.

$I_{s(50)}$: Índice de resistência á carga pontual corrigido.

K_d : Módulo volumétrico.

LGMC: Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção.

MV: Massa volúmica.

n : Expoente adimensional utilizado no cálculo do *Work Index*.

PA: Porosidade aberta.

RC: Resistência à compressão.

RP: Resistência à carga pontual.

R^2 : Coeficiente de determinação.

St: *Short ton*, tonelada curta.

VH: Dureza de Vickers.

W_i : *WI*: *Work Index*.

W_{iB} : *BWI*: *BWI*: *Work Index* de Bond.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

1.2 Objectivos

1.3 Objectivos

1.4 Estrutura

A presente tese enquadra-se na Unidade Curricular Dissertação/Projecto/Estágio (42 ECTS), do 2º ano, do Curso de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente do Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), do Instituto Politécnico do Porto (IPP). A elaboração e defesa pública da presente tese, em formato “Dissertação”, são imperativos para a conclusão do 2º ciclo e a consequente obtenção do Grau de Mestre.

O objectivo desta tese é analisar a litologia e as propriedades físico-químicas de diferentes tipos de rocha e tentar estabelecer relações entre estas e o *Work Index*, no intuito de obter um modelo matemático que permita estimar o *Work Index*. No desenvolvimento deste estudo a utilização do *Work Index* é de particular utilidade uma vez que este representa a energia necessária, por tonelada de material fragmentado, compactando todas as variáveis relacionadas com a energia de fragmentação numa só variável, o que simplifica a análise de tendências dos dados o que por sua vez torna a modelação menos morosa.

Foram ensaiados provetes de dez tipos de diferentes rochas, tendo sido utilizado o método estatístico de análise de componentes principais, assim como a regressão simples e múltipla, para analisar os dados.

1.1. Enquadramento

As operações de redução de calibre têm um custo energético bastante elevado, custo este que aumenta exponencialmente à medida que o calibre final pretendido diminui. Em particular, a passagem de operações de fragmentação para operações de moagem acarreta consigo um salto bastante significativo na quantidade de energia necessária para as operações de redução de calibre.

Tromans (2008) refere que estudos realizados em 2005, pelo departamento de energia dos Estados Unidos da América, indicam que as operações de redução de calibre utilizavam quase 29,3% de toda a energia despendida por empreendimentos mineiros no país. Sendo assim, é fácil perceber a importância de um dimensionamento eficaz das instalações durante a fase de projecto, uma vez que qualquer erro de cálculo nessa fase poderá ter sérias consequências nos custos operativos de uma exploração, podendo mesmo ameaçar a viabilidade desta.

O *Work Index* é um parâmetro utilizado de uma forma geral na indústria como ferramenta de cálculo dos custos energéticos de moagem, no entanto, a sua determinação é morosa e requer equipamento especializado.

1.2. Objectivos

A presente dissertação tem como objectivo modelar um método alternativo de determinação do *Work Index* recorrendo a métodos estatísticos para estabelecer uma relação entre o *Work Index* e as propriedades físicas e químicas das rochas, assim como as características litológicas destas.

1.3. Estrutura

Em termos de organização, este trabalho é constituído por 7 capítulos. Assim:

No capítulo 1 faz-se a introdução geral ao tema da tese, dando um contexto geral à relevância do tema. É detalhado o enquadramento explicando a importância dos custos energéticos em operações mineiras e a relevância do *Work Index* devido à sua representatividade condensada de consumos energéticos. São delineados os objectivos da tese e, a fechar o capítulo, está um resumo da estrutura e material abordado em cada capítulo.

No capítulo 2, com base na pesquisa bibliográfica realizada, apresentam-se a bibliografia onde são encontradas várias variáveis com possível influência no *Work Index*, tendo sido identificados três grandes grupos de variáveis, nomeadamente as propriedades físicas, químicas, e morfológicas.

No capítulo 3 são apresentados os materiais objecto de estudo e a respectiva caracterização geológica. É também apresentada a descrição macroscópica destes.

O capítulo 4 apresenta as metodologias utilizadas na elaboração dos ensaios de identificação a que os materiais objecto de estudo foram submetidos sendo também identificadas as propriedades dos materiais que influenciam o *Work Index*.

No capítulo 5 são apresentados e analisados os resultados dos ensaios de identificação a que foram submetidas as amostras.

No capítulo 6 são expostos os métodos estatísticos utilizados para tratar os dados recolhidos, assim como os métodos utilizados para estabelecer uma relação entre o *Work Index* e as propriedades da rocha analisadas.

Por fim, o capítulo 7 apresenta as conclusões obtidas no desenvolvimento desta tese, inclusive uma comparação das conclusões obtidas com o trabalho realizado às observadas na bibliografia. São também apresentadas as perspectivas futuras para o desenvolvimento de trabalhos relacionados com esta temática.

Capítulo 2

Estado da arte

- 2.1 Propriedades Físicas
- 2.2 Propriedades Químicas
- 2.3 Propriedades Morfológicas

Como referido anteriormente as operações de moagem incorrem um custo energético muito elevado, naturalmente nestas condições o devido dimensionamento de uma instalação e a previsão dos custos energéticos de moagem são extremamente importantes para assegurar a viabilidade de qualquer exploração que recorra a este processo.

Com esse intuito foram desenvolvidas várias teorias ao longo da história da moagem de materiais para tentar prever a energia específica, já que está é uma variável utilizada para exprimir a energia (kWh) por tonelada de material fragmentado (t).

Bond desenvolveu a chamada terceira teoria, através de um estudo empírico da energia específica (Weiss, 1985). A Equação 1 apresenta a fórmula desenvolvida por Bond para o cálculo da energia específica.

$$W = \frac{10W_i}{\sqrt{P}} - \frac{10W_i}{\sqrt{F}} \quad [1]$$

Onde:

- W : Energia específica, kWh/st.
- W_i : *Work Index*, kWh/st.
- P_{80} : Calibre correspondente a 80% de passados no produto, μm .
- F_{80} : Calibre correspondente a 80% de passados na alimentação, μm .

Equação 1: Equação de Bond para determinar energia específica (Weiss, 1985).

A Equação 1 recorre à variável *Work Index*, sendo que esta variável representa a energia necessária para moer um material específico desde um calibre infinito, sob o ponto de vista teórico, até 80% passados em 100 microns.

O ensaio de Bond para a determinação do *Work Index* em laboratório consiste em efectuar um ciclo de moagens em que 700 ml de amostra, fragmentada até ter tamanho menor que 3,327 mm, são colocados num moinho cilíndrico, com diâmetro/largura de 305mm/305mm e 20,125 kg de carga constituída por bolas de diferentes dimensões, sendo a amostra moída durante um minuto, a 100 rot./min. Uma vez terminado o primeiro ciclo de moagem a amostra é classificada e o material passado pesado, o material passado é repostado na alimentação com amostra não moída. É calculado o número de rotações para as moagens subsequentes e este ciclo é repetido até a quantidade de material passado estabilizar. Existe também um ensaio similar que utiliza moinhos de varas.

2.1. Propriedades físicas

A pesquisa realizada no âmbito desta tese revelou, na sua grande maioria, artigos que exploram a relação entre várias propriedades físicas dos materiais e o respectivo valor de *Work Index*, designadamente a resistência à compressão, o peso específico, a resistência ao impacto, a resistência à carga pontual, o módulo volumétrico e a friabilidade.

O módulo volumétrico é um dos parâmetros de elasticidade das rochas, este e os restantes parâmetros de elasticidade são determinados a partir do ensaio de determinação da propagação do som onde são colocados dois transdutores num provete e determinado o tempo que um impulso demora a viajar entre eles, a velocidade do impulso permite calcular os parâmetros de elasticidade das rochas.

A friabilidade, também relacionada com o *Work Index*, é determinada através do ensaio de fragilidade onde amostras de rocha fragmentada com calibre de aproximadamente 80mm são quebradas por um peso em queda livre.

O ensaio de Hardgrove é um ensaio de moabilidade normalmente aplicado em carvões.

Deniz & Umucu (2013) estudaram a relação entre as propriedades do carvão e o respectivo índice de moabilidade de Bond. Para tal recolheram 10 amostras de lenhite sob as quais realizaram ensaios de Bond, o ensaio de resistência ao impacto, o ensaio para determinação do índice de friabilidade, ensaio de carga pontual, e a análise química.

Numa primeira instância, os autores tentaram estabelecer correlações através de uma análise de regressão simples, no entanto, não encontraram correlações fortes, pelo que recorreram à regressão múltipla.

Através da regressão múltipla conseguiram estabelecer uma relação entre a moabilidade e os índices de friabilidade, resistência ao impacto e resistência à carga pontual. A Equação 2 exprime a referida relação.

$$G_{bg} = 1,671 + 0,01(F_d) - 0,007(I_s) - 0,012(ISI)r^2 \quad [2]$$

Onde:

- G_{bg} : Índice de moabilidade de Bond, g/rot.
- F_d : Índice de friabilidade.
- I_s : Índice de carga pontual.
- ISI : Índice resistência ao impacto.
- r^2 : Coeficiente de determinação, 0,96.

Equação 2: Relação entre a moabilidade e as propriedades físico-mecânicas do material (Deniz & Umucu, 2013).

Já nas propriedades físico-mecânicas, as que apresentam maior coeficiente de correlação, na relação com a moabilidade, são o índice de carga pontual e o índice resistência ao impacto (Deniz & Umucu, 2013).

Uma vez que o *Work Index* está directamente dependente da moabilidade, aqueles autores demonstram a possível influência destas variáveis no *Work Index*.

Ozkahraman (2005) tentou estabelecer uma relação entre a friabilidade e outras propriedades físicas de um calcário utilizado na produção de cimento e os seus valores de moabilidade e *Work Index*. Para tal, realizou o ensaio de Bond e o ensaio de fragilidade em amostras de calcário, barite, bauxite e mármore, tendo sido estabelecido um elevado nível de correlação entre o *Work Index*, a moabilidade e friabilidade. A Equação 3 foi utilizada para determinar o *Work Index* das amostras analisadas.

$$W_i = 44,5/[P^{0,23} \cdot G^{0,82} \cdot (10/\sqrt{P_{80}} - 10/\sqrt{F_{80}})] \quad [3]$$

Onde:

- W_i : *Work Index*, kWh/t.
- P : Dimensão da abertura do peneiro de corte do produto, μ m.
- G : Passados acumulados no peneiro P por rotação, g/rot.
- P_{80} : Calibre correspondente a 80% de passados no produto, μ m.
- F_{80} : Calibre correspondente a 80% de passados na alimentação, μ m.

Equação 3: Determinação do *Work Index* (Ozkahraman, 2005).

Aquele autor estabeleceu, também, através da técnica de regressão linear a Equação 4 que relaciona a friabilidade e a moabilidade.

$$G = 0,171 + 0,021(S_{20}) \quad [4]$$

Onde:

- G : Índice de moabilidade, g/rot.
- S_{20} : Valor de friabilidade, adimensional.

Equação 4: Relação linear entre a moabilidade e friabilidade (Ozkahraman, 2005).

A Equação 5, que relaciona o W_i e a friabilidade foi estabelecida através da técnica de regressão.

$$W_i = 61,839 - 10,158 \ln(S_{20}) \quad [5]$$

Onde:

- W_i : *Work Index*, kWh/t.
- S_{20} : Valor de friabilidade, adimensional.

Equação 5: Relação linear entre a moabilidade e friabilidade (Ozkahraman, 2005).

Neste caso, o autor considerou possível a adoção do ensaio fragilidade para o estudo das características de moagem do material, em substituição do ensaio de Bond que é mais moroso.

Para além da relação com a friabilidade o autor refere que a amostra com maior resistência à compressão e resistência à carga pontual também apresentava o maior *Work Index*.

Alguns autores (Swain & Rao, 2009) realizaram ensaios de moabilidade de Bond, ensaios de Hardgrove e ensaios fragilidade para analisar a relação entre os valores de W_i e os valores do índice de Hardgrove, e a relação entre W_i e a friabilidade, como possíveis métodos alternativos de determinação do *Work Index*.

Realizaram os ensaios em amostras de rocha, nomeadamente rocha gibsítica (rica em feldspato), rocha gibsítica (rica em goethite), rocha gibsítica (com limonite), rocha caulinizada, e gnaiss (com manganês).

Para a determinação do *Work Index* utilizaram a Equação 6.

$$W_i = 44,5 / \left[(P_1)^{0,23} \times (Gbp)^{0,82} \left[10 / (P_{80})^{1/2} - 10 / (F_{80})^{1/2} \right] \right] \quad [6]$$

Onde:

- W_i : *Work Index*, kWh/t.
- P_1 : Dimensão da abertura do peneiro de corte do produto, μm .
- Gbp : Passados acumulados no peneiro P_1 por rotação, g/rot.
- P_{80} : Calibre correspondente a 80% de passados no produto, μm .
- F_{80} : Calibre correspondente a 80% de passados na alimentação, μm .

Equação 6: Determinação do W_i (adaptado de Swain & Rao, 2009).

Para determinar a friabilidade utilizaram a Equação 7.

$$F = (\text{Peso passados } 19\text{mm}(\text{gms}) / \text{Peso da amostra}) \times 100 \quad [7]$$

Onde:

- F : Friabilidade, adimensional.

Equação 7: Determinação da friabilidade (adaptado de Swain & Rao, 2009).

Os autores notaram que embora tenham conseguido estabelecer uma correlação entre o W_i e o ensaio de fragilidade, este tinha sido executado numa máquina de teste que poderia causar um desvio dos valores de *Work Index*. Ainda assim conseguiram estabelecer a Equação 8, uma equação de regressão que permite determinar W_i a partir do valor de friabilidade obtido através do ensaio de fragilidade.

$$W_i = -18,193 \ln(S_i) + 66,747 \quad [8]$$

Onde:

- W_i : *Work Index*, kWh/t.
- S_i : Valor de friabilidade, adimensional.

Equação 8: Determinação do W_i através da friabilidade (Swain & Rao, 2009)

Tiryaki (2005) pretendeu estabelecer um método fiável e mais expedito para a previsão da moabilidade dos carvões explorados numa mina, com a utilização dos ensaios de compressão uniaxial, o ensaio Brasileiro de resistência à tensão, o esclerómetro de Shore e Martelo de Schmidt. Os ensaios foram realizados de acordo com os procedimentos sugeridos pela ISRM, tal como sugeriu Brown (1981). Foram também realizados ensaios de cone de penetração, índice de Hardgrove e o ensaio de carga pontual, tendo todos estes ensaios sido realizados em carvão de quatro locais na mesma mina. O autor estabeleceu uma relação entre o índice de Hardgrove e a dureza do material determinada através do Martelo de Schmidt expressa segundo a Equação 9, pela aplicação da técnica de regressão linear.

$$y = -2,2514x + 155,98 \quad [9]$$

Onde:

- y : Índice de Hardgrove, °H.
- x : Dureza do martelo de Schmidt, adimensional.

Equação 9: Relação entre índice de Hardgrove e dureza do martelo de Schmidt (adaptado de Tiryaki, 2005).

A Equação 9 apresenta elevado coeficiente de determinação $R^2=0,9815$, logo para o caso desta mina consideram possível prever a moabilidade dos carvões a partir do teste de Martelo de Schmidt.

Deniz et al. (2013) desenvolveram um estudo no sentido de tentar estabelecer um método para estimar a moabilidade de Bond de carvões a partir de ensaios de flutuação. Para tal, realizaram os referidos ensaios em três amostras de carvão diferentes, designadas Kale, Soma-I, e Soma-II, utilizando o ensaio de flutuação para dividir cada amostra em sete intervalos de peso específico diferentes, e realizaram o ensaio de Bond em provetes de cada um dos intervalos de peso específico. Verificaram que os valores da moabilidade de Bond aumentavam com o peso específico, conseguindo estabelecer uma relação entre a moabilidade de Bond e a peso específico em todos os casos com coeficientes de correlação altos. No entanto, os autores afirmam que é possível inferir, com base na Tabela 1, que omitindo o intervalo de peso específico mais baixo, os carvões Soma-I e Kale têm moabilidades comparáveis em todos intervalos de peso específico. Afirmam também que “... no caso do carvão Soma-II podem ser constatadas diferenças

substanciais nos valores de moabilidade de Bond obtidos para o peso específico, cada uma da qual constitui mais da massa total de carvão” utilizando os dados da Tabela 1.

Tabela 1: Variação dos Índices de moabilidade de Bond em amostras de cola para frações de peso específico (adaptado de Deniz et al., 2013).

Variação dos índices de moabilidade de Bond em amostras de cola para frações de peso específico			
Peso específico (g/cm ³)	Kale Gbg (g/rev.)	Soma-I Gbg (g/rev.)	Soma-II Gbg (g/rev.)
<1,25	0,732	0,660	0,596
1,25-1,35	0,780	0,689	0,690
1,35-1,45	0,851	0,854	1,112
1,45-1,55	1,121	1,099	1,334
1,55-1,65	1,340	1,322	1,688
1,65-1,75	1,559	1,739	1,971
>1,75	2,351	2,460	2,555

Os autores concluíram que é possível prever com rigor, utilizando uma relação empírica, a moabilidade de Bond de amostras de carvão com base em ensaios rotineiros de flutuação. As Equações 10, 11 e 12 expressam as relações estabelecidas entre peso específico e moabilidade de Bond para o carvão Kale, para o carvão Soma-I e para o carvão Soma-II, respectivamente.

$$G_{bg} = 5,179(y)^2 - 13,068y + 8,99 \quad [10]$$

Equação 10: Relação entre moabilidade e peso específico para o carvão Kale (Deniz et al., 2013).

$$G_{bg} = 5,583(y)^2 - 13,904y + 9,33 \quad [11]$$

Equação 11: Relação entre moabilidade e peso específico para o carvão Soma-I (Deniz et al., 2013).

$$G_{bg} = 2,429(y)^2 - 4,064y + 1,96 \quad [12]$$

Nas quais:

- G_{bg} : Índice de moabilidade de Bond, g/rot.
- y : Peso específico, g/cm³.

Equação 12: Relação entre moabilidade e peso específico para o carvão Soma-II (Deniz et al., 2013).

Todas estas correlações têm um bom coeficiente de determinação, ou seja, 0,974, 0,991, e 0,991, respectivamente

(Jankovic et al., 2010) realizaram ensaios extensivos em amostras de magnetite separadas magneticamente, os quais incluíram os ensaios de Bond e moagem.

Nestes casos, a Equação 13 foi utilizada para determinar o *Work Index*.

$$W_i = \frac{49}{P^{0,23} G_{bP}^{0,82} \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad [13]$$

Onde:

- W_i : *Work Index*, kWh/t.
- P : Dimensão da abertura do peneiro de corte do produto, μm .
- G_{bP} : Passados acumulados no peneiro P por rotação, g/rot.
- P_{80} : Calibre correspondente a 80% de passados no produto, μm .
- F_{80} : Calibre correspondente a 80% de passados na alimentação, μm .

Equação 13: Determinação do W_i (Jankovic et al., 2010).

Aqueles autores constataram que a energia específica prevista por Bond era pouco adequada aos resultados, e o expoente proposto por Rittinger (1867) dava resultados mais aproximados aos valores obtidos experimentalmente, especialmente no caso da fracção magnética. A Equação 14 foi proposta por Bond para o cálculo a energia específica.

$$W = W_i \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad [14]$$

Onde:

- W : Energia específica, kWh/t.
- W_i : *Work Index*, kWh/t.
- P_{80} : Calibre correspondente a 80% de passados no produto, μm .
- F_{80} : Calibre correspondente a 80% de passados na alimentação, μm .

Equação 14: Equação de Bond para determinar energia específica (Jankovic et al., 2010).

Já Rittinger (1867) propôs, para o mesmo efeito, a Equação 15.

$$E = K_1 \left(\frac{1}{x_p} - \frac{1}{x_f} \right) \quad [15]$$

Onde:

- E : Energia específica.
- K_1 : Constante.
- x_p : Índice de tamanho do produto.
- x_f : Índice de tamanho da alimentação.

Equação 15: Equação de Rittinger para determinação de energia específica (Jankovic et al., 2010).

Segundo aqueles autores, e para as amostras de minério magnetite, o *Work Index* de Bond parece ser controlado pelas propriedades da ganga (material não magnético), ou seja, as amostras com maior conteúdo magnético aparentavam ter ganga mais mole.

Outros autores, Deniz & Ozdag (2003), determinaram parâmetros de elasticidade da rocha E_d (módulo de elasticidade), G_d (módulo de cisalhamento) e K_d (módulo volumétrico) utilizando métodos dinâmicos, neste caso a determinação da propagação do som, em 13 amostras de diferentes tipos de rocha. O módulo de cisalhamento foi determinado utilizando a Equação 16:

$$G_d = \rho V_s^2 \quad [16]$$

Onde:

- G_d : Módulo de cisalhamento, Gpa.
- ρ : Massa específica.
- V_s : Velocidade de propagação das ondas transversais, m/s.

Equação 16: Determinação de G_d , (Deniz & Ozdag, 2003).

O módulo de elasticidade foi determinado utilizando a Equação 17:

$$E_d = \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} G_d \quad [17]$$

Onde:

- E_d : Módulo de elasticidade, GPa.
- V_p : Velocidade de propagação das ondas longitudinais, m/s.
- V_s : Velocidade de propagação das ondas transversais, m/s.
- G_d : Módulo de cisalhamento, Gpa.

Equação 17: Determinação de E_d (Deniz & Ozdag, 2003).

O módulo volumétrico foi determinado utilizando a Equação 18.

$$K_d = \rho(V_p^2 - (4/3)V_s^2) \quad [18]$$

Onde:

- K_d : Módulo volumétrico, GPa.
- ρ : Massa específica.
- V_p : Velocidade de propagação das ondas longitudinais, m/s.
- V_s : Velocidade de propagação das ondas transversais, m/s.

Equação 18: Determinação de K_d (Deniz & Ozdag, 2003).

Uma vez terminados os ensaios para a determinação da velocidade de propagação de ondas os autores fragmentaram os provetes até ao calibre apropriado e estes foram utilizados num ensaio de Bond normal para determinar o W_i (Equação 19).

$$W_i = 1,1 \times \frac{44,5}{P_i^{0,23} G_{bg}^{0,82} [(10/\sqrt{P_{80}}) - (10/\sqrt{F_{80}})]} \quad [19]$$

Onde:

- W_i : *Work Index*, kWh/t.
- P_i : Dimensão da abertura do peneiro de corte do produto, μm .
- G_{bg} : Passados acumulados no peneiro P_i por rotação, g/rot.
- P_{80} : Calibre correspondente a 80% de passados no produto, μm .
- F_{80} : Calibre correspondente a 80% de passados na alimentação, μm .

Equação 19: Determinação do W_i (Deniz & Ozdag, 2003).

Os autores não conseguiram estabelecer uma correlação que se aplicasse a todas as rochas, ao separar as rochas de acordo com a respectiva génese foram capazes de estabelecer correlações, sendo que a melhor foi a estabelecida com o K_d , esta apresentou um erro médio de 11,69% e 9,63% com a moabilidade e o W_i , respectivamente. A Equação 20 estabelece a relação entre W_i e K_d para as rochas sedimentares.

$$W_{i(\text{sedimentar})} = 3,67 + 0,11 \times K_d \quad [20]$$

Onde:

- $W_{i(\text{sedimentar})}$: *Work Index* para rocha sedimentar, kWh/t.
- K_d : Módulo volumétrico, GPa.

Equação 20: Relação entre W_i e K_d para rochas sedimentares (adaptado de Deniz & Ozdag, 2003).

A Equação 21 estabelece a relação entre W_i e K_d para as rochas volcânicas:

$$W_{i(\text{volcanica})} = 5,61 + 0,23 \times K_d \quad [21]$$

Onde:

- $W_{i(\text{volcanica})}$: *Work Index* para rocha vulcânica, kWh/t.
- K_d : Módulo volumétrico, GPa.

Equação 21: Relação entre W_i e K_d para rochas volcânicas (adaptado de Deniz & Ozdag, 2003).

Refahi et al. (2007) usaram o código Informático FLAC3D para simular a fragmentação de provetes cúbicos e esféricos (modelados como um meio elasto-plástico considerando o critério de rotura de Mohr-Coulomb) num fragmentador de maxilas, de forma a estudar o comportamento da rocha.

Para estimar a energia de deformação foi utilizada a Equação 22.

$$U_o = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad i = 1,2,3 \quad j = 1,2,3 \quad [22]$$

Onde:

- U_o : Energia de deformação de um corpo por volume.
- $\sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$: Seis componentes de tensão e deformação.

Equação 22: “Energia de tensão de um corpo por unidade de volume” (adaptado de Refahi et al., 2007).

Assim, constataram que os provetes cúbicos necessitavam de mais energia para fragmentar que os esféricos, e que o cisalhamento constitui um elevado custo energético na fragmentação, pelo que as propriedades que definem a resistência ao cisalhamento da rocha, o ângulo de atrito e coesão, terão um impacto na energia necessária para a fragmentar.

2.2. Propriedades Químicas

Embora em menor quantidade a pesquisa realizada no âmbito desta tese revelou vários artigos que exploram a relação entre várias propriedades químicas dos materiais e o *Work Index*, de particular interesse os artigos que exploram a relação do *Work Index* com as propriedades químicas do carvão visto que estas não estão dependentes do meio de moagem.

Mais recentemente, Mucsi et al. (2011) exploraram a influência da presença de um meio alcalino durante a moagem, como acontece muitas vezes na moagem de bauxites, descrevendo dois novos equipamentos para a determinação do índice de Hardgrove e índice de *Bond* que permitem a determinação destes de forma mais precisa em meios diferentes, no caso em estudo, para aplicação específica ao processo Bayer.

O novo moinho de Bond apresentado é o *Universal Bond-mill*, o qual permite, através de um revestimento aquecido controlar a temperatura no interior do tambor do moinho de forma controlada, enquanto o moinho de Hardgrove é o *Universal Hardgrove-mill*, cuja temperatura também é controlada por um sistema de revestimento aquecido. Utilizaram a Equação 23 para calcular o *Work Index* utilizando o *Universal Bond-Mill*.

$$W_{iB} = \frac{4,9}{x_{max}^{0,23} G^{0,82} \left(\frac{1}{\sqrt{x'_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{x'_{80}}} \right)} \quad [23]$$

Onde:

- W_{iB} : *Work Index*, kWh/t.
- x_{max} : Dimensão da abertura do peneiro de corte do produto, μm .
- G : Passados acumulados no peneiro x_{max} por rotação, g/rot.
- x_{80} : Calibre correspondente a 80% de passados no produto, μm .

- X_{80} : Calibre correspondente a 80% de passados na alimentação, μm .

Equação 23: Determinação do W_{iB} utilizando o *Universal Bond-Mill* (Mucsi et al., 2011).

Numa primeira instância realizaram ensaios de Hardgrove e Bond via seca em todas as amostras à temperatura ambiente.

Posteriormente realizaram ensaios no novo moinho de Hardgrove em cinco amostras, 3 de bauxite cársica e duas lateríticas, tendo sido realizados a várias temperaturas sem aditivos. Verificaram, desse modo, um aumento da moabilidade relativa com o aumento da temperatura no caso de algumas amostras. O cálculo do índice de Hardgrove, utilizando o moinho *Universal Hardgrove*, foi obtido com auxílio da Equação 24.

$$H(HGI) = 13 + 6,93m_H \quad [24]$$

Onde:

- $H(HGI)$: Índice de Hardgrove, °H.
- m_H : Massa das partículas com calibre inferior a $74 \mu\text{m}$, g.

Equação 24: Determinação do HGI utilizado o *Universal Hardgrove-Mill* (Mucsi et al., 2011).

Para calcular o *Work Index de Bond* conhecendo o índice de Hardgrove utilizaram as correlações indicadas nas Equações 25 e 26.

$$W_{iB}, H^2 = \frac{468}{H^{0,82}} \quad [25]$$

Onde:

- W_{iB} : *Work Index* de Bond, kWh/t.
- H : Índice de Hardgrove, °H.

Equação 25: Determinação do W_{iB} através do índice de Hardgrove proposto in Csöke et al. (2003).

$$W_{iB,H}^1 = \frac{435}{H^{0,82}} \quad [26]$$

Onde:

- $W_{iB,H}^1$: *Work Index*, kWh/t.
- H : Índice de Hardgrove, °H.

Equação 26: Determinação do W_{iB} através do índice de Hardgrove segundo Bond, (in Mucsi et al., 2011).

O ensaio de Bond com o novo moinho nas condições especiais foi apenas realizado em duas amostras, sendo estas cársicas, e permitiu verificar que os melhoramentos na moabilidade presentes no ensaio de Hardgrove com o novo equipamento também estavam presentes no ensaio de Bond, com o novo equipamento.

Constataram, ainda, que os factores de correcção aplicados para aumento de temperatura e moagem em meio alcalino são muito dependentes do tipo de bauxite em estudo, pelo que propõem a Equação 27 para determinação do W_{iB} corrigido, em meio seco.

$$W_{iB,corr} = \frac{W_{iB,seco}}{k_i} \quad [27]$$

Onde:

- $W_{iB,corr}$: *Work Index* corrigido, kWh/t.
- $W_{iB,seco}$: *Work Index* em condições secas, kWh/t.
- k_i : Factor de ajuste empírico dependente da temperatura e tipo de bauxite.

Equação 27: Determinação do W_{iB} corrigido para a moagem de bauxites em temperaturas variáveis (adaptado de Mucsi et al., 2011).

Os autores apontam para uma série de reacções químicas entre a bauxite e o meio alcalino como a causa da redução do *Work Index* que se verifica em meio alcalino, embora se trate de circunstâncias especiais do meio de moagem impostas pelo processo industrial utilizado no tratamento das bauxites, não deixa de dar indícios da possível influência da composição química dos materiais no *Work Index*.

Afirmaram, ainda, que a temperatura e a alcalinidade do meio de moagem pode conduzir a uma redução do valor do W_{iB} , em consequência do efeito daquelas variáveis sobre a moabilidade das bauxites em virtude do aumento da temperatura ocasionar reacções químicas (ocorrem efeitos químicos e mecano-químicos).

Assim, e segundo aqueles autores, a aplicabilidade dos métodos, procedimentos, e equipamentos de medição utilizados ficou demonstrada já que os resultados obtidos foram praticamente iguais para os métodos *Universal Hardgrove-Mill* e *Universal Bond-Mill*.

Como previamente mencionado o estudo desenvolvido por Deniz&Umucu (2013) analisa, para além da relação com propriedades físicas a relação entre as propriedades químicas dos materiais e a moabilidade através de análises de regressão simples e múltipla. De entre as propriedades químicas estudadas, carbono, cinzas, matéria volátil, humidade e calor específico, excluíram a matéria volátil por constatarem que esta não apresentava relação com a moabilidade.

Os autores apresentaram a Equação 28 que relaciona a moabilidade com varias propriedades químicas.

$$G_{bg} = -0,659 + 0,009(M) + 0,004(A) + 0,22(FC) + 0,001(NCV)r^2 \quad [28]$$

Onde:

- G_{bg} : Índice de moabilidade de Bond, g/rot.
- M : Humidade, %.
- A : Cinzas, %.
- FC : Carbono fixo, %.
- NCV : Valor calorífico, %.
- r^2 : Coeficiente de determinação, 0,93.

Equação 28: Relação entre moabilidade e propriedades químicas do material (Deniz & Umucu, 2013).

Neste artigo, e no que diz respeito às propriedades físicas dos materiais, individualmente, o carbono e o calor específico apresentaram o maior coeficiente de correlação com o valor de moabilidade, de entre as propriedades químicas.

2.3. Propriedades Morfológicas

A pesquisa realizada no âmbito desta tese também revelou diversos trabalhos que exploram a relação entre várias propriedades químicas dos materiais e o *Work Index*, mais uma vez estes apresentam um menor número de casos do que os verificados para relações com propriedades físicas, no entanto não devem ser descurados.

A dureza de Vickers consiste num ensaio em se mede a dureza dos materiais ao indentar a superfície da amostra aplicando pressão constante com uma ponta de diamante na forma de uma pirâmide.

O ensaio de nanoindentação é um ensaio capaz de medir a dureza de Vickers e os parâmetros de elasticidade dos materiais simultaneamente.

A fluorescência de raios-x é uma técnica utilizada para avaliar a composição química das amostras, é executada utilizando uma pistola de raios-x capaz de analisar a composição química dos materiais ao bombardeá-los com raios-x.

Vários autores (Velázquez et al., 2008) realizaram um estudo sobre a moabilidade de misturas de materiais com moabilidades diferentes, tendo realizado ensaios de moagem em amostras de limonite e serpentinite com distribuição de calibre fixa, primeiro separadamente, e depois em misturas de forma a determinar a influência da moagem simultânea dos materiais no *Work Index*. Os autores verificaram que o material com maior dureza apresentava menor moabilidade, apresentando uma possível ligação entre a dureza e o *Work Index*.

Por sua vez, Gent et al. (2012) tentaram relacionar o *BWI* com dureza de Vickers e, para esse efeito combinaram alguns dados obtidos através de ensaios de dureza de Vickers e de *Work Index* de Bond realizados pelos próprios, em amostras de zircão e granada, com recolha de dados publicados por outros autores uma vez que consideraram pouco prático realizar o ensaio de Bond para todos os minerais em estudo. Apenas foram utilizados os valores de estudos em que o material analisado era descrito como um mineral em circunstâncias normais. Ainda segundo aqueles autores “*Aqueles valores que correspondem a um mineral com valores altamente anómalos como os correspondentes a minerais alterados ou degradados também não foram incluídos*”, tendo no entanto realizado alguns ensaios de Bond e *VH* para obter valores de dureza de Vickers e *BWI*.

De entre a vasta gama de valores que recolheram para cada mineral os autores seleccionaram os valores de *Work Index* de Bond (*BWI*) e dureza de Vickers (*VH*) que consideraram mais representativos e concluíram que a correlação entre as referidas variáveis era indicadora de uma relação definitiva entre as mesmas, a qual deve ser suportada por um elevado número de observações.

Os autores determinaram as Equações 29 e 30 que correlacionam *VH* e *BWI* para minerais nos grupos dos silicatos e óxidos, com uma dureza de Vickers menor que 1200 e maior que 1200, respectivamente.

$$BWI = 5E - 06VH^2 - 0,003VH + 9,6937 \quad [29]$$

Onde:

- *BWI*: *Work Index* de Bond, kWh/t.
- *VH*: Dureza de Vickers, Kg/mm^2 .

Equação 29: Correlação entre *BWI* e *VH* para minerais silicatos e óxidos com um *VH* menor que 1200 (Gent et al., 2012).

$$BWI = [8,5E - 06(\pm 0,5E - 06)]VH^2 - [0,015(\pm 0,002)]VH + [20,0025(+2,1315)] \quad [30]$$

Onde:

- *BWI*: *Work Index* de Bond, kWh/t.
- *VH*: Dureza de Vickers, kg/mm^2 .

Equação 30: Correlação entre *BWI* e *VH* para minerais silicatos e óxidos com um *VH* maior que 1200 (Gent et al., 2012).

Para a determinação do *BWI* nos minerais carbonatados, sulfatos e iodetos através da *VH* indicam a Equação 31.

$$BWI = 0,0004VH^2 - 0,1746VH + 23,623 \quad [31]$$

Onde:

- *BWI*: *Work Index* de Bond, kWh/t.
- *VH*: Dureza de Vickers, kg/mm².

Equação 31: Determinação do *BWI* a partir do valor de *VH* em minerais carbonatos, sulfatos e iodetos (Gent et al., 2012).

Concluíram que na análise de espécies mono-minerais a dureza de Vickers, numa fase de estudo preliminar, poderia ser utilizada como uma opção para a determinação do *BWI*. Isto evidencia uma possível relação entre estas duas variáveis.

Kulu et al. (2009) realizaram ensaios de moabilidade e abrasividade em amostras de quartzito, granito, cascalho e calcário utilizando um desintegrador para verificar a moabilidade e analisaram o desgaste dos aços de forma a averiguar a abrasividade, verificando que a abrasividade dos minerais está relacionada directamente com a sua dureza e que a moabilidade tem uma relação positiva com a abrasividade. Já que a moabilidade está directamente relacionada com o *Work Index* isto indica uma possível relação entre a abrasividade e o *Work Index*.

Para determinar a dureza dos espécimes rochosos com mais que um mineral utilizaram a Equação 32.

$$HV' = HV_1 \cdot V_1 + HV_2 \cdot V_2 + HV_3 \cdot V_3 \quad [32]$$

Onde:

- *HV*: Dureza dos componentes.
- *V*: Percentagem em peso dos componentes.

Equação 32: Determinação da dureza dos espécimes rochosos (Kulu et al., 2009).

Ipek et al. (2005), estudaram a moabilidade de quartzo, feldspato e caulino, materiais usados na indústria cerâmica.

Para o cálculo do *Work Index* de Bond, o qual permite obter a energia específica de rotura de uma rocha, recorreram à Equação 33.

$$W_i = \frac{44,5}{P_1^{0,23} \times (G_{bp})^{0,82} \times (10/\sqrt{P} - 10/\sqrt{F})} \times 1,10 \text{ kWh/t} [33]$$

Onde:

- *W_i*: *Work Index*, kWh/t.
- *P₁*: Dimensão da abertura do peneiro de corte do produto, μm.
- *G_{bp}*: Passados acumulados no peneiro *P₁* por rotação, g/rot.
- *P*: Calibre correspondente a 80% de passados no produto, μm.
- *F*: Calibre correspondente a 80% de passados na alimentação, μm.

Equação 33: Determinação do *Work Index* de Bond (Ipek et al., 2005).

O objectivo do estudo realizado pelos autores era a análise da influência de um material com menor *Work Index* na moabilidade de uma mistura, no entanto os autores verificaram que no caso das moagens individuais os materiais com maior dureza na escala de Mohs tinham maior *Work Index*, o que mais uma vez pode indicar uma relação entre estas propriedades dos materiais.

Relativamente à energia de fragmentação, esta foi também abordada por Iglésias et al. (1999), os quais estudaram a variação da energia de fragmentação na moagem de material misto numa fábrica de cimento, na qual 95% do material era calcário e 5% gesso. Foi detectado um aumento no *WI* dos materiais moídos em cerca de 15% quando foi mudada a fonte do gesso que era integrado na referida mistura. Segundo os autores, a análise mineralógica do novo material não revelou uma mudança tão significativa que constituísse razões, sob os pontos de vista químico e mineralógico, para as variações ocorridas relativamente à quantidade de moagem necessária. Também verificaram que o gesso original, gesso 1, tinha um *Work Index* mais alto que o gesso de substituição, gesso 2. Tal comportamento terá ficado a dever-se, segundo os autores, ao facto de *“a rede de superfícies esfoliantes nos cristais do gesso 2 facilita a rotura durante a fragmentação grosseira, como no caso dos testes para obter o Work Index (corte a 100 mm), já que utiliza estas superfícies. Também vai produzir uma rotura fácil utilizando as grandes superfícies inter cristalinas”, e “no gesso 1, como o tamanho dos grãos monocristalinos é 100 mm, a rotura vai ser predominantemente transcristalina com poucas roturas segundo a rede de superfícies intergranulares, que tem a dimensão média, 100 mm”*

Isto mais uma vez indica uma possível ligação entre o *Work Index* e as características morfológicas das rochas.

Stamboliadis et al. (2011) propuseram um método para a determinação do expoente n na Equação de Bond, normalmente assumido como 0,5, de forma a tornar a determinação do W_i mais precisa.

Para tal, apresentaram a Equação 34 para a determinação do W_i . Este pode ser determinado se o ensaio for realizado num moinho que permita a determinação da energia específica dispendida.

$$W_i = \frac{e_{1,2}}{100^n \times \left(\frac{1}{x_2^n} - \frac{1}{x_1^n} \right)} \quad [34]$$

Onde:

- W_i : *Work Index*, kWh/t.
- $e_{1,2}$: Energia específica necessária para moer o material do calibre x_1 até x_2 , kWh/ton.
- x_2 : Calibre correspondente a 80% de passados no produto, μm .
- x_1 : Calibre correspondente a 80% de passados na alimentação, μm .
- n : Expoente, adimensional.

Equação 34: Determinação do W_i utilizando um moinho que permite a determinação da energia específica utilizada (Stamboliadis et al., 2011).

Segundo aqueles autores, recorreram a moinhos de laboratório de bolas e varas para realizar moagens sucessivas, e apenas utilizando o moinho de laboratório de varas efectuaram moagens semi-contínuas: Com os ensaios de moagens sucessivas realizados em moinhos de anéis recorreram a um moinho criado para o efeito (Spitas et al., 1999).

O moinho de varas, ainda segundo os mesmos autores, estava carregado com carga de varas de aço cujo diâmetro varia entre 20 e 14 mm tendo um peso total de 8,55kg. O moinho tinha comprimento de 30 cm e diâmetro de 20,4 cm.

Verificaram, também, que os valores de W_i variavam como previsto, aumentando para calibres mais pequenos de produto e que o expoente n (Equação 34) não é $n = 0,5$ para todos os minerais e desenvolveram um procedimento para calcular o valor óptimo do expoente n utilizando os dados experimentais existentes. De acordo com o procedimento que sugeriram, para calcular o valor de n de forma mais precisa determinaram o W_i de uma amostra de quartzo para diferentes aberturas do peneiro de saída utilizando a Equação 34, assim como a energia específica do moinho. Uma vez feita essa determinação, utilizaram a Equação 34 de W_i , apresentada inicialmente, e a energia específica calculada previamente para calcular os W_i teóricos para cada diâmetro de corte utilizando todos os valores de n entre 0,1 e 1,3, com incrementos de 0,1. Compararam os grupos de valores de W_i calculados com n igual, sendo o grupo de resultados com menor desvio padrão o que tem o n verdadeiro do material.

Após os cálculos para as amostras de quartzo utilizaram os procedimentos apresentados previamente em outras amostras para a determinação de W_i e n óptimo, constatando que para o n óptimo o valor médio do W_i calculado não variava muito quando comparado com os valores médios calculados com $n=0,5$ mas o erro dos valores calculados com n óptimo eram muito inferiores aos verificados com $n=0,5$.

Os autores referem que o tamanho dos grãos minerais na rocha influencia o *Work Index*, visto que a moagem para calibres maiores causa rotura entre os grãos, algo que deixa de ser viável a partir do momento em que o calibre do produto pretendido é inferior ao tamanho dos grãos.

Outros autores (Deniz et al., 2003) testaram o efeito de alterações na quantidade de carga circulante e tamanho do calibre de corte no cálculo da moabilidade e do *Work Index* de Bond. Para esse efeito, realizaram o ensaio de Bond com condições de carga circulante, e tamanhos de peneiro de corte para recirculação diferentes utilizando quatro amostras de sílica diferentes para cada teste. A Equação 35 foi utilizada para calcular o W_i .

$$W_i = 1,1 * \frac{44,5}{P_i^{0,23} * G_{bg}^{0,82} * [(10/\sqrt{P_{80}}) - (10/\sqrt{F_{80}})]} \quad [35]$$

Onde:

- W_i : Work Index, kWh/t.
- P_i : Dimensão da abertura do peneiro de corte do produto, μm .
- G_{bg} : Passados acumulados no peneiro P_i por rotação, g/rot.
- P_{80} : Calibre correspondente a 80% de passados no produto, μm .
- F_{80} : Calibre correspondente a 80% de passados na alimentação, μm .

Equação 35: Cálculo do *Work Index* de Bond (Deniz et al., 2003).

Os autores indicam que a composição dos materiais influencia o *Work Index*, em particular notam que a percentagem de sílica das amostras influenciou o *Work Index*.

Souza et al. (2008) realizaram vários ensaios de identificação em amostras de *clinker* de várias fábricas do Brasil, com o intuito de relacionar propriedades de *clinkers* com a respectiva moabilidade. Entre esses ensaios um dos que realizaram foi o de energia de rotura por impacto. Através dos resultados deste ensaio os autores fizeram uma selecção preliminar das amostras, escolheram avançar com os ensaios de identificação em três amostras, sendo que uma delas, designada *clinker B*, tinha baixa energia de rotura e as restantes, designadas *clinker A* e *C*, tinham energia de rotura alta.

Realizaram o ensaio de Bond nas três amostras tendo verificado que todas as amostras apresentavam valores de *Work Index* altos. A amostra com baixa energia de rotura, obtida através do ensaio de energia de rotura por impacto, apresentou o valor de *Work Index* intermédio de entre as três amostras.

Os autores analisaram a mineralogia e varias propriedades físicas e químicas dos minerais através de observação no microscópio, da difracção de raios-x, da fluorescência de raios-x, e da nanoindentação.

Os autores constataram que o *clinker B* apresentava porosidade elevada, assim como cristais com micro-fracturas, tendo considerado que estas características morfológicas, assim como a forma dos seus agrupamentos de cristais, podem ter contribuído para a sua baixa resistência no ensaio de energia de rotura por impacto.

Constataram, ainda, que a média pesada do ensaio de dureza de Vickers do *clinker B*, obtida através do ensaio de nanoindentação, é intermédia quando comparada com os outros dois tipos de *clinker* e verificaram que “as pequenas diferenças no WI são relacionadas com propriedades mineralógicas e mecânicas das fases minerais dos *clinkers* comerciais. As maiores diferenças de entre as amostras testadas com DWT (*clinkers A, B e C*) estão associadas a características macro

dos clinkers, como porosidade e agrupamentos de belite”, nomeadamente, os autores referem que a causa do *Work Index* elevado nestas amostras é a presença de minerais com resistência à fractura elevada em todas as amostras estudadas.

Capítulo 3

Enquadramento geográfico e geológico das rochas em estudo

3.1 Granito Cristal Azul

3.2 Granito Amarelo Vila Real

3.3 Granito Cinzento Claro de Pedras Salgadas

3.4 Quartzodiorito Cinzento Favaco

3.5 Granito Rosa Monção

3.6 Sienito Nefelínico Cinzento Monchique

3.7 Calcário Moleanos Macio

3.8 Xisto Ardósia, Ardósia de Valongo

3.9 Serpentinito Verde Donai

3.10 Calcário Cristalino Branco Rosado

Um dos objectivos desta tese é avaliar a correlação entre as propriedades físico-mecânicas e químicas dos materiais ensaiados e o respectivo *Work Index*, pelo que a análise recaiu sobre materiais com vários tipos diferentes de litologia e morfologia.

Em seguida apresentam-se as pedras naturais objecto deste estudo a respectiva descrição macroscópica, o enquadramento geográfico e geológico. A Figura 1 apresenta o mapa de Portugal com as zonas de extracção de cada amostra.

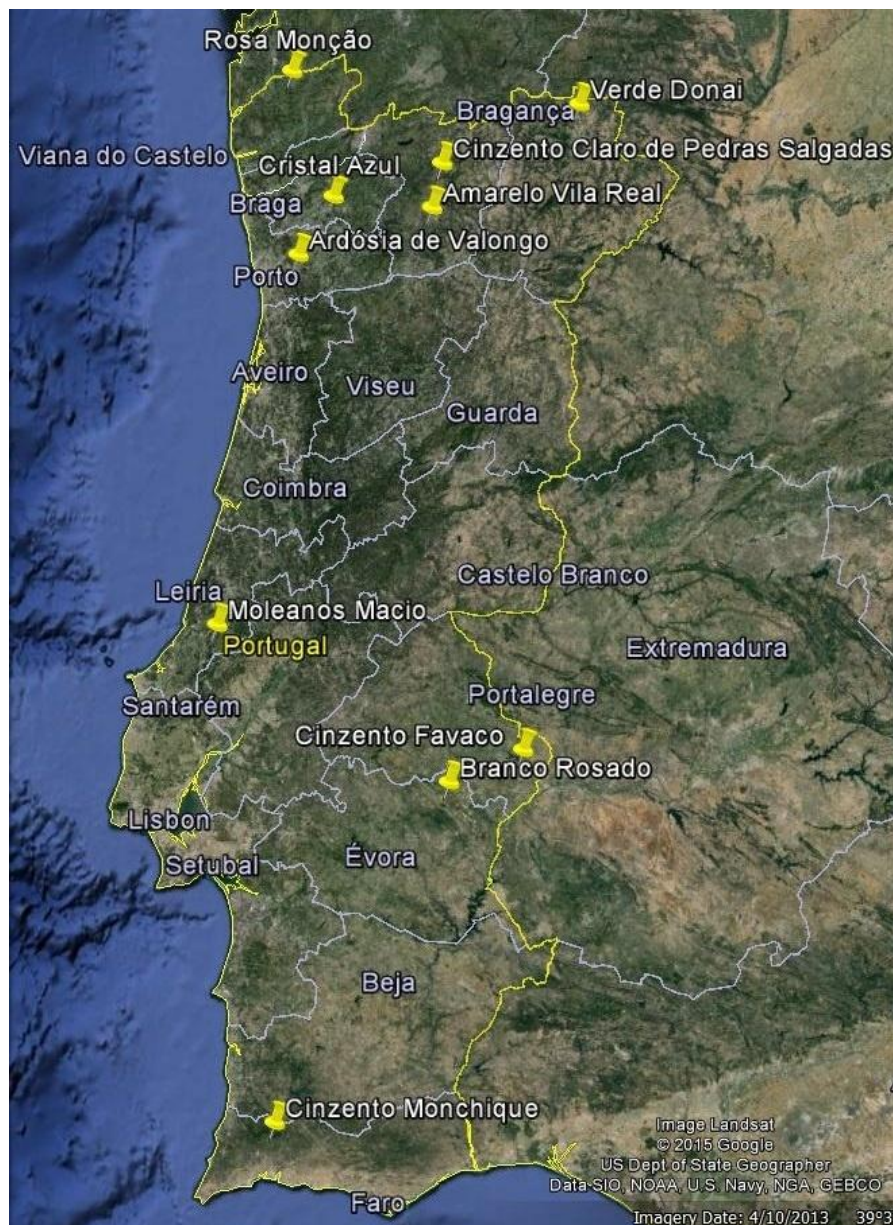


Figura 1: Mapa de Portugal com as zonas de extracção das amostras.

3.1. Granito Cristal Azul

- Enquadramento Geográfico e Geológico

Localizado na St^a Catarina da Penha, na Freguesia de Costa, no Concelho de Guimarães, no Distrito de Braga o granito Cristal azul insere-se num maciço de granitos que cruza o Minho na direcção noroeste-sudeste, sendo um granito tardi-tectónico relativamente à terceira fase de deformação Hercínia (Spínola, 2015).

A Figura 2 apresenta um extracto da carta geológica do local de extracção desta rocha.

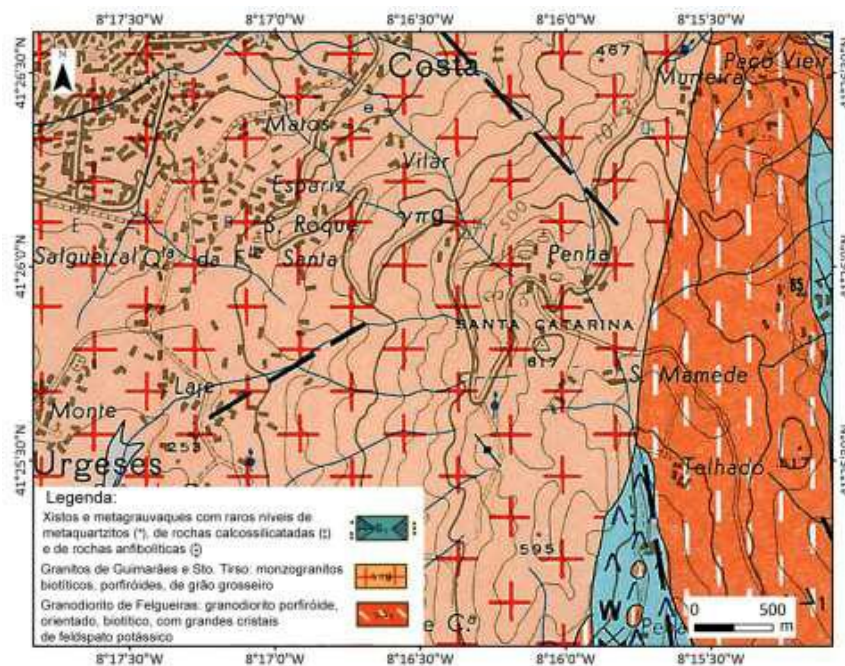


Figura 2: Extracto da Carta Geológica, Folha 9-B Guimarães, Escala 1:50 000 (Spínola, 2015).

- Descrição macroscópica

Esta rocha ígnea trata-se de um granito biotítico cinzento com megacristais de feldspato frequentes cujos contornos estão pouco definidos, a rocha apresenta textura granular porfíróide com grão grosseiro (<http://rop.Ineg.pt/rop/index.php>).

A Figura 3 apresenta uma amostra de Cristal Azul.



Figura 3: Amostra de Cristal Azul.

3.2. Granito Amarelo Vila Real

- Enquadramento Geográfico e Geológico

O Amarelo Vila Real é extraído de várias explorações localizadas na Serra da Falperra, na Freguesia de S. Tomé do Castelo, no Concelho e distrito de Vila Real. Este granito tardi a pós-tectónico relativamente a 3ª fase de deformação hérnica insere-se na antiforma monção, vila real, Moncorvo (Spínola, 2015).

A Figura 4 apresenta um extracto da carta geológica do local de extracção desta rocha.

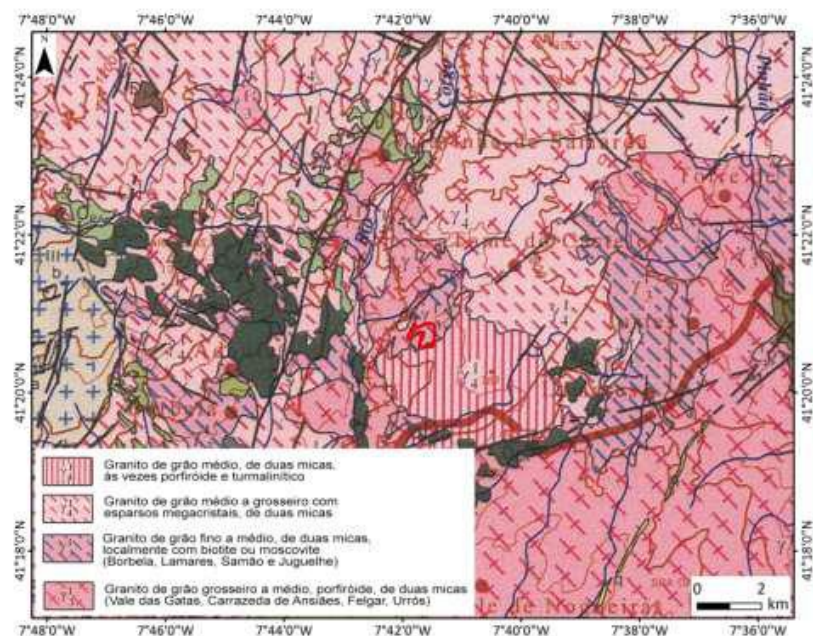


Figura 4: Extracto da Carta Geológica de Portugal, Folha 2, Escala 1:200 000 (Spínola, 2015).

- Descrição macroscópica

Esta rocha ígnea trata-se de um granito amarelo com textura granular ligeiramente porfiróide algo alterado, com duas micas e com grão médio a grosseiro (<http://rop.lneg.pt/rop/index.php>).

A Figura 5 apresenta uma amostra de Amarelo Vila Real.

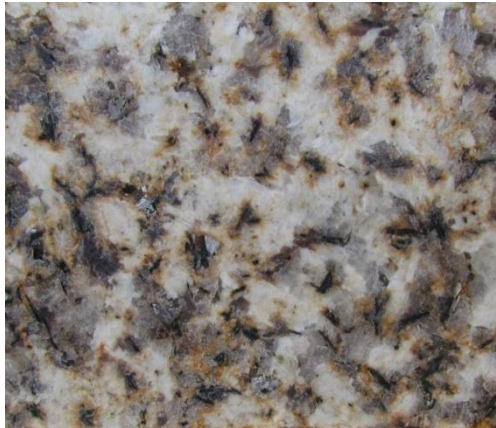


Figura 5: Amostra de Amarelo Vila Real.

3.3. Granito Cinzento Claro de Pedras Salgadas

- Enquadramento Geográfico e Geológico

O Cinzento Claro de Pedras Salgadas pertence a uma massa granítica calco-alcalina que se manifesta desde a freguesia de Vidago até a freguesia de Vila Pouca de Aguiar no Distrito de Vila Real (Spínola, 2015).

A Figura 6 apresenta um extracto da carta geológica do local de extracção desta rocha.

- Descrição macroscópica

Esta rocha ígnea trata-se de um granito de cor cinzenta clara principalmente biotítico com duas micas, apresentando grão médio (<http://rop.lneg.pt/rop/index.php>). A rocha apresenta textura granular porfiróide.

A Figura 7 apresenta uma amostra de Granito Cinzento Claro de Pedras Salgadas.

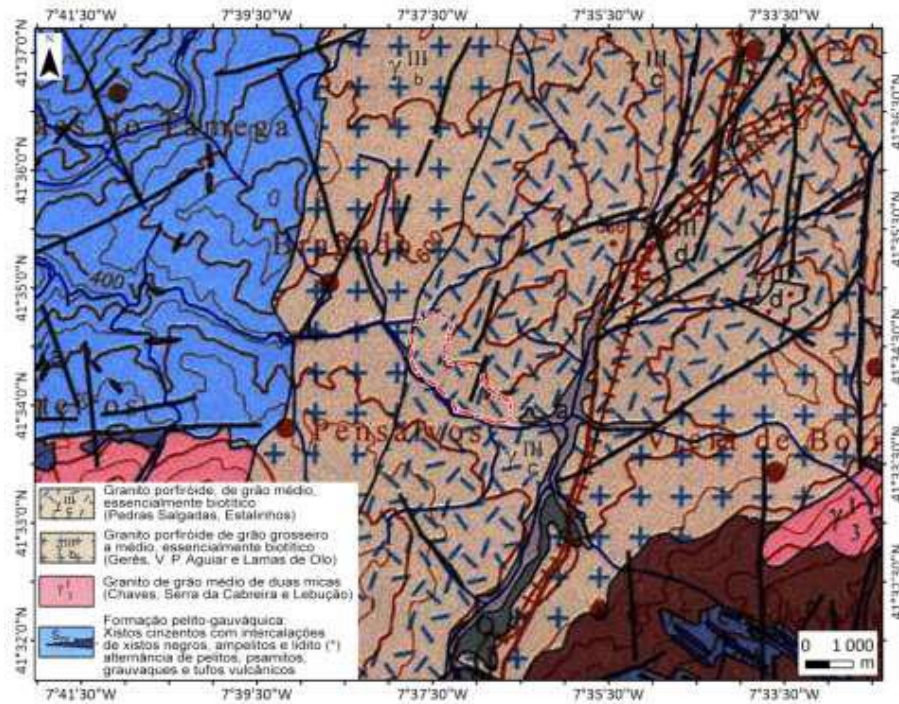


Figura 6: Extracto da Carta Geológica de Portugal, Folha 2, Escala 1:200 000 (Spínola, 2015).



Figura 7: Amostra de Granito Cinzento Claro de Pedras Salgadas.

3.4. Quartzodiorito Cinzento Favaco

- Enquadramento Geográfico e Geológico

O quartzodiorito Cinzento Favaco é extraído na Herdade do Pinheiro, na Freguesia de S. Vicente e Ventosa, no Concelho de Elvas, no Distrito de Portalegre, esta rocha pertence a zona exterior da intrusão de Santa Eulália sendo um maciço tardi a pós-tectónico em relação à orogenia Hercínica (<http://rop.lneg.pt/rop/index.php>).

A Figura 8 apresenta um extracto da carta geológica do local de extracção desta rocha.

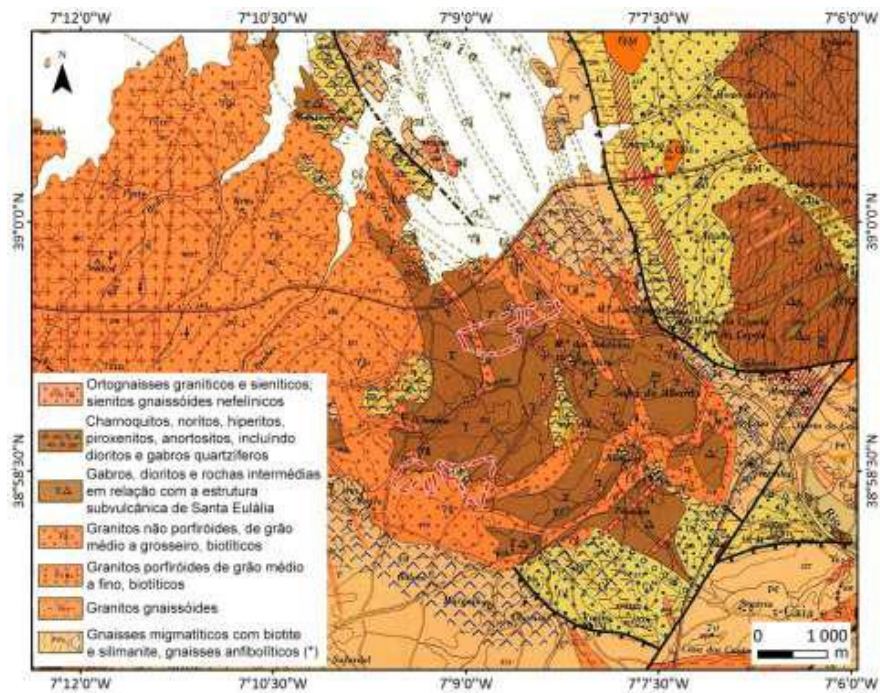


Figura 8: Extracto da Carta Geológica de Portugal, Folha 33-C Campo Maior, Escala 1:50 000 (Spínola, 2015).

- Descrição macroscópica

Esta rocha ígnea trata-se de um quartzodiorito biotítico, cinzento-escuro, e hornoblândico com, apresentando grão fino a médio (<http://rop.lneg.pt/rop/index.php>). A rocha apresenta textura equigranular.

A Figura 9 apresenta uma amostra de Cinzento Favaco.

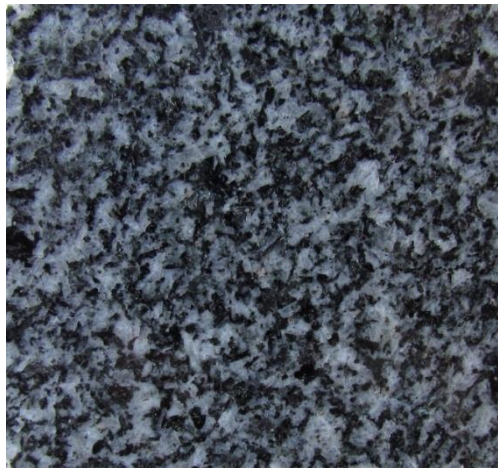


Figura 9: Amostra de Cinzento Favaco.

3.5. Granito Rosa Monção

- Enquadramento Geográfico e Geológico

O granito Rosa Monção é extraído nas freguesias de Tiais e Safins no Concelho de Monção ou Valença respectivamente, ambos no Distrito de Viana do Castelo estando inserido num grande maciço que aflora também em Espanha, trata-se de um batólito tardi a pós-tectónico relativamente à terceira fase de deformação Hercínica (Spínola, 2015).

A Figura 10 apresenta um extracto da carta geológica do local de extracção desta rocha.

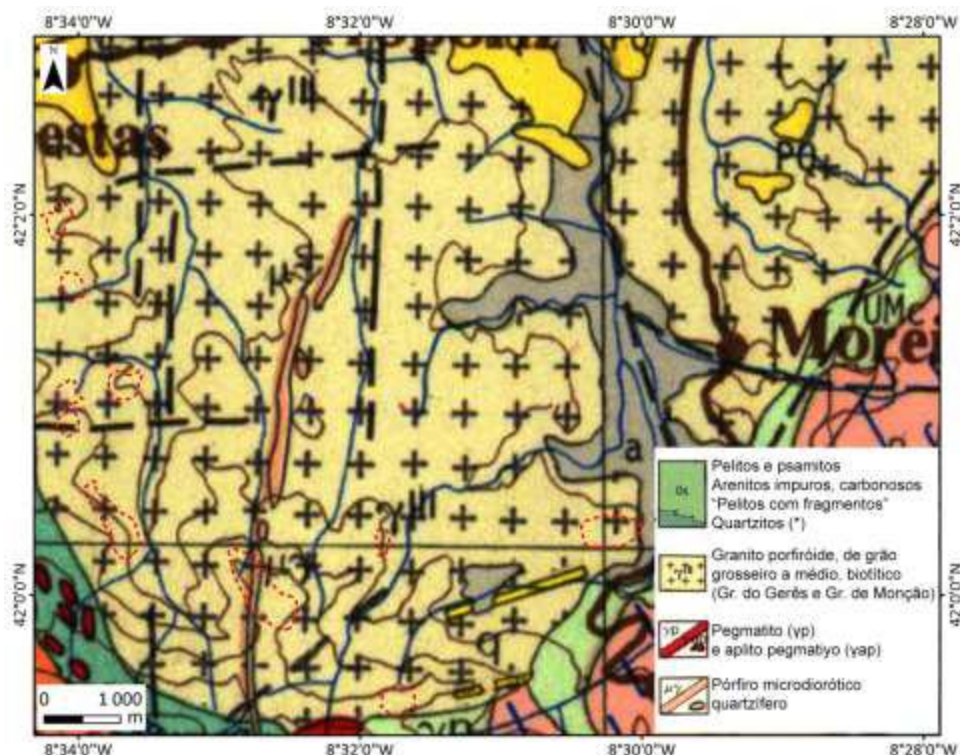


Figura 10: Extracto da Carta Geológica de Portugal, Folha 1, Escala de 1:200 000. (Pereira et al., 1992).

- Descrição macroscópica

Esta rocha ígnea trata-se de um granito biotítico com textura granular porfiróide e apresentando grão grosseiro, a rocha é rosada devido aos megacristais de feldspato potássico (<http://rop.lneg.pt/rop/index.php>).

A Figura 11 apresenta uma amostra de Rosa Monção.

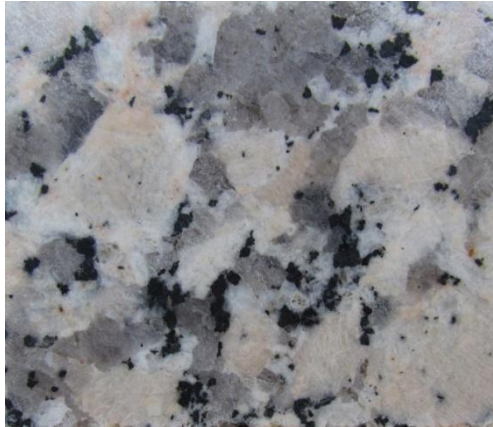


Figura 11: Amostra de Rosa Monção.

3.6. Sienito Nefelínico Cinzento Monchique

- Enquadramento Geográfico e Geológico

O Cinzento Monchique é extraído em Nave, na Freguesia de Monchique, no Concelho de Monchique, e no Distrito de Faro, enquadrado num maciço eruptivo alcalino muito extenso implantado durante a orogenia Alpina (Spínola, 2015).

A Figura 12 apresenta um extracto da carta geológica do local de extracção desta rocha.

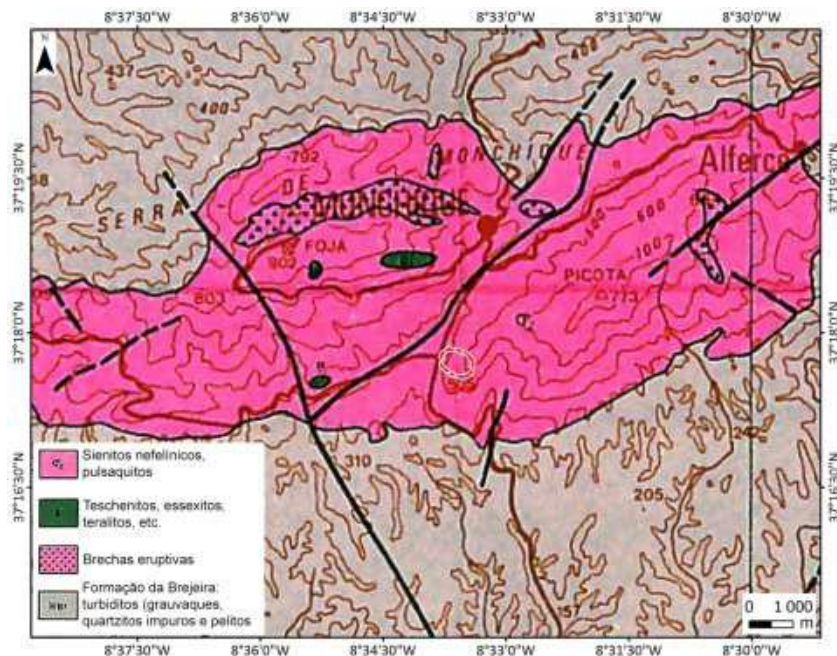


Figura 12: Extracto da Carta Geológica de Portugal, Folha 7, Escala de 1:200 000. (Spínola, 2015).

- Descrição macroscópica

Esta rocha ígnea trata-se de um sienito nefelínico cinzento, e grão médio a grosseiro, incluindo grãos de nefelina (<http://rop.Ineg.pt/rop/index.php>).

A Figura 13 apresenta uma amostra de Cinzento Monchique.



Figura 13: Amostra de Cinzento Monchique.

3.7. Calcário Moleanos Macio

- Enquadramento Geográfico e Geológico

O Moleanos Macio é extraído em Moleanos, na Freguesia Prazeres de Aljubarrota, no Concelho de Alcobaça, no Distrito de Leiria. Este maciço pertence ao período Caloviano (<http://rop.Ineg.pt/rop/index.php>).

A Figura 14 apresenta um extracto da carta geológica do local de extracção desta rocha.

- Descrição macroscópica

Esta rocha sedimentar trata-se de um calcário bege claro com alguns pontos escuros distribuídos pela matriz, com vestígios bioclásticos, calciclásticos e oolíticos (<http://rop.Ineg.pt/rop/index.php>).

A Figura 15 apresenta uma amostra de Moleanos Macio.

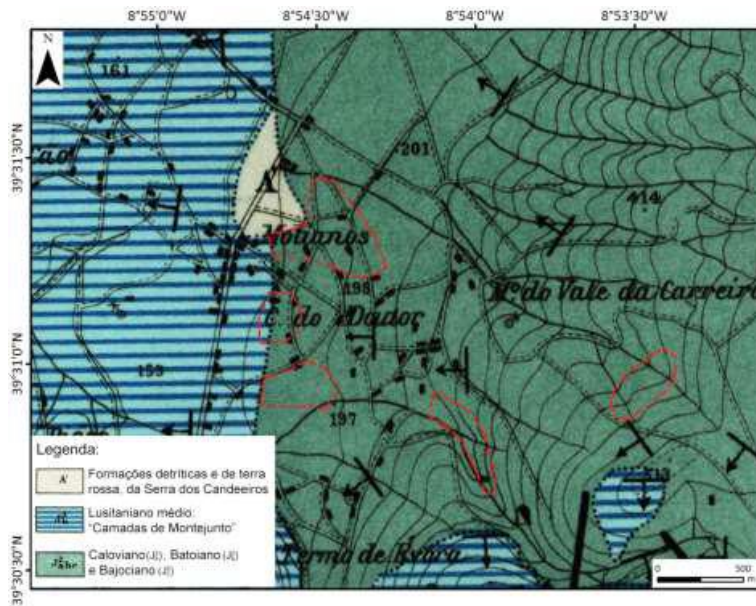


Figura 14: Extracto da Carta Geológica de Portugal, Folha 26-B, Alcobaça, Escala 1:50 000. (Spínola, 2015).



Figura 15: Amostra de Moleanos Macio.

3.8. Xisto Ardósia, Ardósia de Valongo

- Enquadramento Geográfico e Geológico

A Ardósia de Valongo é extraída na Freguesia de Campo, no Concelho de Valongo, no Distrito do Porto. “As pedreiras de ardósia desta região estão instaladas numa faixa xistenta do flanco oriental do anticlinal de Valongo (Douro Litoral) e pertencem ao Landeiliano superior (Ordovícico)” (Spínola, 2015).

A Figura 16 apresenta um extracto da carta geológica do local de extracção desta rocha.

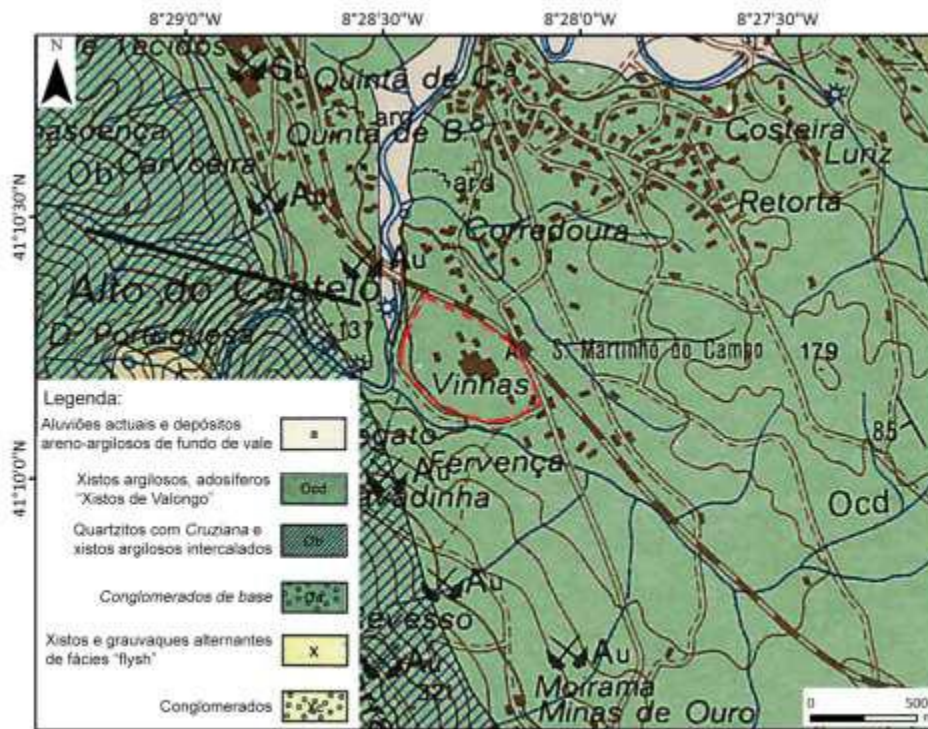


Figura 16: Extracto da Carta Geológica de Portugal, Folha 9-D, (Campo – Valongo), com local de extracção, Escala 1:50000. (Spínola, 2015).

- Descrição macroscópica

Esta rocha metamórfica trata-se de um Xisto ardósico cinzento-escuro com clivagem visível, compactado, apresentando grão muito fino (<http://rop.ineg.pt/rop/index.php>). A rocha apresenta textura granoblástica e estrutura xistosa.

A Figura 17 apresenta uma amostra de Ardósia de Valongo.

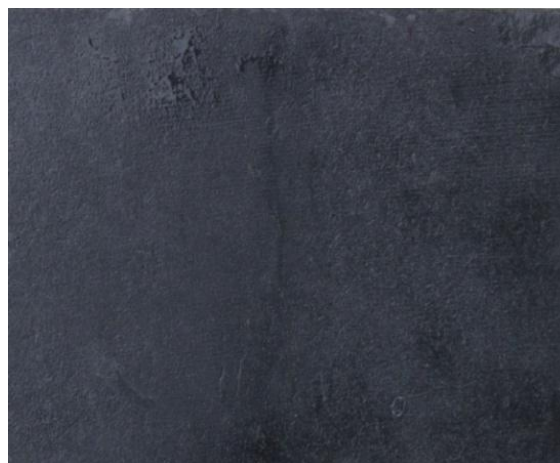


Figura 17: Amostra de Ardósia de Valongo.

3.9. Serpentinito Verde Donai

- Enquadramento Geográfico e Geológico

O Verde Donai é extraído em Lagomar, na Freguesia de Donai, no Concelho de Bragança, no Distrito de Bragança. A rocha pertence ao Complexo Ofiolítico de Bragança-Vinhais, especificamente o maciço de serpentinitos, alongado na direcção NW-SE (Spínola, 2015).

A Figura 18 apresenta um extracto da carta geológica do local de extracção desta rocha.

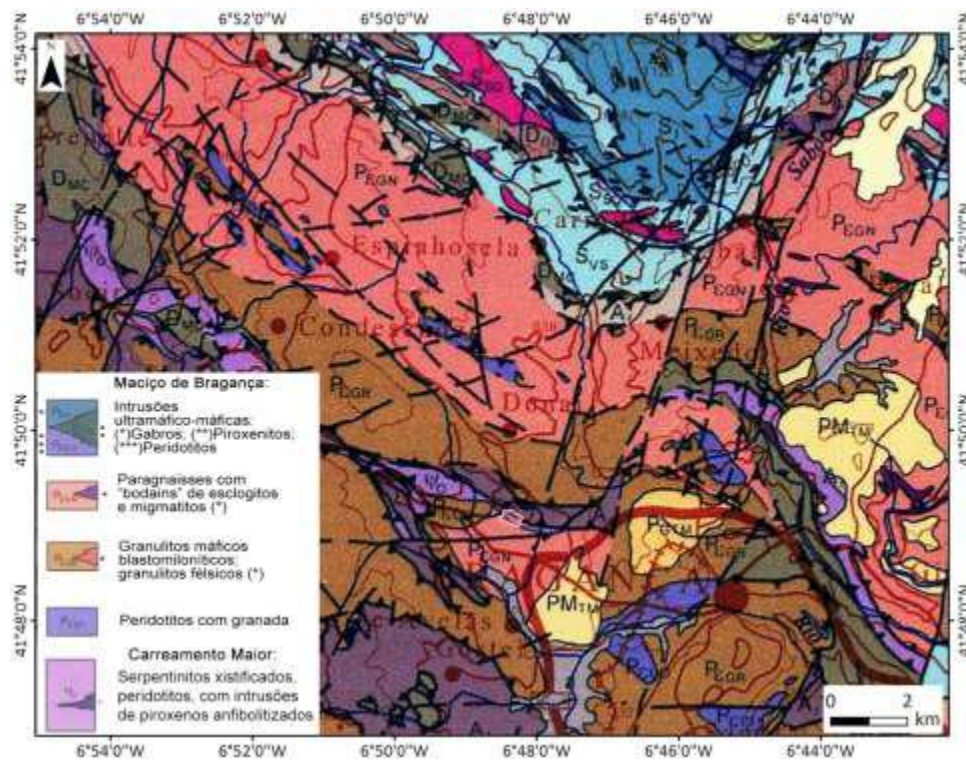


Figura 18: Extracto da Carta Geológica de Portugal, Folha 2, Escala 1:200 000 (Spínola, 2015).

- Descrição macroscópica

Esta rocha metamórfica trata-se de uma rocha serpentínica com de cor verde escura, contendo zonas mais claras e megacristais cinzentos (<http://rop.Ineg.pt/rop/index.php>). A rocha apresenta textura porfiroblástica.

A Figura 19 apresenta uma amostra de Verde Donai.

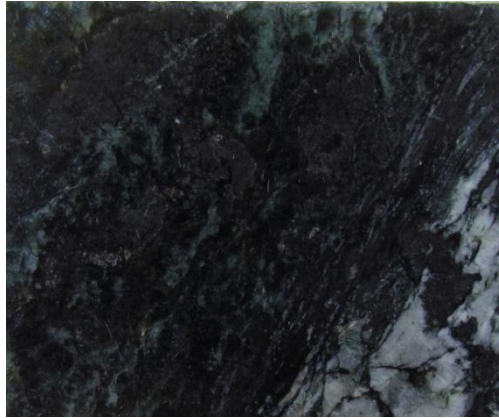


Figura 19: Amostra de Verde Donai.

3.10. Calcário Cristalino Branco Rosado

- Enquadramento Geográfico e Geológico

O Branco Rosado é extraído em Cerca de St^o António, na Freguesia de Santa Maria no Concelho de Estremoz no Distrito de Évora. Esta rocha encontra-se no anticlinório de Estremoz-Borba- Vila Viçosa (Alto Alentejo), pertencendo ao Complexo Vulcano-Sedimentar Carbonatado (Spínola, 2015).

A Figura 20 apresenta um extracto da carta geológica do local de extracção desta rocha.

- Descrição macroscópica

Esta rocha metamórfica trata-se de um mármore calcítico branco com zonas rosadas, apresentando textura granoblástica com estrutura maciça, e com grão médio (<http://rop.lneg.pt/rop/index.php>).

A Figura 21 apresenta uma amostra de Branco Rosado.

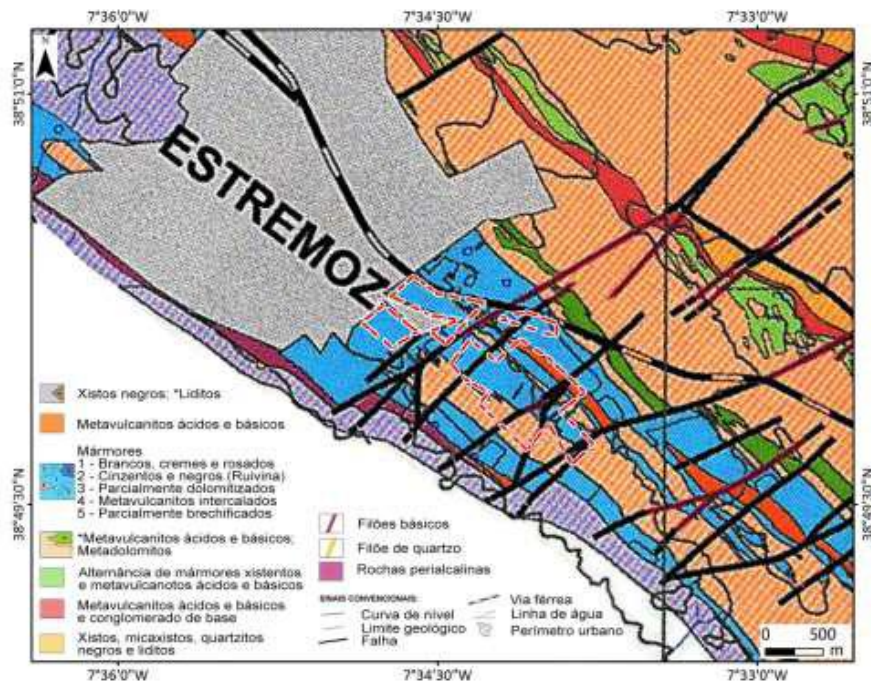


Figura 20: Extracto da Carta Geológica do Anticlinal de Estremoz, Escala 1:25 000 (Carvalho, 2008).



Figura 21: Amostra de Branco Rosado.

Capítulo 4

Metodologias de análise

4.1 Análise química

4.2 Composição mineralógica

4.3 Massa volúmica aparente e porosidade aberta

4.4 Resistência à compressão

4.5 Carga pontual

4.6 Capon

Uma análise do estado da arte revela indícios de um elevado número de propriedades das rochas que podem ter influência no respectivo *Work Index*. Estas propriedades organizam-se principalmente em 3 grupos, propriedades físicas relacionadas com a resistência da rocha à fractura, propriedades químicas e propriedades morfológicas.

Uma bateria completa de ensaios para determinar todas as propriedades das rochas com possível influência no *Work Index* referidas no estado da arte seria proibitivamente dispendiosa.

Assim, havendo disponibilidade de amostras sobre as quais já tinham sido realizados alguns ensaios de identificação seleccionaram-se as seguintes propriedades para estudo.

No que diz respeito às propriedades físicas foi analisada a massa volúmica aparente, já que a possível relevância desta propriedade é evidenciada no trabalho desenvolvido por Deniz et al. (2013). A resistência à carga pontual também foi analisada, já que Deniz & Umucu (2013) estabelecem uma relação entre várias propriedades físicas do material, incluindo a resistência à carga pontual, e a moabilidade através de regressão linear múltipla, logo relacionando-as indirectamente com o *Work Index*. Também foram realizados ensaios de abrasividade nas rochas estudadas uma vez que, segundo Kulu et al. (2009), este parâmetro parece ter influência na moabilidade.

No que diz respeito as propriedades químicas, Deniz & Umucu (2013) também estabeleceram uma relação entre propriedades químicas dos materiais e a sua moabilidade, mais uma vez utilizando regressão linear múltipla.

Relativamente às propriedades morfológicas, considerou-se que estas podiam apresentar relevância uma vez que Gent et al. (2012) estabeleceu uma relação entre a dureza de Vickers de minerais e o *Work Index* assim como Deniz et al. (2003) referem a possível influência da percentagem de sílica no *Work Index*.

Para além dos ensaios de identificação a que já tinham sido submetidas as amostras seleccionadas foi ainda realizado o ensaio de carga pontual e o ensaio capon. No caso da composição mineralógica e resistência à compressão foram utilizados os valores Tabelados pelo LNEG.

4.1. Análise química

Foram realizados ensaios no LGMC para determinar a composição química das rochas através de um analisador da marca ThermoScientific modelo NITON XL3t 900 Analyzer, tendo sido seguidos os procedimentos ditados no manual de utilização. Assim, e segundo o manual de utilização do equipamento, a amostra foi moída, tendo sido preparado um copo especial com uma película fina de polipropileno a servir de janela para realizar a análise da composição. A amostra moída foi colocada no copo sendo tomados cuidados para que esta não apresente espaços vazios, camadas irregulares ou se possa movimentar quando o copo é manuseado. Uma vez preparadas as amostras, estas foram ensaiadas utilizando o equipamento em Modo de Minas Cu/Zn.

A Figura 22 apresenta a máquina de fluorescência de raios-x/ *software* e três dos provetes utilizados nos ensaios de fluorescência raios-x, respectivamente.



Figura 22: Máquina de fluorescência de raios-x e *software* (LGMC) (direita) e provetes utilizados para o ensaio de fluorescência raios-x (LGMC) (esquerda).

Para determinar a composição química dos provetes em estudo o equipamento envia um feixe de raios-x que ioniza os elementos, essa ionização causa a emissão de um feixe de fluorescência de raios-x por parte do elemento que o equipamento está preparado para captar. Este feixe varia de elemento químico para elemento químico. O equipamento analisa cada feixe recebido convertendo a informação em dados informáticos fornecendo a informação dos elementos presentes na amostra e a sua quantidade.

A Figura 23 apresenta de modo esquemático o funcionamento do equipamento de fluorescência de raios-x.

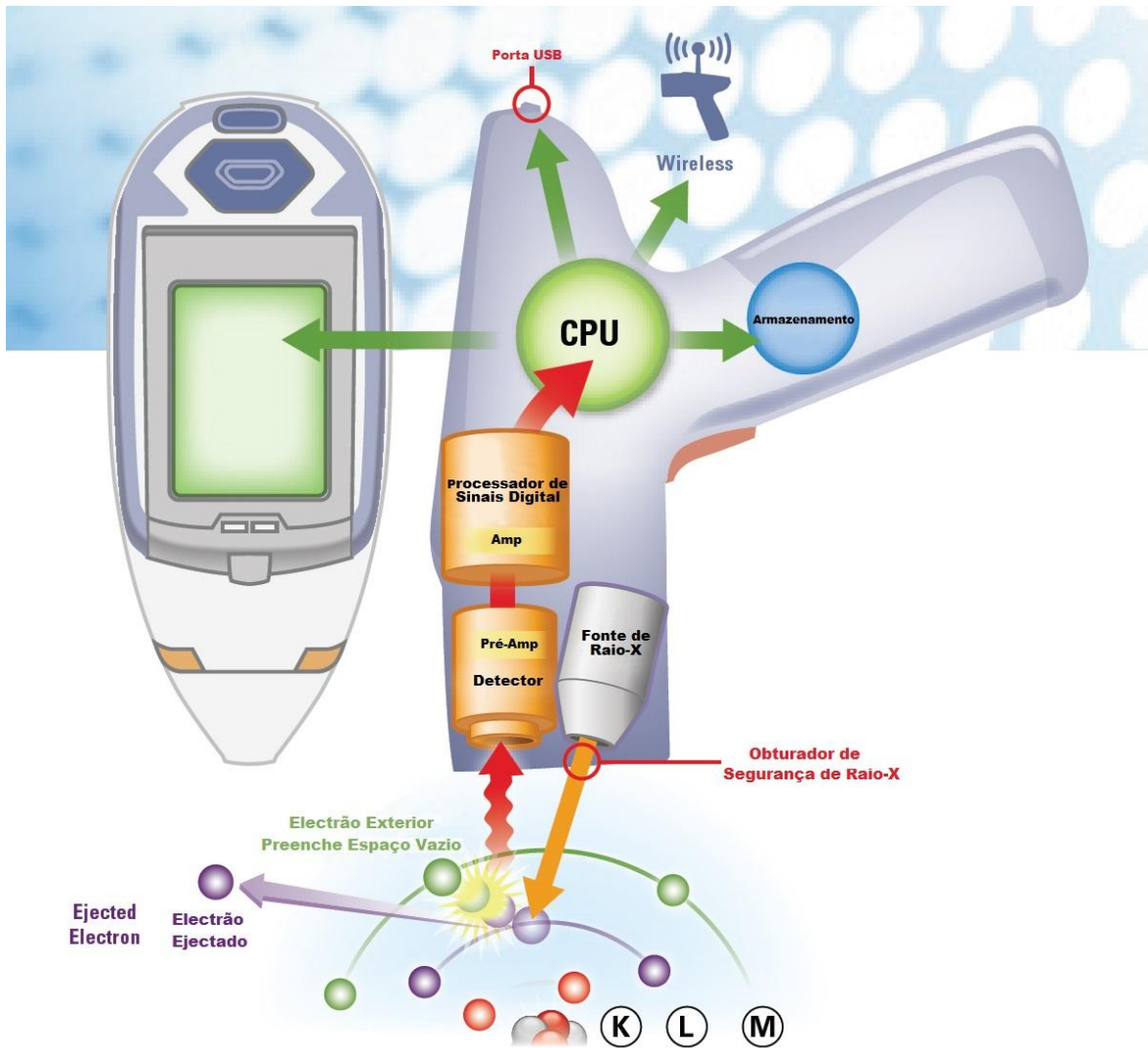


Figura 23: Esquema de funcionamento do equipamento de Fluorescência de raios-x. (Adaptado de <http://www.thermoscientific.com/content/dam/tfs/ATG/CAD/CAD%20Documents/Catalogs%20&%20Brochures/Elemental%20Analysis/XRF/D00831~.pdf>).

4.2. Composição mineralógica

No presente trabalho utiliza-se os valores da composição mineralógica das rochas estudadas obtidos pelo LNEG, determinados por microscopia e complementados através de uma estimativa semi-quantitativa por difracção de raios-x (<http://rop.lneg.pt/rop/images/intro/intr.php>).

4.3. Massa volúmica aparente e porosidade aberta

Os ensaios de massa volúmica aparente e porosidade aberta foram realizados no LGMC segundo a norma EN 1936 (2006). Foi possível realizar o ensaio em todas as amostras, com exceção da amostra do Cinzento Monchique uma vez que não foram obtidas amostras com as dimensões necessárias para a realização do ensaio. Assim recorreu-se aos valores Tabelados pelo LNEG (<http://rop.lneg.pt/rop/index.php>) para esta rocha.

Como estipulado em EN 1936 (2006) foram recolhidos seis provetes cúbicos para cada amostra e com valores de volume aparente e uma relação volume/área de superfície cumprindo o explicitado na norma. Os provetes foram secos até atingir massa constante e mantidos num dessecador até voltarem a apresentar temperatura ambiente.

Uma vez asseguradas as condições dos provetes prosseguiu-se com o ensaio e, tal como definido na norma, os provetes foram pesados secos e então colocados num picnómetro onde foi criado o vácuo de forma a retirar o ar dos poros da rocha. A Figura 24 apresenta um picnómetro.



Figura 24: Picnómetro (LGMC).

Uma vez atingida a pressão de vácuo pretendida o provete ficou em repouso durante algum tempo. Após este período de repouso a pressão de vácuo foi mantida constante enquanto era inserida água no picnómetro, tendo sido assegurado que decorreu um espaço de tempo de pelo menos 15 minutos até ao provete ficar submerso, removendo-se em seguida a pressão de vácuo. O provete, submerso, ficou em repouso durante um dia, período após o qual, foi pesado e

novamente pesado depois de limpo com um pano húmido. A Figura 25 apresenta uma balança hidrostática capaz de realizar pesagens de amostras submersas.



Figura 25: Balança hidrostática para pesagens de provetes submersos (LGM).

Os valores recolhidos ao longo deste ensaio permitiram a realização do cálculo da porosidade aberta e massa específica aparente da rocha.

Segundo a norma, a Equação 36 foi utilizada para determinar o valor de massa volúmica aparente.

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \times \rho_{rh} \quad [36]$$

Onde:

- ρ_b : Massa volúmica aparente, kg/m^3 .
- m_d : Massa do espécime seco, kg.
- m_s : Massa do espécime saturado, kg.
- m_h : Massa do espécime submerso, kg.
- ρ_{rh} : Massa volúmica da água, kg/m^3 .

Equação 36: Determinação da massa volúmica aparente, EN 1936 (2006).

Segundo a norma, a Equação 37 foi utilizada para determinar do valor de porosidade aberta.

$$p_0 = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100 \quad [37]$$

Onde:

- p_0 : Porosidade aberta, %.
- m_s : Massa do espécime saturado, kg.
- m_d : Massa do espécime seco, kg.
- m_h : Massa do espécime submerso, kg.

Equação 37: Determinação da porosidade aberta, EN 1936 (2006).

4.4. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão não foi realizado no âmbito desta tese tendo sido utilizados os valores Tabelados pelo LNEG (<http://rop.lneg.pt/rop/index.php>), estes realizaram o ensaio segundo a norma EN-1926-2006.

A norma estipula, como requisito para a realização do ensaio, a preparação de 10 provetes, o mais homogêneos possível com arestas ou raio, no caso de provetes cúbicos ou cilíndricos respectivamente, com 50 ± 5 ou 70 ± 5 mm. Se o provete apresentar um tamanho de grão máximo superior a 5 ou 7 mm respectivamente, devem ser ensaiados mais que 10 provetes. Caso existam planos de anisotropia na rocha, estas devem ser ensaiadas perpendicularmente a estes.

O primeiro passo estipulado pela norma é a preparação dos provetes, estes devem ser secos até atingir massa constante e posteriormente mantidos num exsiccador até voltarem à temperatura ambiente. Deve então ser medida a secção transversal e altura do provete.

Tanto o provete como o equipamento devem ser limpos imediatamente antes do ensaio, uma vez completada essa tarefa o provete é então ensaiado no centro da placa de carga sendo registada a carga no momento de rotura.

A Equação 38 é utilizada para o cálculo da Resistência à compressão.

$$R = \frac{F}{A} \quad [38]$$

Onde:

- R : Resistência à compressão, MPa.
- F : Carga no momento de Rotura, kN.
- A : Area da secção transversal, mm^2 .

Equação 38: Determinação da resistência à compressão, EN-1926-06.

A Figura 26 apresenta um exemplo do equipamento utilizado na determinação da resistência à compressão.



Figura 26: Exemplo de equipamento utilizado na determinação da resistência à compressão (LGMC).

4.5. Carga pontual

Todas as amostras foram submetidas a um ensaio de carga pontual, realizado segundo o procedimento ASTM D 5731-02. Devido à necessidade de analisar a anisotropia da rocha, os provetes de Ardósia de Valongo utilizados na execução deste ensaio foram obtidos posteriormente aos provetes utilizados na execução dos restantes ensaios. Assim, e de modo a cumprir com o explicitado no procedimento, foram preparados 10 provetes para nove das 10 amostras de rocha em estudo, tendo sido preparados 20 no caso da Ardósia de Valongo, 10 com a anisotropia perpendicular ao comprimento (Ardósia de Valongo A), e 10 com a anisotropia paralela ao comprimento (Ardósia de Valongo B). Sendo cada provete marcado com um número de forma a facilitar identificação.

Todos os provetes utilizados foram inicialmente medidos, sendo confirmado que estes estavam em conformidade com todos os requisitos para a execução do ensaio em blocos, como está definido no procedimento.

Uma vez preparados os provetes estes foram colocados entre as ponteiras de forma a que as pontas fiquem no centro do espécime, a distância entre ponteiras foi registada e a pressão aumentada até a rotura do provete. Verificou-se que em todos os casos a superfície de rotura passava pelos pontos de carga, sendo assim foi registada a carga no momento de rotura para cada provete.

A Figura 27 apresenta uma imagem do equipamento utilizado para realizar o ensaio de carga pontual com um provete pronto a ensaiar.



Figura 27: Equipamento para ensaio carga pontual com provete pronto a ensaiar (LGMC).

Para o cálculo de $I_{s(50)}$, o índice de resistência à carga pontual corrigido, seguiram-se os passos detalhados no procedimento. A Equação 39 foi utilizada para determinar o valor da distância equivalente.

$$De^2 = \frac{4 \times A}{\pi} \quad [39]$$

Onde:

- De^2 : Distância entre ponteiras equivalente, mm^2 .
- A : Área do menor plano de rotura intersectando as duas ponteiras, mm^2 .
- π : Pi, adimensional.

Equação 39: Determinação da distância equivalente, ASTM D 5731-02.

A Equação 40 foi utilizada para determinar o valor do índice de resistência à carga pontual não corrigido.

$$I_s = \frac{P}{D^2} \quad [40]$$

Onde:

- I_s : Índice de resistência à carga pontual não corrigido, MPa.
- P : Carga no momento de rotura, N.
- D^2 : Espessura do provete ao quadrado, mm^2 .

Equação 40: Determinação do índice de resistência à carga pontual não corrigido, ASTM D 5731-02.

A Equação 41 foi utilizada para determinar o valor do factor de correcção de dimensão.

$$F = \left(\frac{De}{50}\right)^{0,45} \quad [41]$$

Onde:

- F : Factor de correcção de dimensão, adimensional.
- De : Raiz de distância equivalente, mm .

Equação 41: Determinação do factor de correcção de dimensão, ASTM D 5731-02.

A Equação 42 foi utilizada para determinar o valor do índice de resistência à carga pontual corrigido.

$$I_{s(50)} = F \times I_s \quad [42]$$

Onde:

- $I_{s(50)}$: Índice de resistência à carga pontual corrigido, MPa.
- F : Factor de correcção de dimensão, adimensional.
- I_s : Índice de resistência à carga pontual não corrigido, MPa.

Equação 42: Determinação do índice de resistência à carga pontual corrigido, ASTM D 5731-02.

Por fim, para efectuar o cálculo do valor médio de $I_{s(50)}$ para cada série de provetes foram removidos os dois valores maiores e os dois valores menores de $I_{s(50)}$, sendo a média calculada utilizando apenas os restantes.

4.6. Ensaio capon

Foi realizado o ensaio de desgaste com disco largo efectuado segundo a norma NP EN 14157 (2006) como representação da abrasividade dos materiais. Como tal, começou-se por preparar os provetes em conformidade com as dimensões e estado de secura delineados na norma e, verificou-se também, que a face superior dos provetes era plana, devido à necessidade de analisar a anisotropia da rocha, os provetes de Ardósia de Valongo utilizados na execução deste ensaio foram obtidos posteriormente aos provetes utilizados na execução dos restantes ensaios (Ardósia

de Valongo A e B). Imediatamente antes do início dos ensaios, os provetes foram limpos e a área de desgaste pintada da forma especificada na norma.

O ensaio consiste na colocação do provete encostado ao disco largo de desgaste, enquanto este é accionado e é derramado material abrasivo no provete durante um minuto, estando a velocidade do disco largo programada para que este execute 75 revoluções durante esse espaço de tempo. Neste caso o material abrasivo utilizado foi o corindo.

A Figura 28 apresenta o equipamento necessário para realizar o ensaio capon.



Figura 28: Equipamento necessário para realizar o ensaio capon (LGMC).

Após este período de ensaio, a corda da calote formada pelo desgaste da rocha é medida, com recurso a um paquímetro, sendo utilizado o maior valor obtido em cada provete. O resultado dessa medição é utilizado para o cálculo da corda da calote corrigida. Para obter esse valor é necessário utilizar a Equação 43.

$$C: c_0 + (20 - F) [43]$$

Onde:

- C : Valor corrigido corda da calote, mm.
- c_0 : Valor medido da corda da calote, mm.
- F : Valor de calibração do equipamento, mm.

Equação 43: Determinação da corda da calote corrigida.

Capítulo 5

Análise e interpretação de resultados de ensaios de identificação

5.1 Análise química

5.2 Composição mineralógica

5.3 Massa volúmica aparente e porosidade aberta

5.4 Resistência à compressão

5.5 Carga pontual

5.6 Capon

Apresentam-se, em seguida, os resultados obtidos dos ensaios de caracterização realizados sobre as amostras objecto deste estudo, assim como o resultado da análise estatística efectuada.

5.1. Análise química

Na análise química apenas foram analisados os elementos relevantes, os restantes são apresentados na coluna Outros. Os resultados obtidos estão dentro do que seria espectável para cada tipo de rocha. Os granitos (Cristal Azul, Amarelo Vila Real, Pedras Salgadas, e Rosa Monção), o quartzodiorito (Cinzento Favaco), e o sienito nefelínico (Cinzento Monchique) apresentam elevados valores de dióxido de silício, tendo apresentado um valor acima de 50 %, com o Granito Amarelo Vila Real a mostrar a maior percentagem desse elemento, seguido do Granito Cinzento Claro de Pedras Salgadas. Ainda para os granitos, quartzodiorito e sienito nefelínico o segundo elemento mais comum para este grupo é o óxido de alumínio, com todas as rochas a demonstrar uma percentagem do elemento superior a 10%. O quartzodiorito distingue-se ao exibir uma percentagem de óxido de ferro e óxido de cálcio superior aos demais, por sua vez o sienito nefelínico apresenta uma percentagem de óxido de sódio (8,52%) e óxido de potássio (6,06%) superior.

A amostra de Ardósia de Valongo exibe também um elevado conteúdo de dióxido de silício, 47,33%, seguida pelo óxido de alumínio que apresenta 21,60%. Por sua vez, a amostra de Verde Donai apresenta uma percentagem de dióxido de silício já mais reduzida 38,85%, no entanto apresenta a maior percentagem de óxido de magnésio.

Quanto ao calcário (Moleanos Macio) e o Calcário Cristalino (Branco Rosado) estes apresentam uma composição química bastante similar como seria de esperar, exibindo mais de 50% de óxido de cálcio.

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise química efectuada sobre as amostras.

Tabela 2: Resultados da análise química (valores em %) (adaptado de Spínola, 2015).

	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	Outros (%)	Total (%)
Cristal Azul	68,71	11,68	1,75	0,03	1,07	1,68	3,61	4,08	0,24	0,17	9,33	100
Amarelo Vila Real	70,62	12,40	1,44	0,02	0,17	0,75	3,45	4,41	0,18	0,57	7,79	100
Pedras Salgadas	70,28	10,88	1,68	0,05	0,41	2,46	3,75	4,92	0,16	0,11	7,42	100
Cinzento Favaco	51,21	13,64	8,73	0,14	2,41	8,26	3,54	1,34	2,50	0,72	9,33	100
Rosa Monção	69,55	11,82	2,86	0,05	0,38	1,79	3,67	4,19	0,23	0,20	7,31	100
Cinzento Monchique	52,65	18,01	3,29	0,09	0,47	1,72	8,52	6,06	0,30	0,07	13,32	100
Moleanos Macio	0,82	0,23	0,06	0,01	0,00	57,54	0,07	0,00	0,00	0,00	41,45	100
Ardósia de Valongo	47,33	21,60	11,46	0,10	1,92	1,46	1,43	2,79	0,71	0,14	12,92	100
Verde Donai	38,85	1,94	8,26	0,07	24,33	0,80	0,11	0,09	0,11	0,07	29,61	100
Branco Rosado	1,71	0,51	0,12	0,02	0,89	57,00	0,05	0,16	0,00	0,00	40,04	100

5.2. Composição mineralógica

Na análise da composição mineralógica das amostras apenas foram analisados os elementos relevantes, os restantes são apresentados na coluna “Outros”.

Esta análise mostra que temos 3 amostras que podem ser consideradas mono-minerais, ou quase mono-minerais, é o caso da amostra de Moleanos macio, que apresenta 100% de calcite, a amostra de Branco Rosado que apresenta 94% de calcite, e alguns vestígios de outros minerais em particular dolomite, e por fim a amostra de Verde Donai que apresenta uma constituição com 98% de dolomite, e apenas 2% de cloritóide + clorite.

A Ardósia de Valongo já começa a diversificar a sua composição apresentando 66% de mica, ainda assim um número elevado como seria de esperar para uma ardósia.

Aqui, ao contrário da análise química são visíveis diferenças marcadas entre os granitos, o quartzodiorito e o sienito nefelínico. No caso dos granitos (Cristal Azul, Amarelo Vila Real, Pedras salgadas e Rosa Monção) estes apresentam percentagens significativas de quartzo, entre 20% no caso de Cristal Azul e 27% no caso de Amarelo Vila Real, e microclina, entre 32% no caso de Amarelo Vila Real e 36% no caso de Pedras Salgadas. Os granitos também apresentam

valores elevados de oligóclase, excepto no caso da amostra de Amarelo Vila Real onde esse mineral parece ter sido substituído por plagióclase na composição da rocha.

Por sua vez o quartzodiorito (Cinzento Favaco) apresenta mais de 50% de plagióclase com horneblenda como o mineral complementar.

Por fim, o Sienito Nefelínico apresenta na sua composição elevadas quantidades de Feldspato K, 46%, e nefelina, 20%.

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise da composição mineralógica efectuada sobre as amostras.

Tabela 3: Resultados da análise da composição mineralógica das Rochas (valores em %), (adaptado de Spínola, 2015).

	Cristal Azul	Amarelo Vila Real	Pedras Salgadas	Cinzento Favaco	Rosa Monção	Cinzento Monchique	Moleanos Macio	Ardósia de Valongo	Verde Donai	Branco Rosado
Calcite (%)	0	0	0	0	0	0	100	0	0	94
Mica (%)	0	0	0	0	0	0	0	66	0	0
Microclina (%)	35	32	36	0	34	0	0	0	0	0
Quartzo (%)	20	27	25	8	26	0	0	4	0	1
Plagióclase (%)	0	26	0	56	0	0	0	0	0	0
Anfíbola (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Moscovite (%)	0	11	0	14	0	0	0	0	0	0
Oligóclase (%)	25	3	32	0	28	0	0	0	0	0
Biotite (%)	16	0	6	0	9	8	0	0	0	0
Horneblenda (%)	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0
Feldspato K (%)	0	0	0	0	0	46	0	5	0	0
Nefelina (%)	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0
Aegirina e Aegirina-Augite (%)	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0
Esfena (%)	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0
Cloritóide + Clorite (%)	0	0	0	0	0	0	0	25	2	0
Serpentina (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	98	0
Dolomite (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Piroxenas (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Outros (%)	4	1	1	3	3	6	0	0	0	1
Total (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

5.3. Resistência à compressão

Os valores médios de resistência à compressão apresentam algumas curiosidades, nomeadamente o granito Amarelo Vila Real, o qual apresenta a resistência à compressão mais reduzida de todas as amostras, enquanto o Verde Donai apresenta a maior. No que diz respeito aos granitos, o Pedras Salgadas apresenta a maior resistência por uma larga margem. Como seria de esperar entre o Moleanos Macio e o Branco Rosado, o segundo é o que apresenta maior resistência à compressão, embora a diferença não seja muito significativa.

A Tabela 4 apresenta os valores médios recolhidos de resistência à compressão para as rochas estudadas.

Tabela 4: Valores médios de resistência à compressão (adaptado de <http://rop.lneg.pt/rop/index.php>, 15/04/2014).

	Cristal Azul	Amarelo Vila Real	Pedras Salgadas	Cinzento Favaco	Rosa Monção	Cinzento Monchique	Moleanos Macio	Ardósia de Valongo	Verde Donai	Branco Rosado
Resistência à compressão (kg/cm ²)	1650	830	2260	1260	1420	1060	920	1910	2795	970

5.4. Massa volúmica e porosidade aberta

No que diz respeito à porosidade aberta verificou-se que todas as rochas apresentam porosidades reduzidas com a exceção do Moleanos Macio, o qual apresenta a maior porosidade de todas as amostras, por outro lado o Verde Donai apresenta a menor.

Quanto à massa volúmica aparente, a Ardósia de Valongo apresenta o maior valor enquanto o Moleanos Macio o menor, resultado certamente impulsionado pela elevada porosidade do material.

A Tabela 5 apresenta os resultados dos ensaios de determinação de massa volúmica e porosidade aberta realizados sobre as amostras.

Tabela 5: Valores de massa volúmica e porosidade aberta das rochas estudadas, (adaptado de Spínola, 2015).

	Cristal Azul	Amarelo Vila Real	Pedras Salgadas	Cinzento Favaco	Rosa Monção	Cinzento Monchique	Moleanos Macio	Ardósia de Valongo	Verde Donai	Branco Rosado
Porosidade aberta (%)	0,39	1,92	0,82	0,44	0,97	0,70	8,68	1,14	0,29	0,32
Massa volúmica aparente (kg/mm²)	2,66	2,67	2,56	2,55	2,61	2,55	2,41	2,81	2,79	2,68

5.5. Carga pontual

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos através dos ensaios de carga pontual efectuados sobre as amostras.

Tabela 6: Resultados do ensaio de determinação da resistência à carga pontual.

		Comprimento (mm)	L met. comp. (mm)	W largura (mm)	D espessura (mm)	Carga de Rotura (KN)	Valor médio resistência à Carga Pontual	A (mm ²)	De ² (mm ²)	Is (N/mm ²)	F	Is(50) (N/mm ²)	Is(50) médio
Cristal Azul	1	123,5	61,8	50,0	21,0	13	13,10	1050,00	1336,90	29,48	0,87	25,61	26,59
	2	123,0	61,5	50,0	21,0	13		1050,00	1336,90	29,48	0,87	25,61	
	3	122,0	61,0	50,0	21,0	15		1050,00	1336,90	34,01	0,87	29,55*	
	4	123,0	61,5	50,0	21,0	13		1050,00	1336,90	29,48	0,87	25,61	
	5	123,5	61,8	50,0	21,0	10		1050,00	1336,90	22,68	0,87	19,70*	
	6	124,0	62,0	50,0	21,0	14		1050,00	1336,90	31,75	0,87	27,58	
	7	124,0	62,0	50,0	21,0	14		1050,00	1336,90	31,75	0,87	27,58	
	8	124,0	62,0	50,0	21,0	10		1050,00	1336,90	22,68	0,87	19,70*	
	9	125,0	62,5	50,0	21,0	15		1050,00	1336,90	34,01	0,87	29,55*	
	10	125,0	62,5	50,0	21,0	14		1050,00	1336,90	31,75	0,87	27,58	
Amarelo Vila Real	1	121,0	60,5	51,0	18,0	7	9,90	918,00	1168,83	21,60	0,84	18,21*	24,64
	2	122,0	61,0	51,0	19,0	9		969,00	1233,77	24,93	0,85	21,27	
	3	123,0	61,5	51,0	18,5	11		943,50	1201,30	32,14	0,85	27,25	
	4	121,0	60,5	51,0	18,0	11		918,00	1168,83	33,95	0,84	28,61*	
	5	122,5	61,3	51,0	18,0	11		918,00	1168,83	33,95	0,84	28,61	
	6	124,0	62,0	51,0	19,0	9		969,00	1233,77	24,93	0,85	21,27	
	7	126,0	63,0	51,0	18,0	14		918,00	1168,83	43,21	0,84	36,42*	
	8	126,0	63,0	51,0	18,0	9		918,00	1168,83	27,78	0,84	23,41	
	9	125,0	62,5	51,0	18,0	10		918,00	1168,83	30,86	0,84	26,01	
	10	124,0	62,0	51,0	18,5	8		943,50	1201,30	23,37	0,85	19,82*	

*:Os valores escritos a vermelho e marcados com um asterisco são os dois valores maiores e menores da respectiva série.

Tabela 6(cont.): Resultados do ensaio de determinação da resistência à carga pontual.

		Comprimento (mm)	L met. comp. (mm)	W largura (mm)	D espessura (mm)	Carga de Rotura (KN)	Valor médio resistência à Carga Pontual	A (mm ²)	De ² (mm ²)	Is (N/mm ²)	F	Is(50) (N/mm ²)	Is(50) médio
Pedras Salgadas	1	125,0	62,5	49,0	20,0	22	19,50	980,00	1247,77	55,00	0,86	47,04*	41,13
	2	121,0	60,5	49,0	20,0	20		980,00	1247,77	50,00	0,86	42,76	
	3	126,0	63,0	49,0	21,0	19		1029,00	1310,16	43,08	0,86	37,25	
	4	120,0	60,0	49,0	20,0	18		980,00	1247,77	45,00	0,86	38,49	
	5	123,0	61,5	49,0	20,0	20		980,00	1247,77	50,00	0,86	42,76	
	6	122,0	61,0	49,0	20,0	22		980,00	1247,77	55,00	0,86	47,04*	
	7	121,5	60,8	49,0	21,0	17		1029,00	1310,16	38,55	0,86	33,33*	
	8	126,0	63,0	49,0	20,0	21		980,00	1247,77	52,50	0,86	44,90	
	9	125,0	62,5	49,0	20,0	17		980,00	1247,77	42,50	0,86	36,35*	
	10	127,0	63,5	49,0	20,0	19		980,00	1247,77	47,50	0,86	40,62	
Cinzento Favaco	1	123,0	61,5	51,0	20,0	19	18,00	1020,00	1298,70	47,50	0,86	40,99	38,83
	2	124,0	62,0	51,0	20,0	17		1020,00	1298,70	42,50	0,86	36,68	
	3	123,0	61,5	51,0	20,0	19		1020,00	1298,70	47,50	0,86	40,99	
	4	122,0	61,0	51,0	20,0	18		1020,00	1298,70	45,00	0,86	38,83	
	5	123,0	61,5	51,0	20,0	16		1020,00	1298,70	40,00	0,86	34,52*	
	6	124,0	62,0	51,0	20,0	19		1020,00	1298,70	47,50	0,86	40,99*	
	7	125,0	62,5	51,0	20,0	23		1020,00	1298,70	57,50	0,86	49,62*	
	8	123,0	61,5	51,0	20,0	17		1020,00	1298,70	42,50	0,86	36,68	
	9	123,0	61,5	51,0	20,0	14		1020,00	1298,70	35,00	0,86	30,20*	
	10	122,0	61,0	51,0	20,0	18		1020,00	1298,70	45,00	0,86	38,83	

*:Os valores escritos a vermelho e marcados com um asterisco são os dois valores maiores e menores da sua respectiva série.

Tabela 6(cont.): Resultados do ensaio de determinação da resistência à carga pontual.

		Comprimento (mm)	L met. comp. (mm)	W largura (mm)	D espessura (mm)	Carga de Rotura (KN)	Valor médio resistência à Carga Pontual	A (mm ²)	De ² (mm ²)	Is (N/mm ²)	F	Is(50) (N/mm ²)	Is(50) médio
Rosa Monção	1	124,5	62,3	49,0	21,0	11	15,60	1029,00	1310,16	24,94	0,86	21,57*	31,05
	2	122,0	61,0	49,0	21,0	14		1029,00	1310,16	31,75	0,86	27,45	
	3	122,5	61,3	49,0	21,0	15		1029,00	1310,16	34,01	0,86	29,41	
	4	123,0	61,5	49,0	21,0	20		1029,00	1310,16	45,35	0,86	39,22*	
	5	124,0	62,0	49,0	21,0	18		1029,00	1310,16	40,82	0,86	35,29	
	6	124,5	62,3	49,0	21,0	18		1029,00	1310,16	40,82	0,86	35,29	
	7	123,5	61,8	49,0	21,0	13		1029,00	1310,16	29,48	0,86	25,49	
	8	125,0	62,5	49,0	21,0	12		1029,00	1310,16	27,21	0,86	23,53*	
	9	123,0	61,5	49,0	21,0	17		1029,00	1310,16	38,55	0,86	33,33	
	10	122,0	61,0	49,0	21,0	18		1029,00	1310,16	40,82	0,86	35,29*	
Cinzento Monchique	1	123,0	61,5	49,0	19,0	17	17,80	931,00	1185,39	47,09	0,85	39,81	39,93
	2	123,5	61,8	48,5	20,0	18		970,00	1235,04	45,00	0,85	38,40	
	3	125,0	62,5	49,0	20,0	22		980,00	1247,77	55,00	0,86	47,04*	
	4	124,0	62,0	49,0	19,0	18		931,00	1185,39	49,86	0,85	42,15	
	5	123,5	61,8	49,5	20,0	18		990,00	1260,51	45,00	0,86	38,57	
	6	121,5	60,8	48,0	20,0	14		960,00	1222,31	35,00	0,85	29,80*	
	7	121,0	60,5	49,0	19,0	22		931,00	1185,39	60,94	0,85	51,52*	
	8	121,0	60,5	50,0	20,0	19		1000,00	1273,24	47,50	0,86	40,81	
	9	122,0	61,0	49,5	20,0	13		990,00	1260,51	32,50	0,86	27,86*	
	10	123,0	61,5	49,0	19,0	17		931,00	1185,39	47,09	0,85	39,81	

*:Os valores escritos a vermelho e marcados com um asterisco são os dois valores maiores e menores da sua respectiva série.

Tabela 6(cont.): Resultados do ensaio de determinação da resistência à carga pontual.

		Comprimento (mm)	L met. comp. (mm)	W largura (mm)	D espessura (mm)	Carga de Rotura (KN)	Valor médio resistência à Carga Pontual	A (mm ²)	De ² (mm ²)	Is (N/mm ²)	F	Is(50) (N/mm ²)	Is(50) médio
Moleanos Macio	1	122,0	61,0	49,0	20,0	14	12,80	980,00	1247,77	35,00	0,86	29,93	28,45
	2	123,0	61,5	49,5	19,0	12		940,50	1197,48	33,24	0,85	28,17	
	3	123,0	61,5	49,5	19,0	12		940,50	1197,48	33,24	0,85	28,17	
	4	123,0	61,5	49,0	20,0	11		980,00	1247,77	27,50	0,86	23,52*	
	5	122,0	61,0	49,0	19,0	13		931,00	1185,39	36,01	0,85	30,45	
	6	123,0	61,5	49,5	19,0	15		940,50	1197,48	41,55	0,85	35,21*	
	7	124,0	62,0	49,0	20,0	11		980,00	1247,77	27,50	0,86	23,52	
	8	124,0	62,0	49,0	19,0	13		931,00	1185,39	36,01	0,85	30,45	
	9	123,0	61,5	49,5	19,0	16		940,50	1197,48	44,32	0,85	37,56*	
	10	124,0	62,0	49,0	20,0	11		980,00	1247,77	27,50	0,86	23,52*	
Ardósia Valongo A	1	130,0	65,0	50,0	20,0	9	11,10	1000,00	1273,24	22,50	0,86	19,33*	23,27
	2	130,0	65,0	50,0	20,0	12		1000,00	1273,24	30,00	0,86	25,77	
	3	130,0	65,0	50,0	20,0	10		1000,00	1273,24	25,00	0,86	21,48	
	4	130,0	65,0	50,0	20,0	10		1000,00	1273,24	25,00	0,86	21,48	
	5	130,0	65,0	50,0	20,0	10		1000,00	1273,24	25,00	0,86	21,48	
	6	130,0	65,0	50,0	20,0	12		1000,00	1273,24	30,00	0,86	25,77	
	7	130,0	65,0	50,0	20,0	11		1000,00	1273,24	27,50	0,86	23,63	
	8	130,0	65,0	50,0	20,0	10		1000,00	1273,24	25,00	0,86	21,48*	
	9	130,0	65,0	50,0	20,0	12		1000,00	1273,24	30,00	0,86	25,77*	
	10	130,0	65,0	50,0	20,0	15		1000,00	1273,24	37,50	0,86	32,22*	

*:Os valores escritos a vermelho e marcados com um asterisco são os dois valores maiores e menores da sua respectiva série.

Tabela 6(cont.): Resultados do ensaio de determinação da resistência à carga pontual.

		Comprimento (mm)	L met. comp. (mm)	W largura (mm)	D espessura (mm)	Carga de Rotura (KN)	Valor médio resistência à Carga Pontual	A (mm ²)	De ² (mm ²)	Is (N/mm ²)	F	Is(50) (N/mm ²)	Is(50) médio
Ardósia Valongo B	1	130,0	65,0	50,0	20,0	11	11,90	1000,00	1273,24	27,50	0,86	23,63	25,06
	2	130,0	65,0	50,0	20,0	11		1000,00	1273,24	27,50	0,86	23,63	
	3	130,0	65,0	50,0	20,0	13		1000,00	1273,24	32,50	0,86	27,92*	
	4	130,0	65,0	50,0	20,0	12		1000,00	1273,24	30,00	0,86	25,77	
	5	130,0	65,0	50,0	20,0	11		1000,00	1273,24	27,50	0,86	23,63*	
	6	130,0	65,0	50,0	20,0	14		1000,00	1273,24	35,00	0,86	30,07*	
	7	130,0	65,0	50,0	20,0	12		1000,00	1273,24	30,00	0,86	25,77	
	8	130,0	65,0	50,0	20,0	12		1000,00	1273,24	30,00	0,86	25,77	
	9	130,0	65,0	50,0	20,0	12		1000,00	1273,24	30,00	0,86	25,77	
	10	130,0	65,0	50,0	20,0	11		1000,00	1273,24	27,50	0,86	23,63*	
Verde Donai	1	122,0	61,0	50,0	18,0	19	19,90	900,00	1145,92	58,64	0,84	49,20	49,70
	2	122,5	61,3	50,0	18,5	20		925,00	1177,75	58,44	0,84	49,33	
	3	124,0	62,0	50,0	18,0	19		900,00	1145,92	58,64	0,84	49,20	
	4	125,5	62,8	50,0	18,5	23		925,00	1177,75	67,20	0,84	56,73*	
	5	125,0	62,5	50,0	18,5	19		925,00	1177,75	55,51	0,84	46,87	
	6	124,0	62,0	50,0	18,0	16		900,00	1145,92	49,38	0,84	41,43*	
	7	123,0	61,5	50,0	18,5	20		925,00	1177,75	58,44	0,84	49,33	
	8	125,0	62,5	50,0	18,0	27		900,00	1145,92	83,33	0,84	69,92*	
	9	125,5	62,8	50,0	18,5	14		925,00	1177,75	40,91	0,84	34,53*	
	10	122,0	61,0	50,0	18,5	22		925,00	1177,75	64,28	0,84	54,27	

*:Os valores escritos a vermelho e marcados com um asterisco são os dois valores maiores e menores da sua respectiva série.

Tabela 6(cont.): Resultados do ensaio de determinação da resistência à carga pontual.

		Comprimento (mm)	L met. comp. (mm)	W largura (mm)	D espessura (mm)	Carga de Rotura (KN)	Valor médio resistência à Carga Pontual	A (mm ²)	De ² (mm ²)	Is (N/mm ²)	F	Is(50) (N/mm ²)	Is(50) médio
Branco Rosado	1	122,0	61,0	49,0	19,0	5	7,90	931,00	1185,39	13,85	0,85	11,71*	18,74
	2	124,5	62,3	49,0	19,0	6		931,00	1185,39	16,62	0,85	14,05	
	3	125,0	62,5	49,0	19,0	5		931,00	1185,39	13,85	0,85	11,71*	
	4	124,0	62,0	49,0	19,0	10		931,00	1185,39	27,70	0,85	23,42	
	5	122,0	61,0	49,0	19,0	11		931,00	1185,39	30,47	0,85	25,76*	
	6	121,0	60,5	49,0	19,0	9		931,00	1185,39	24,93	0,85	21,08	
	7	122,5	61,3	49,0	19,0	6		931,00	1185,39	16,62	0,85	14,05	
	8	126,0	63,0	49,0	19,0	9		931,00	1185,39	24,93	0,85	21,08	
	9	125,0	62,5	49,0	19,0	8		931,00	1185,39	22,16	0,85	18,74	
	10	122,5	61,3	49,0	19,0	10		931,00	1185,39	27,70	0,85	23,42*	

*: Os valores escritos a vermelho e marcados com um asterisco são os dois valores maiores e menores da sua respectiva série.

No que diz respeito ao ensaio da resistência à carga pontual pudemos observar algum paralelismo entre estes resultados e os valores da resistência à compressão média e, mais uma vez, o grupo dos granitos (Cristal Azul, Amarelo Vila Real, Pedras Salgadas e Rosa Monção) apresentam resultados bastante variados, com a amostra Amarelo Vila Real a apresentar a terceira pior resistência à carga pontual, e a amostra de Pedras Salgadas a apresentar o segundo maior valor.

O melhor resultado neste ensaio foi obtido pela amostra de Verde Donai algo que já seria de esperar, visto que esta tinha o maior valor de resistência à compressão médio, enquanto o pior resultado foi verificado no caso da amostra de Branco Rosado que já tinha apresentado um valor de resistência à compressão médio bastante baixo.

Por fim, a amostra de Cinzento Favaco apresentou um resultado neste ensaio bastante comparável à amostra de Pedras Salgadas, no entanto o seu valor de resistência à compressão médio é bastante inferior. Das duas amostras de Ardósia de Valongo a que apresentou maior resistência foi a Ardósia de Valongo A, como seria de esperar, já que a superfície de fractura foi mais extensa que a verificada no caso da Ardósia de Valongo B.

A Figura 29 apresenta o estado dos provetes após serem submetidos ao ensaio de carga pontual demonstrando a validade de todos os ensaios.

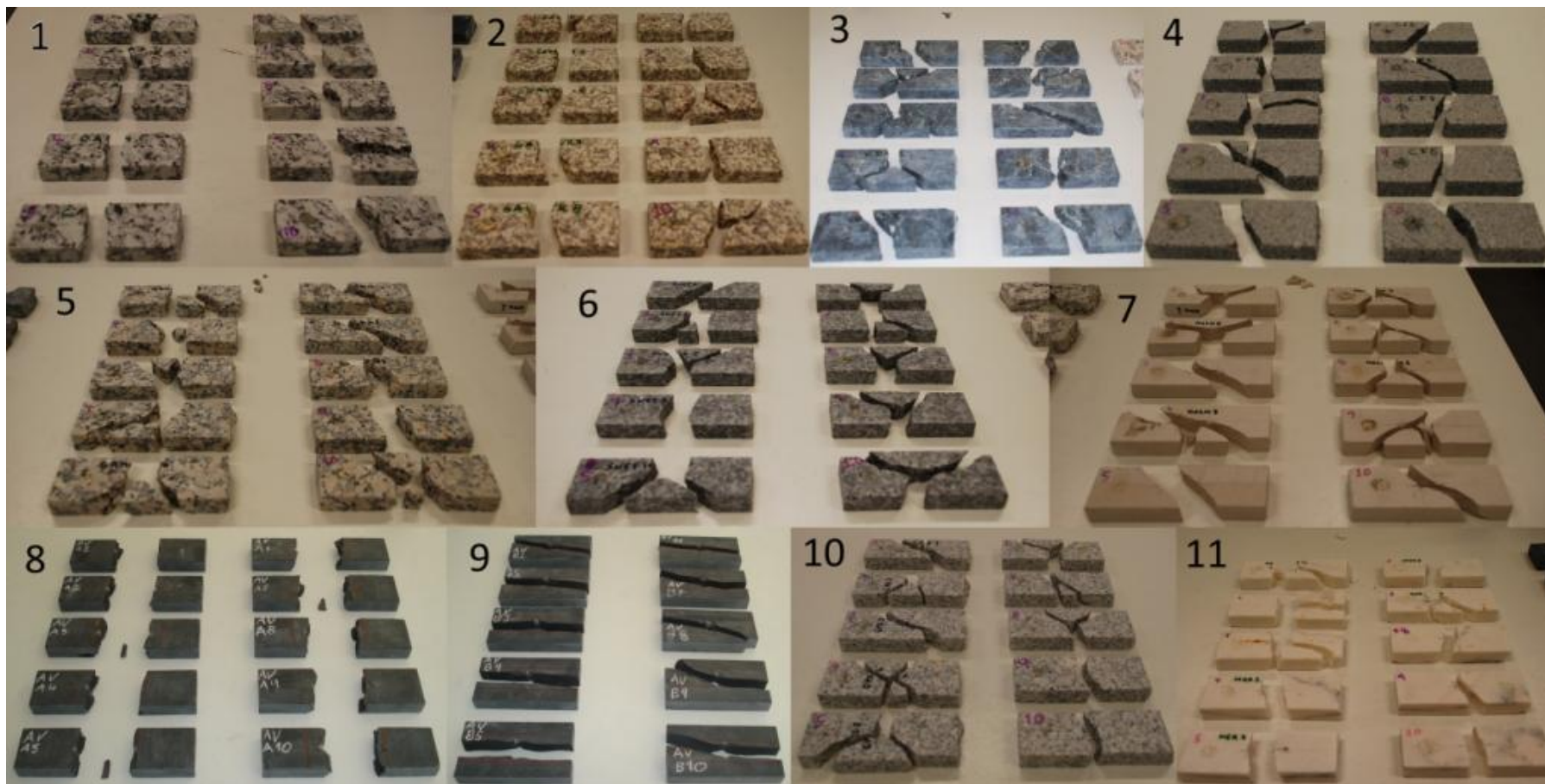


Figura 29: Provetes após submetidos ao ensaio de carga pontual.

*1:Cristal Azul 2:Amarelo Vila Real 3:Verde Donai 4:Cinzeno Favaco 5:Rosa Monção 6:Cinzeno Monchique 7:Moleanos Macio
8: Ardósia de Valongo A 9: Ardósia de Valongo B 10: Pedras Salgadas 11:Branco Rosado

5.6. Ensaio capon

Ao analisar os resultados foi possível verificar que o ensaio capon é mais um ensaio ligado às propriedades físicas dos materiais e segue as mesmas tendências gerais que temos vindo a verificar até agora, com a amostra de Amarelo Vila Real a apresentar o maior desgaste de entre os granitos e, a amostra de Pedras Salgadas, o menor, em conjunto com o Rosa Monção. O Verde Donai mais uma vez apresenta-se uma rocha bastante resistente.

Neste caso, as amostras de Ardósia de Valongo A e B apresentaram os dois piores resultados devido à estrutura foliada da rocha que certamente é vulnerável a este tipo de desgaste.

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos através dos ensaios de desgaste com disco largo efectuados sobre as amostras.

Tabela 7: Resultados obtidos com o ensaio capon.

	Corda da Calote (mm)	Valor de Calibração (mm)	Resultado não Arredondado (mm)	Resultado do Ensaio (mm)
Cristal Azul	19,93	19,6	20,330	20,5
Amarelo Vila Real	21,65	19,6	22,050	22,0
Pedras Salgadas	18,16	19,6	18,560	18,5
Cinzento Favaco	20,20	19,6	20,600	20,5
Rosa Monção	18,06	19,6	18,460	18,5
Cinzento Monchique	18,79	19,6	19,190	19,0
Moleanos Macio	27,35	19,6	27,750	28,0
Ardósia de Valongo A	39,17	19,6	39,570	39,5
Ardósia de Valongo B	38,32	19,6	38,720	38,5
Verde Donai	19,27	19,6	19,670	19,5
Branco Rosado	26,30	19,6	26,700	26,5

A Figura 30 apresenta os provetes utilizados na realização do ensaio capon, após a execução do ensaio.

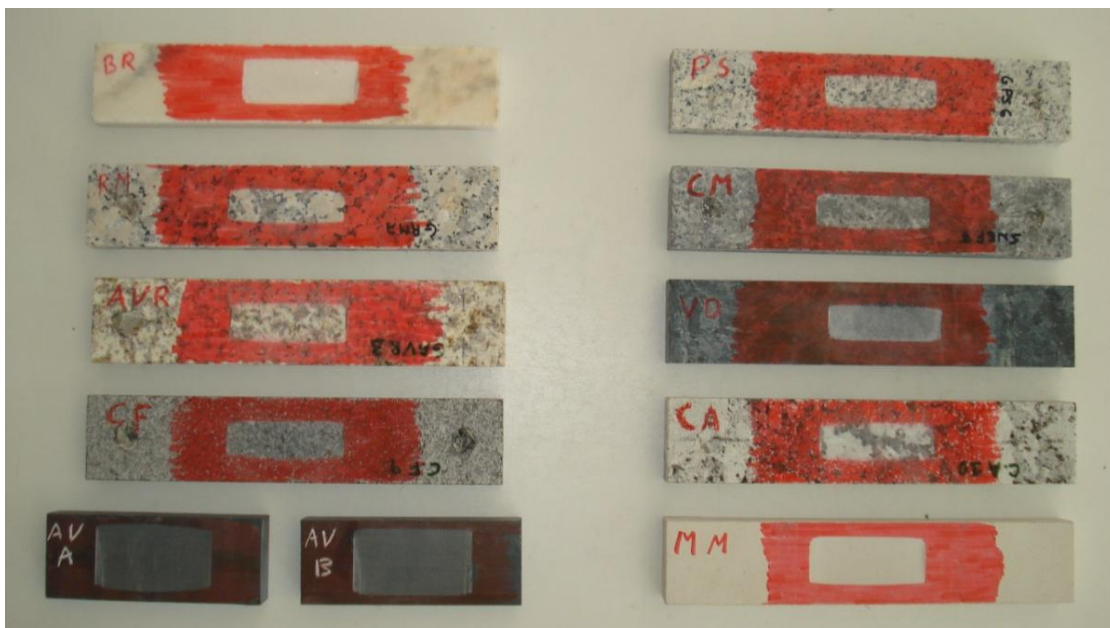


Figura 30: Provetes capon (após ensaio).

Capítulo 6

Análise Estatística

6.1 Recolha de Valores *Work Index*

6.2 Análise de componentes principais

6.3 Regressão simples e múltipla

6.3.1 Análise de regressão linear simples

6.3.2 Análise de regressão linear múltipla

Entendeu-se realizar, numa primeira fase, uma análise multivariada com o intuito de tentar compreender a relação entre as variáveis e, caso se verificasse que estas tinham influência sobre o *Work Index*, quais delas teriam maior influência sobre os valores estimados do referido parâmetro para os materiais em estudo.

Numa segunda fase, efectuou-se uma regressão múltipla na tentativa de obter um modelo matemático para estimar o valor de *Work Index*, recorrendo às variáveis físicas para a criação de um modelo inicial e, posteriormente, considerando a inclusão das restantes variáveis como variáveis *dummy* (representações de variáveis adimensionais), caso possível.

Assim, no sentido de executar a primeira fase, realizou-se uma análise em componentes principais, a qual considerou as propriedades mineralógicas, químicas e físicas das amostras em estudo e, tal como se referiu previamente, pretende-se com esta técnica obter uma breve descrição das estruturas relacionais eventualmente presentes no conjunto de dados em estudo.

Doravante, as variáveis *Work Index*, porosidade aberta, massa volúmica, resistência à carga pontual, resistência à compressão, e capon serão referidas pelos respectivos nomes ou pelas referências WI, PA, MV, RP, RC e CP, respectivamente.

De igual forma, o método Análise em Componentes Principais será referido pelo seu nome ou pelo acrónimo ACP.

6.1. Recolha de Valores *Work Index*

Para realizar a ACP e os trabalhos subsequentes de regressão foi necessário obter valores do *Work Index* para as amostras e, tal como já referido, os valores foram obtidos através de pesquisa bibliográfica.

Os valores de *Work Index* adoptados consistem na média aritmética de todos os valores recolhidos para a amostra, tendo igual peso valores que referem apenas a um teste e valores recolhidos que já eram eles próprios um valor médio.

No caso dos valores referentes às amostras de Verde Donai foi impossível obter valores de *Work Index* de serpentinite, no entanto, tendo verificado através da análise mineralógica que a rocha era composta por 98% de serpentina foram utilizados valores de *Work Index* encontrados para este mineral.

A maioria dos valores utilizados foram obtidos através do ensaio de Bond realizado em moinhos de bolas, no entanto valores obtidos recorrendo ao teste realizado em moinhos de varas também foram considerados uma vez que “... o valor de *Work Index* obtido através dele também pode ser aplicado nos estágios de moagem mais grosseiros dos moinhos de bolas” (Weiss, 1985)

No caso dos granitos, e como não foi possível obter resultados discriminados para o valor das diferentes amostras, optou-se por reuni-los numa única categoria, juntando as amostras Cristal Azul, Amarelo Vila Real, Pedra Salgadas, e Rosa Monção. Como não foi possível obter valores de *Work Index* para quartzodioritos e estas rochas apresentam propriedades similares ao granito a amostra Cinzento Favaco também foi incluída neste grupo. O mesmo foi feito com os resultados dos ensaios de caracterização a que foram submetidas estas amostras.

A Tabela 8 apresenta o resultado da pesquisa bibliográfica desenvolvida com o intuito de determinar valores médios de WI para as Rochas em estudo.

Tabela 8: Valores de WI obtidos através de pesquisa bibliográfica.

<i>Work Index</i>	Ozkahraman, 2005 (kWh/t)	Deniz & Ozdag, 2003 (kWh/t)	Csóke et al., 2013 (kWh/t)	Tavares & Kallemback, 2013 (kWh/t)	Aksani & Sönmez, 2000 (kWh/t)	Abouzeid & Negm, 2014 (kWh/t)	Cooper et al., 2012 (kWh/t)	Hiroaki Masuda, 2006 (kWh/t)
Verde Donai								
Branco Rosado	9,54							
Moleanos Macio	20,24	9,55	11,50	7,21	12,15		11,61*	12,54*
Granito							14,39*	15,05*
Ardósia de Valongo								14,30*
Cinzento Monchique						26,20		
	Mucsi, 2008 (kWh/t)	Olatunji & Durojaiye 2010 (kWh/t)	Doering International, 05/08/2015 (kWh/t)	O'Connor et al., 2001 (kWh/t)	Stamboliadis et al., 2011 (kWh/t)	Tenova, 17/03/2015 (kWh/t)	Weiss, 1985 (kWh/t)	
Verde Donai				10,70	25,70			
Branco Rosado		11,37	8,00*		9,95			
Moleanos Macio	10,84		14,00*	11,60	7,70	14,00*	8,84*	
Granito		13,51	11,00*			16,50*	8,84*	
Ardósia de Valongo			16,00*			16,00*		
Cinzento Monchique								

*: Valores médios para a rocha

6.2. Análise de componentes principais

Para efectuar a análise em componentes principais devemos começar por autoescalonar os dados utilizando a média e desvio padrão de cada variável, neste caso as propriedades das amostras. Uma vez autoescalonados os dados são trabalhados de forma a confirmar a Equação 44.

$$X = TL^T + E$$

Onde:

- X : Matriz de dados.
- T : Matriz dos escores.
- L^T : Matriz dos pesos transposta.
- E : Matriz dos resíduos.

Equação 44: Equação matricial da análise de componentes principais.

A partir daqui é possível calcular os componentes principais um a um, sendo cada um correspondente á direcção em que se explica mais variabilidade da amostra em ordem decrescente.

Caso se considere que a variância acumulada pelos componentes principais já gerados é suficiente é possível parar a simulação antes do número de componentes principais atingir o número máximo, o número de variáveis em estudo. (Lyra et al., 2010)

Apresenta-se na Tabela 9 alguns estatísticos básicos (mínimo, máximo, média e desvio padrão) relativos às propriedades das amostras em avaliação neste estudo.

Tabela 9: Estatísticos básicos relativos às propriedades das amostras em avaliação neste estudo.

Variável	Observações	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Calcite (%)	6	0,000	100,000	32,333	50,127
Mica (%)	6	0,000	66,000	11,000	26,944
Microclina (%)	6	0,000	27,400	4,567	11,186
Quartzo (%)	6	0,000	21,200	4,367	8,391
Plagioclase (%)	6	0,000	16,400	2,733	6,695
Moscovite (%)	6	0,000	5,000	0,833	2,041
Oligoclase (%)	6	0,000	17,600	2,933	7,185
Biotite (%)	6	0,000	8,000	2,367	3,710
Horneblenda (%)	6	0,000	3,800	0,633	1,551
Feldspato K (%)	6	0,000	46,000	8,500	18,480
Nefelina (%)	6	0,000	20,000	3,333	8,165
Aegirina e aegirina-augite (%)	6	0,000	12,000	2,000	4,899
Esfena (%)	6	0,000	8,000	1,333	3,266

Cloritóide + clorite (%)	6	0,000	25,000	4,500	10,075
Serpentina (%)	6	0,000	98,000	16,333	40,008
Dolomite (%)	6	0,000	4,000	0,667	1,633
SiO ₂ (%)	6	0,820	64,871	34,371	26,999
Al ₂ O ₃ (%)	6	0,230	21,595	9,023	9,455
Fe ₂ O ₃ (%)	6	0,060	11,455	4,402	4,570
MnO (%)	6	0,010	0,100	0,057	0,037
MgO (%)	6	0,000	24,325	4,746	9,613
CaO (%)	6	0,795	57,535	20,239	28,691
Na ₂ O (%)	6	0,050	8,520	2,286	3,341
K ₂ O (%)	6	0,000	6,055	2,134	2,489
TiO ₂ (%)	6	0,000	0,705	0,293	0,317
P ₂ O ₅ (%)	6	0,000	0,345	0,104	0,129
<i>Work Index</i> (%)	6	9,717	26,200	15,740	5,911
Porosidade aberta (%)	6	0,290	8,680	2,006	3,286
Massa volúmica aparente (%)	6	2,408	2,811	2,641	0,151
Resistência à carga pontual (%)	6	18,740	49,700	32,239	11,188
Resistência à compressão (%)	6	920,000	2795,000	1523,167	728,431
Ensaio capon (%)	6	19,000	39,000	25,333	7,718

Pretendeu-se, também, verificar quais as variáveis que eventualmente apresentam maior influência relativamente ao parâmetro *Work Index*. A Tabela 10 apresenta a matriz de correlação Pearson para as variáveis em estudo.

Assim, a matriz de correlação de Pearson permitiu verificar que existe correlação com algum significado entre o *Work Index* e a calcite e CaO (negativa) e com a biotite, o feldspato K, a nefelina, a aegirina e aegirina-augite, o MnO, o Na₂O, o K₂O e a resistência à carga pontual (positiva) (Tabela 10).

Tabela 10: Matriz de correlação Pearson para as variáveis em estudo.

Variáveis	Calcite	Mica	Microclina	Quartzo	Plagioclase	Moscovite	Oligoclase	Biotite	Horneblenda	Feldspato K	Nefelina	Aegirina e aegirina-augite	Esfena	Cloritóide + clorite	Serpentina	Dolomite	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	WI	PA	MV	RP	RC	CP
Calcite	1	-0.316	-0.316	-0.358	-0.316	-0.316	-0.316	-0.494	-0.316	-0.356	-0.316	-0.316	-0.316	-0.346	-0.316	0.603	-0.950	-0.709	-0.730	-0.899	-0.347	0.999	-0.516	-0.640	-0.715	-0.625	-0.647	0.618	-0.525	-0.588	-0.615	0.195
Mica	-0.316	1	-0.200	-0.021	-0.200	-0.200	-0.200	-0.312	-0.200	-0.093	-0.200	-0.200	-0.200	0.997	-0.200	-0.200	0.235	0.651	0.756	0.571	-0.144	-0.321	-0.126	0.129	0.637	0.136	-0.053	-0.129	0.550	-0.354	0.260	0.867
Microclina	-0.316	-0.200	1	0.983	1.000	1.000	1.000	0.506	1.000	-0.225	-0.200	-0.200	-0.200	-0.219	-0.200	-0.200	0.553	0.147	-0.125	-0.045	-0.197	-0.296	0.184	0.312	0.548	0.914	-0.204	-0.164	-0.082	0.009	-0.026	-0.339
Quartzo	-0.358	-0.021	0.983	1	0.983	0.983	0.983	0.446	0.983	-0.261	-0.255	-0.255	-0.255	-0.042	-0.255	-0.197	0.588	0.257	-0.005	0.041	-0.241	-0.337	0.149	0.327	0.667	0.950	-0.244	-0.206	0.029	-0.088	0.005	-0.177
Plagioclase	-0.316	-0.200	1.000	0.983	1	1.000	1.000	0.506	1.000	-0.225	-0.200	-0.200	-0.200	-0.219	-0.200	-0.200	0.553	0.147	-0.125	-0.045	-0.197	-0.296	0.184	0.312	0.548	0.914	-0.204	-0.164	-0.082	0.009	-0.026	-0.339
Moscovite	-0.316	-0.200	1.000	0.983	1.000	1	1.000	0.506	1.000	-0.225	-0.200	-0.200	-0.200	-0.219	-0.200	-0.200	0.553	0.147	-0.125	-0.045	-0.197	-0.296	0.184	0.312	0.548	0.914	-0.204	-0.164	-0.082	0.009	-0.026	-0.339
Oligoclase	-0.316	-0.200	1.000	0.983	1.000	1.000	1	0.506	1.000	-0.225	-0.200	-0.200	-0.200	-0.219	-0.200	-0.200	0.553	0.147	-0.125	-0.045	-0.197	-0.296	0.184	0.312	0.548	0.914	-0.204	-0.164	-0.082	0.009	-0.026	-0.339
Biotite	-0.494	-0.312	0.506	0.446	0.506	0.506	0.506	1	0.506	0.721	0.744	0.744	0.744	-0.342	-0.312	-0.312	0.669	0.510	-0.191	0.355	-0.327	-0.480	0.930	0.892	0.383	0.509	0.628	-0.283	-0.316	0.303	-0.292	-0.585
Horneblenda	-0.316	-0.200	1.000	0.983	1.000	1.000	1.000	0.506	1	-0.225	-0.200	-0.200	-0.200	-0.219	-0.200	-0.200	0.553	0.147	-0.125	-0.045	-0.197	-0.296	0.184	0.312	0.548	0.914	-0.204	-0.164	-0.082	0.009	-0.026	-0.339
Feldspato K	-0.356	-0.093	-0.225	-0.261	-0.225	-0.225	-0.225	0.721	-0.225	1	0.994	0.994	0.994	-0.112	-0.225	-0.225	0.363	0.545	-0.038	0.508	-0.237	-0.357	0.915	0.799	0.082	-0.117	0.880	-0.212	-0.240	0.303	-0.288	-0.313
Nefelina	-0.316	-0.200	-0.200	-0.255	-0.200	-0.200	-0.200	0.744	-0.200	0.994	1	1.000	1.000	-0.219	-0.200	-0.200	0.332	0.466	-0.120	0.437	-0.218	-0.316	0.914	0.772	0.011	-0.130	0.871	-0.195	-0.296	0.337	-0.311	-0.402
Aegirina e aegirina-augite	-0.316	-0.200	-0.200	-0.255	-0.200	-0.200	-0.200	0.744	-0.200	0.994	1.000	1	1.000	-0.219	-0.200	-0.200	0.332	0.466	-0.120	0.437	-0.218	-0.316	0.914	0.772	0.011	-0.130	0.871	-0.195	-0.296	0.337	-0.311	-0.402
Esfena	-0.316	-0.200	-0.200	-0.255	-0.200	-0.200	-0.200	0.744	-0.200	0.994	1.000	1.000	1	-0.219	-0.200	-0.200	0.332	0.466	-0.120	0.437	-0.218	-0.316	0.914	0.772	0.011	-0.130	0.871	-0.195	-0.296	0.337	-0.311	-0.402
Cloritóide + clorite	-0.346	0.997	-0.219	-0.042	-0.219	-0.219	-0.219	-0.342	-0.219	-0.112	-0.219	-0.219	-0.219	1	-0.122	-0.219	0.245	0.630	0.799	0.592	-0.065	-0.352	-0.153	0.098	0.622	0.128	-0.037	-0.152	0.595	-0.296	0.333	0.849
Serpentina	-0.316	-0.200	-0.200	-0.255	-0.200	-0.200	-0.200	-0.312	-0.200	-0.225	-0.200	-0.200	-0.200	-0.122	1	-0.200	0.081	-0.367	0.414	0.170	0.998	-0.332	-0.319	-0.403	-0.290	-0.130	0.209	-0.256	0.466	0.765	0.855	-0.370
Dolomite	0.603	-0.200	-0.200	-0.197	-0.200	-0.200	-0.200	-0.312	-0.200	-0.225	-0.200	-0.200	-0.200	-0.219	-0.200	1	-0.593	-0.441	-0.459	-0.500	-0.197	0.628	-0.328	-0.389	-0.453	-0.396	-0.493	-0.251	0.119	-0.591	-0.372	0.074
SiO ₂	-0.950	0.235	0.553	0.588	0.553	0.553	0.553	0.669	0.553	0.363	0.332	0.332	0.332	0.245	0.081	-0.593	1	0.748	0.548	0.792	0.108	-0.942	0.618	0.760	0.814	0.800	0.562	-0.553	0.345	0.456	0.400	-0.245
Al ₂ O ₃	-0.709	0.651	0.147	0.257	0.147	0.147	0.147	0.510	0.147	0.545	0.466	0.466	0.466	0.630	-0.367	-0.441	0.748	1	0.568	0.847	-0.328	-0.704	0.651	0.834	0.845	0.471	0.527	-0.373	0.275	-0.014	0.046	0.295
Fe ₂ O ₃	-0.730	0.756	-0.125	-0.005	-0.125	-0.125	-0.125	-0.191	-0.125	-0.038	-0.120	-0.120	-0.120	0.799	0.414	-0.459	0.548	0.568	1	0.816	0.465	-0.741	-0.048	0.145	0.592	0.263	0.290	-0.423	0.793	0.297	0.792	0.400
MnO	-0.899	0.571	-0.045	0.041	-0.045	-0.045	-0.045	0.355	-0.045	0.508	0.437	0.437	0.437	0.592	0.170	-0.500	0.792	0.847	0.816	1	0.210	-0.902	0.530	0.658	0.674	0.339	0.710	-0.583	0.573	0.396	0.501	0.106
MgO	-0.347	-0.144	-0.197	-0.241	-0.197	-0.197	-0.197	-0.327	-0.197	-0.237	-0.218	-0.218	-0.218	-0.065	0.998	-0.197	0.108	-0.328	0.465	0.210	1	-0.363	-0.327	-0.394	-0.245	-0.106	0.203	-0.294	0.521	0.746	0.884	-0.330
CaO	0.999	-0.321	-0.296	-0.337	-0.296	-0.296	-0.296	-0.480	-0.296	-0.357	-0.316	-0.316	-0.316	-0.352	-0.332	0.628	-0.942	-0.704	-0.741	-0.902	-0.363	1	-0.508	-0.630	-0.705	-0.608	-0.657	0.593	-0.517	-0.605	-0.628	0.188
Na ₂ O	-0.516	-0.126	0.184	0.149	0.184	0.184	0.184	0.930	0.184	0.915	0.914	0.914	0.914	-0.153	-0.319	-0.328	0.618	0.651	-0.048	0.530	-0.327	-0.508	1	0.949	0.349	0.276	0.807	-0.293	-0.247	0.298	-0.284	-0.416
K ₂ O	-0.640	0.129	0.312	0.327	0.312	0.312	0.312	0.892	0.312	0.799	0.772	0.772	0.772	0.098	-0.403	-0.389	0.760	0.834	0.145	0.658	-0.394	-0.630	0.949	1	0.621	0.479	0.707	-0.362	-0.083	0.174	-0.204	-0.212
TiO ₂	-0.715	0.637	0.548	0.667	0.548	0.548	0.548	0.383	0.548	0.082	0.011	0.011	0.011	0.622	-0.290	-0.453	0.814	0.845	0.592	0.674	-0.245	-0.705	0.349	0.621	1	0.818	0.147	-0.364	0.380	-0.080	0.210	0.300
P ₂ O ₅	-0.625	0.136	0.914	0.950	0.914	0.914	0.914	0.509	0.914	-0.117	-0.130	-0.130	-0.130	0.128	-0.130	-0.396	0.800	0.471	0.263	0.339	-0.106	-0.608	0.276	0.479	0.818	1	-0.006	-0.336	0.192	0.097	0.207	-0.156
WI	-0.647	-0.053	-0.204	-0.244	-0.204	-0.204	-0.204	0.628	-0.204	0.880	0.871	0.871	0.871	-0.037	0.209	-0.493	0.562	0.527	0.290	0.710	0.203	-0.657	0.807	0.707	0.147	-0.006	1	-0.324	0.015	0.681	0.181	-0.415
PA	0.618	-0.129	-0.164	-0.206	-0.164	-0.164	-0.164	-0.283	-0.164	-0.212	-0.195	-0.195	-0.195	-0.152	-0.256	-0.251	-0.553	-0.373	-0.423	-0.583	-0.294	0.593	-0.293	-0.362	-0.364	-0.336	-0.324	1	-0.751	-0.195	-0.415	0.222
MV	-0.525	0.550	-0.082	0.029	-0.082	-0.082	-0.082	-0.316	-0.082	-0.240	-0.296	-0.296	-0.296	0.595	0.466	0.119	0.345	0.275	0.793	0.573	0.521	-0.517	-0.247	-0.083	0.380	0.192	0.015	-0.751	1	0.097	0.749	0.277
RP	-0.588	-0.354	0.009	-0.088	0.009	0.009	0.009	0.303	0.009	0.303	0.337	0.337	0.337	-0.296	0.765	-0.591	0.456	-0.014	0.297	0.396	0.746	-0.605	0.298	0.174	-0.080	0.097	0.681	-0.195	0.097	1	0.620	-0.667
RC	-0.615	0.260	-0.026	0.005	-0.026	-0.026	-0.026	-0.292	-0.026	-0.288	-0.311	-0.311	-0.311	0.333	0.855	-0.372	0.400	0.046	0.792	0.501	0.884	-0.628	-0.284	-0.204	0.210	0.207	0.181	-0.415	0.749	0.620	1	-0.044
CP	0.195	0.867	-0.339	-0.177	-0.339	-0.339	-0.339	-0.585	-0.339	-0.313	-0.402	-0.402	-0.402																			

Os resultados da ACP sobre os dados de partida (amostras/variáveis) apresentam-se em seguida. A Tabela 11 apresenta os três primeiros eixos retidos com uma Taxa de Inércia Transportada Acumulada, da variabilidade verificada na matriz dos dados de cerca de 80%.

Tabela 11: Análise em Componentes Principais

	F1	F2	F3
Autovalor	11,198	7,743	6,878
Variabilidade (%)	34,993	24,197	21,492
% Acumulada	34,993	59,190	80,683

A Tabela 12 apresenta as coordenadas das variáveis nos eixos coincidentes com o coeficiente de correlação, ou seja, compreendidas no intervalo de -1 a +1.

Tabela 12: Coordenadas das variáveis.

	F1	F2	F3
Calcite	-0,267	0,023	-0,159
Mica	0,046	-0,006	0,266
Microclina	0,156	0,287	-0,107
Quartzo	0,162	0,296	-0,063
Plagióclase	0,156	0,287	-0,107
Moscovite	0,156	0,287	-0,107
Oligóclase	0,156	0,287	-0,107
Biotite	0,241	-0,038	-0,220
Horneblenda	0,156	0,287	-0,107
Feldspato K	0,160	-0,270	-0,140
Nefelina	0,153	-0,265	-0,167
Aegirina e aegirina-augite	0,153	-0,265	-0,167
Esfena	0,153	-0,265	-0,167
Cloritóide + clorite	0,045	-0,010	0,286
Serpentina	-0,018	-0,045	0,208
Dolomite	-0,167	0,022	-0,074
SiO ₂	0,291	0,040	0,071
Al ₂ O ₃	0,235	-0,068	0,077
Fe ₂ O ₃	0,121	-0,034	0,344
MnO	0,229	-0,130	0,196
MgO	-0,012	-0,040	0,226
CaO	-0,264	0,029	-0,163
Na ₂ O	0,232	-0,153	-0,173
K ₂ O	0,264	-0,091	-0,109
TiO ₂	0,229	0,125	0,115
P ₂ O ₅	0,221	0,241	0,010
Work Index	0,195	-0,260	-0,014
Porosidade aberta	-0,154	0,016	-0,120
Massa volúmica aparente	0,057	0,023	0,323
Resistência à carga pontual	0,125	-0,110	0,060
Resistência à compressão	0,064	0,020	0,317
Ensaio capon	-0,091	0,020	0,192

Os gráficos obtidos na ACP (Figura 31, 32 e 33), e respectivas interpretações, atendem à relação dos eixos com as variáveis e ao afastamento das mesmas relativamente aos eixos que as separam,

tendo como base de partida critérios geométricos de proximidade e afastamento. Os aspectos morfológicos da nuvem das projecções das amostras nos planos factoriais serão tidos em consideração sempre que entenda importante. A proximidade das projecções e a representatividade da entidade projectada no plano factorial são dois aspectos fundamentais para a qualidade da representação.

No plano indicado na Figura 31 (esquerda) composto pelo eixo 1 e eixo 2, os quais explicam cerca de 60% da variabilidade observada, verifica-se a existência de dois grupos de variáveis razoavelmente representadas nomeadamente o grupo formado pelas variáveis hornblenda, quartzo, microclina, oligoclase, moscovite, plagioclase e P_2O_5 , e o grupo de variáveis constituído pela nefelina, feldspato K, augite, aegirina e aegirina-augite, esfena e o *Work Index*.

Existe também ainda que com menor representação o grupo com a dolomite, a calcite e CaO, o valor capon e a porosidade aberta. Quanto às variáveis MgO e serpentina, ambas mal representadas no referido plano, nada se pode concluir.

Se as coordenadas das variáveis são interpretáveis em termos de correlações, o mesmo não acontece com os indivíduos. Assim, quanto às observações na Figura 31 (direita) o eixo 2, separa os granitos da rocha nefelínica (cinzento Monchique).

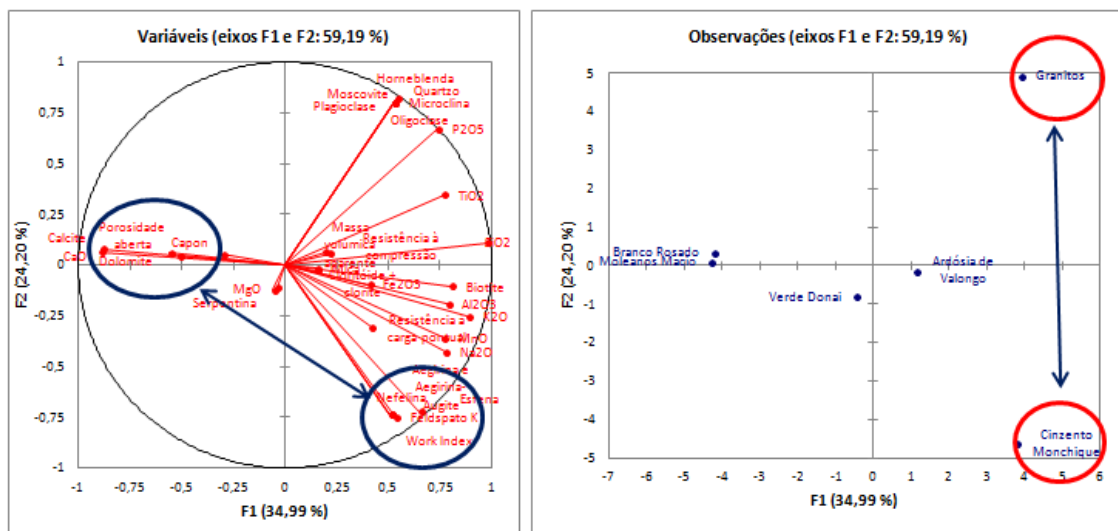


Figura 31: Projecções nos planos factoriais 1 e 2, das variáveis (à esquerda) e das amostras (à direita).

A Figura 32 (esquerda) representa as variáveis projectadas no plano formado pelos eixos 1 e 3, os quais explicam cerca de 80% da variabilidade observada – acumulada, e que evidenciam alguma oposição entre o *Work Index* e a porosidade aberta, o valor capon e a resistência à compressão.

Relativamente às observações na Figura 32 (direita) o eixo 3, coloca em oposição os granitos e a rocha nefelínica (cinzento Monchique) da ardósia de Valongo e os mármore (branco rosado e Moleanos Macio) da rocha verde Donai, respectivamente.

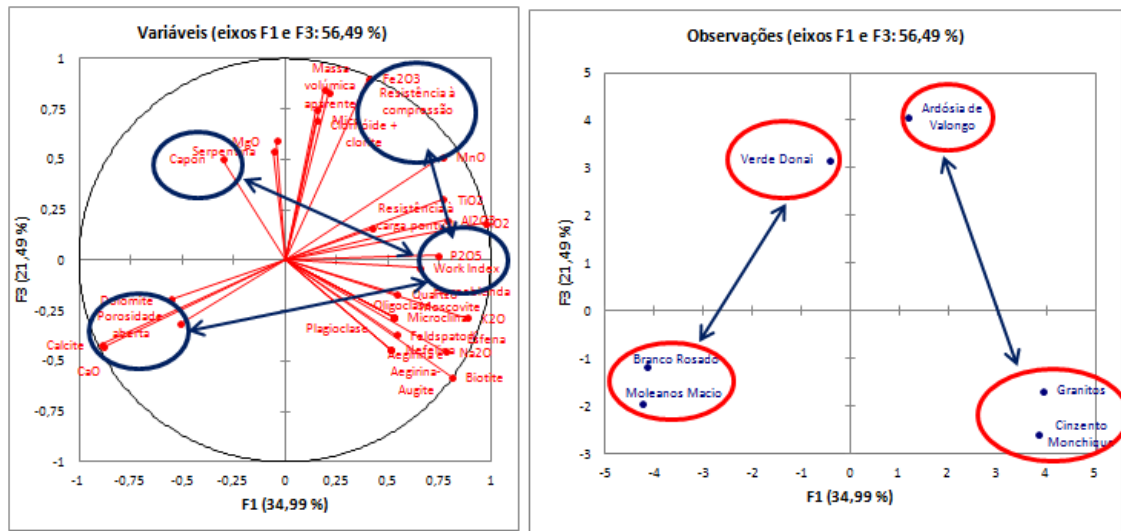


Figura 32: Projecções nos planos factoriais 1 e 3, das variáveis (à esquerda) e das amostras (à direita).

A Figura 33 (esquerda e direita) resulta da projecção conjunta das variáveis e amostras, a qual comprova as oposições entre os tipos de rocha atrás referidos e associa, a cada tipo e com base nos critérios de proximidade e afastamento das projecções, as variáveis que se relacionam com cada um deles, com maior ou menor expressão.

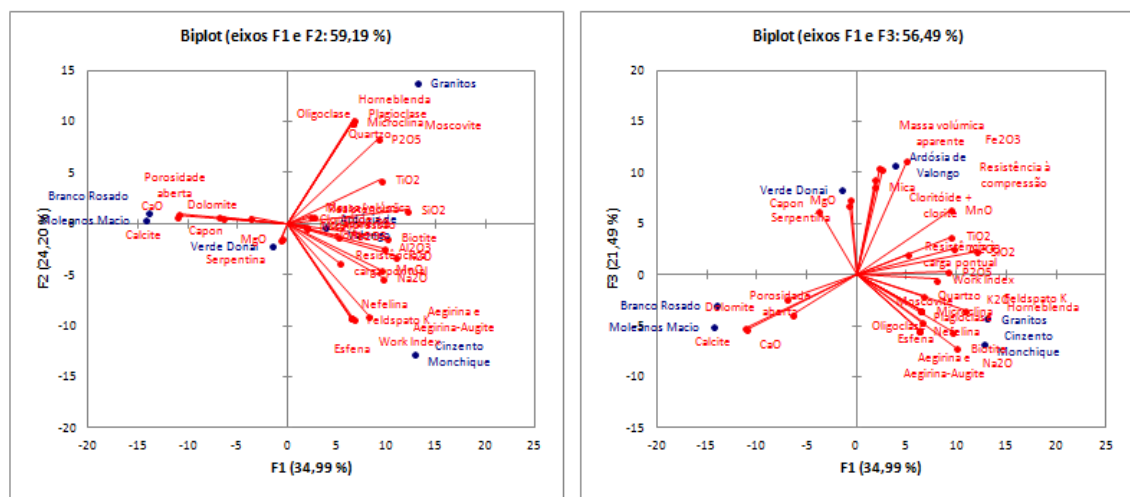


Figura 33: Projecção conjunta das variáveis e das amostras nos eixos 1 e 2 (esquerda) e eixos 1 e 3 (direita).

Pode afirma-se que a ACP contribuiu para individualizar algumas das variáveis analisadas relativamente à respectiva influência no *Work Index*, entre as quais se destacam as variáveis

relacionadas com as propriedades físicas dos materiais estudados por serem universais a todas as amostras ao contrario de elementos químicos ou minerais.

Apresenta-se em seguida a segunda fase de estudo, tal como já referido, que consiste na tentativa de modelar matematicamente, através de uma regressão múltipla, um modelo que permita estimar o valor de *Work Index* para rochas com base nas propriedades físicas, para o qual a ACP referida contribui ao apontar as variáveis que poderiam ser mais susceptíveis de influenciar o valor de *Work Index*.

6.3. Regressão simples e múltipla

A análise de regressão simples é uma ferramenta de análise extremamente útil, capaz de determinar relações entre uma variável independente e uma variável dependente, assim a sua utilização para esta tese é clara tendo sido um dos métodos seleccionados para a análise dos dados, no entanto nem sempre é suficiente uma única variável independente para prever a variabilidade da variável dependente, nesses casos é necessário recorrer a várias variáveis independentes para estabelecer uma relação válida com a variável dependente, utilizando a análise de regressão Múltipla.

O modelo de regressão linear simples é representado utilizando a Equação 45

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + \varepsilon_i [45]$$

Onde:

- Y_i : Valor da variável dependente.
- X_i : Valor da variável independente.
- α : Ordenada na origem.
- β : Coeficiente da variável independente.
- ε_i : Erro.

Equação 45: Modelo de regressão linear simples, (Martins, 2002).

A Equação 46 é a Equação de regressão criada pela relação linear entre as duas variáveis.

$$\hat{Y}_i = a + bX_i [46]$$

Onde:

- \hat{Y}_i : Valor previsto para a variável dependente.
- X_i : Valor da Variável Independente.

- a : Ordenada na origem.
- b : Coeficiente da variável independente.

Equação 46: Equação de regressão linear simples, (adaptado de Martins, 2002).

A regressão múltipla estabelece uma relação entre várias variáveis independentes e uma variável dependente, assim a Equação 47 apresenta o modelo de regressão linear múltipla.

$$Y_i = \alpha + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} + \varepsilon_i [47]$$

Onde:

- Y_i : Valor da variável dependente.
- $X_{1,2,3\dots ki}$: Valor das variáveis independentes.
- α : Ordenada na origem.
- $\beta_{1,2,3\dots k}$: Coeficiente das variáveis independentes.
- ε_i : Erro.

Equação 47: Modelo de regressão linear múltipla, (Martins, 2002).

A Equação 48 representa a Equação de regressão de uma regressão linear múltipla.

$$\hat{Y}_i = a + b_1 X_{1i} + b_2 X_{2i} + \dots + b_k X_{ki} [48]$$

Onde:

- Y_i : Valor previsto para a variável dependente.
- $X_{1,2,3\dots ki}$: Valor das variáveis independentes.
- a : Ordenada na origem.
- $b_{1,2,3\dots k}$: Coeficiente das variáveis independentes.

Equação 48: Equação de regressão linear múltipla, (adaptado de Martins, 2002).

Para a regressão, uma vez que se entendeu realizar uma tentativa de criar uma relação que possivelmente seja utilizada para realizar estimativas preliminares do *Work Index*, adoptou-se um nível de confiança de 5%, sendo assim relações em que F de significância é inferior a 5% foram consideradas inválidas.

Uma Equação de regressão cujos coeficientes da variável independente e ordenada na origem são conhecidos, cujo coeficiente de determinação é alto e cujo F de significância está dentro do limite definido pode ser utilizada para fazer previsões quanto à variável dependente substituindo na Equação de regressão os valores da variável independente e a ordenada na origem.

Devido à natureza matricial das regressões linear múltiplas, estas apenas podem ser realizadas com um número de variáveis independentes inferior ao número de ocorrências menos 2.

Os modelos de regressão múltipla analisados até agora tratam apenas variáveis qualitativas, no entanto tendo um modelo válido é possível introduzir variáveis quantitativas na análise de regressão múltipla através das variáveis *dummy*. No caso das variáveis *dummy*, define-se os resultados possíveis, ex. rocha homogénea ou não homogénea, e atribui-se a um dos casos o valor 0 e, ao outro, o valor 1, aleatoriamente, o método permite também analisar casos em que a variável em estudo apresenta mais de duas categorias. A variável *dummy* é então adicionada ao modelo como uma das variáveis normais.

6.3.1. Análise de regressão linear simples

Numa primeira fase da análise estatística foram realizados ensaios de regressão linear para avaliar a relação entre o *Work Index* e as propriedades físicas dos materiais com mais pormenor.

Nos ensaios cujos resultados da amostra de Ardósia de Valongo se encontram discriminados em Ardósia de Valongo A e B, foi adoptado o valor médio.

A Tabela 13 apresenta os resultados dos ensaios das propriedades físicas e da pesquisa bibliográfica do *Work Index*.

Tabela 13: Tabela resumo, valores de *Work Index* e resultados dos ensaios das propriedades físicas.

	<i>Work Index</i> (kWh/t)	Porosidade aberta (%)	Massa volúmica aparente (kg/m ³)	Resistência à carga pontual (N/mm ²)	Resistência à compressão (kg/cm ²)	Capon (mm)
Verde Donai	18,20	0,29	2,79	49,70	2795	19,5
Branco Rosado	9,72	0,32	2,68	18,74	970	26,5
Moleanos Macio	11,68	8,68	2,41	28,45	920	28,0
Granito	13,21	0,91	2,62	32,45	1484	20,0
Ardósia de Valongo	15,43	1,14	2,81	24,17	1910	39,0
Cinzento Monchique	26,20	0,70	2,55	39,93	1060	19,0

Utilizando estes dados e recorrendo ao *software* Microsoft Excel realizaram-se seguintes regressões lineares.

A Figura 34 apresenta uma representação gráfica de WI versus porosidade aberta.

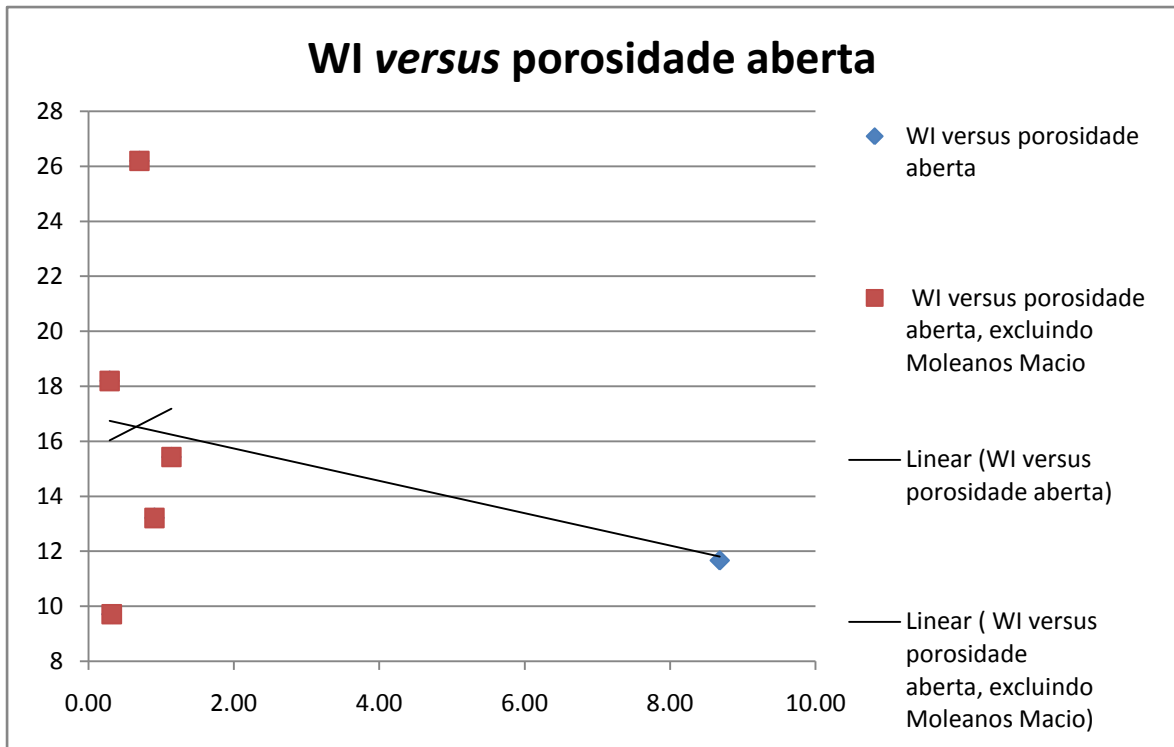


Figura 34: Gráfico regressão linear WI versus porosidade aberta.

As Equações 49 e 50 apresentam a Equação de regressão de WI versus porosidade aberta e WI versus porosidade aberta excluindo Moleanos Macio, respectivamente.

$$\gamma = -0,589\chi + 16,92 \text{ [49]}$$

Onde:

- γ : Valor de WI, kWh/t.
- χ : Valor de porosidade aberta, %.

Equação 49: Equação de regressão de WI versus porosidade aberta.

$$\gamma = 1,348\chi + 15,64 \text{ [50]}$$

Onde:

- γ : Valor de WI, kWh/t.
- χ : Valor de porosidade aberta, %.

Equação 50: Equação de regressão de WI versus porosidade aberta excluindo Moleanos Macio.

A Equação 49 apresenta um R^2 de 0,107, enquanto a Equação 50, surpreendentemente apresenta um R^2 inferior, apenas 0,006. Mesmo a Equação 49 apresenta um coeficiente de determinação bastante baixo.

A Figura 35 apresenta uma representação gráfica de WI *versus* massa volúmica aparente.

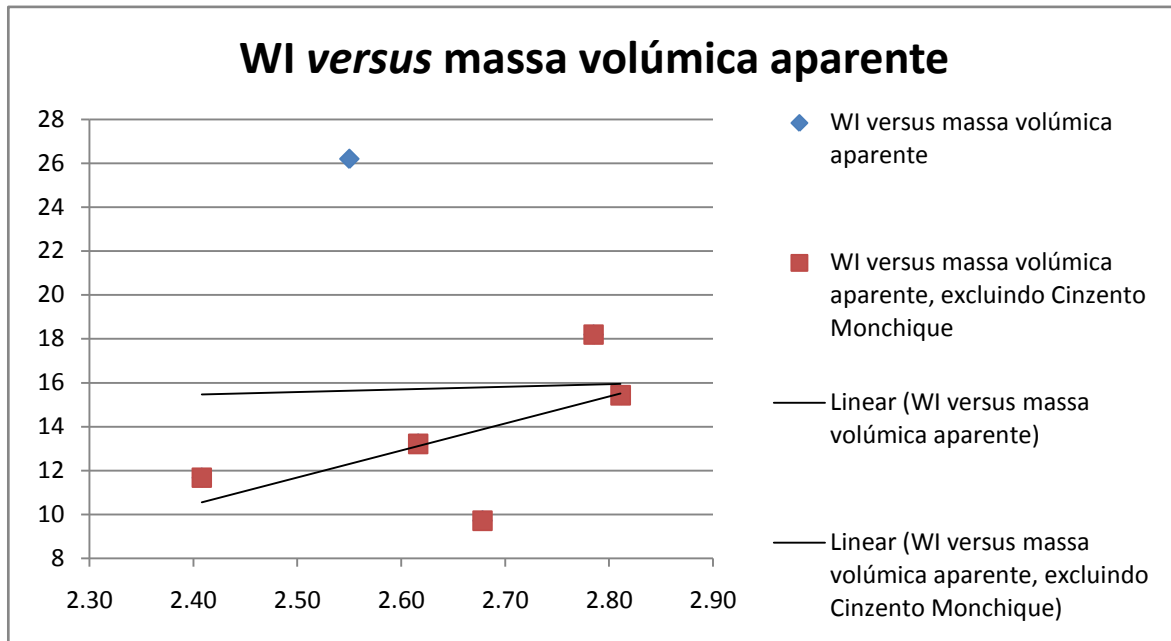


Figura 35: Gráfico regressão linear WI versus massa volúmica aparente.

As Equações 51 e 52 apresentam a Equação de regressão de WI *versus* massa volúmica aparente e WI *versus* massa volúmica aparente excluindo Cinzento Monchique respectivamente.

$$\gamma = 1,20\chi + 12,56 [51]$$

Onde:

- γ : Valor de WI, kWh/t.
- χ : Valor de massa volúmica aparente, %.

Equação 51: Equação de regressão de WI *versus* massa volúmica aparente.

$$\gamma = 12,32\chi - 19,13 [52]$$

Onde:

- γ : Valor de WI, kWh/t.
- χ : Valor de massa volúmica aparente, %.

Equação 52: Equação de regressão de WI *versus* massa volúmica aparente excluindo Cinzento Monchique.

A Equação 51 apresenta um R^2 menor que 0,000, enquanto a Equação 52, apresenta um R^2 superior, como seria de esperar, no entanto mesmo assim apenas 0,364. Mesmo a Equação 52 apresenta um coeficiente de determinação bastante baixo.

A Figura 36 apresenta uma representação gráfica de WI versus resistência à carga pontual.

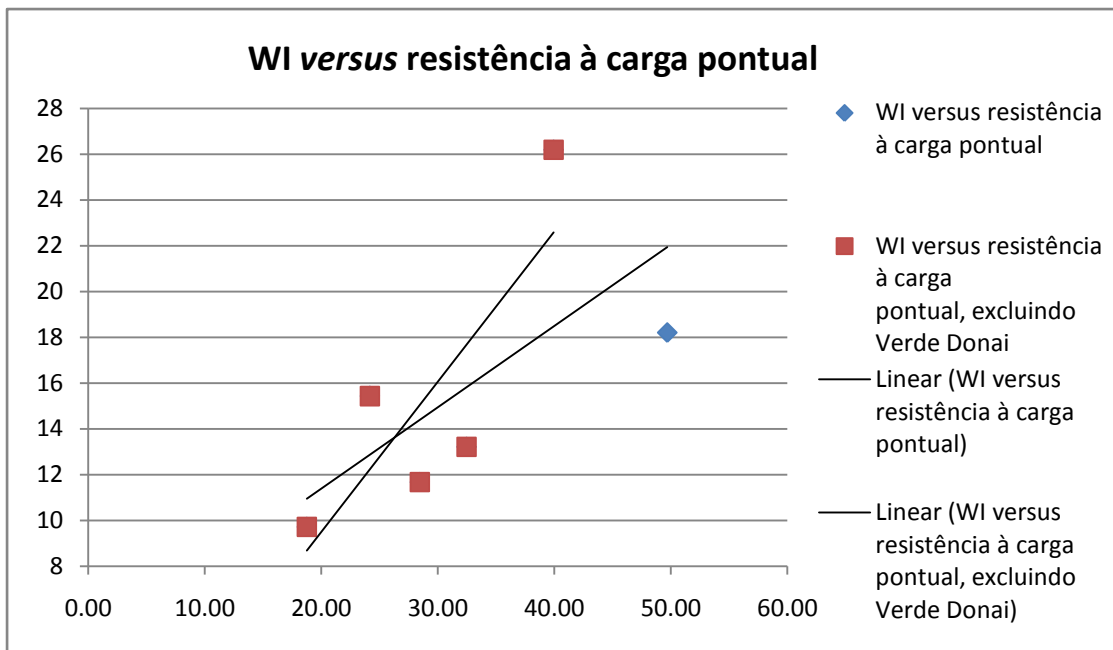


Figura 36: Gráfico regressão linear WI versus porosidade resistência à carga pontual.

As Equações 53 e 54 apresentam a Equação de regressão de WI versus resistência à carga pontual e WI versus resistência à carga pontual excluindo Verde Donai, respectivamente.

$$\gamma = 0,354\chi + 4,301 [53]$$

Onde:

- γ : Valor de WI, kWh/t.
- χ : Valor de resistência à carga pontual, %.

Equação 53: Equação de regressão de WI versus resistência à carga pontual.

$$\gamma = 0,655\chi - 3,605 [54]$$

Onde:

- γ : Valor de WI, kWh/t.
- χ : Valor de resistência à carga pontual, %.

Equação 54: Equação de regressão de WI versus resistência à carga pontual excluindo Verde Donai.

A Equação 53 apresenta um R^2 de 0,450, enquanto a Equação 54 apresenta $R^2 = 0,667$. A Equação 54 apresenta um coeficiente de determinação mais elevado, no entanto, como foi necessário remover um dos 6 casos para obter este valor.

A Figura 37 apresenta uma representação gráfica de WI versus resistência à compressão.

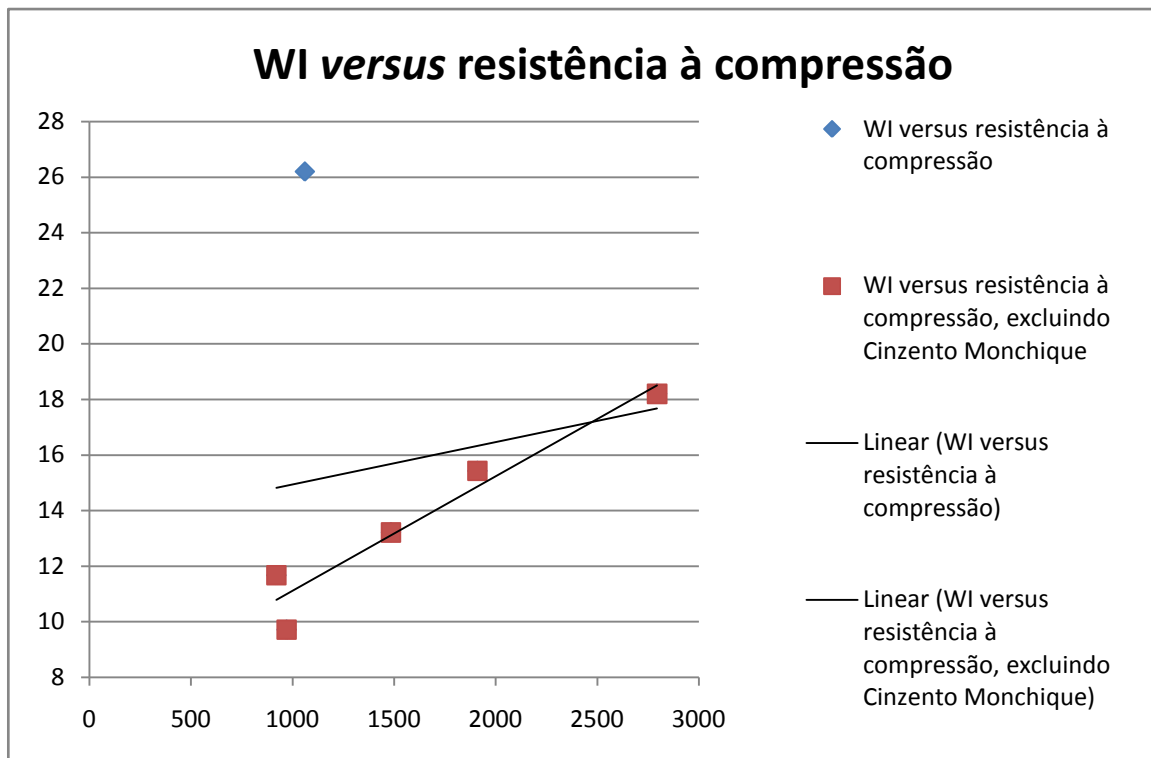


Figura 37: Gráfico regressão linear WI versus resistência à compressão.

As Equações 55 e 56 apresentam a Equação de regressão de WI versus resistência à compressão e WI versus resistência à compressão excluindo Cinzeno Monchique, respectivamente.

$$\gamma = 0,001\chi + 13,41[55]$$

Onde:

- γ : Valor de WI, kWh/t.
- χ : Valor de resistência à compressão, %.

Equação 55: Equação de regressão de WI versus resistência à compressão

$$\gamma = 0,004\chi + 6,997[56]$$

Onde:

- γ : Valor de WI, kWh/t.
- χ : Valor de resistência à compressão, %.

Equação 56: Equação de regressão de WI versus resistência à compressão excluindo Cinzeno Monchique.

A Equação 55 apresenta um R^2 de 0,035, enquanto a Equação 56 apresenta $R^2 = 0,934$. A Equação 56 apresenta um coeficiente de determinação extremamente elevado e uma correlação positiva

com o *Work Index*, no entanto, mais uma vez foi necessário remover um dos 6 casos para obter este valor.

A Figura 38 apresenta uma representação gráfica de *WI versus capon*.

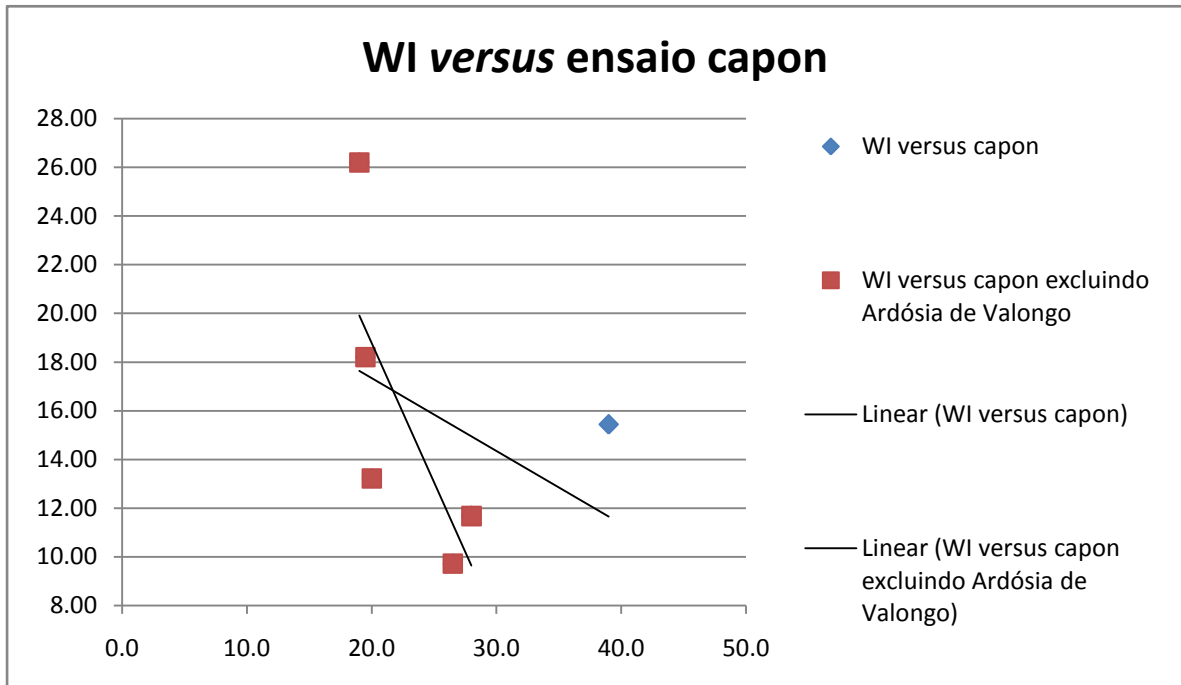


Figura 38: Gráfico regressão linear *WI versus capon*.

As Equações 57 e 58 apresentam a Equação de regressão de *WI versus capon* e *WI versus capon* excluindo Ardósia de Valongo, respectivamente.

A Equação 57 apresenta a Equação de regressão de *WI versus capon*

$$\gamma = -0,299\chi + 23,32[57]$$

Onde:

- γ : Valor de WI, kWh/t.
- χ : Valor de capon, %.

Equação 57: Equação de regressão de *WI versus capon*.

$$\gamma = -1,141\chi + 41,60[58]$$

Onde:

- γ : Valor de WI, kWh/t.
- χ : Valor de capon, %.

Equação 58: Equação de regressão de *WI versus capon* excluindo Ardósia de Valongo.

A Equação 57 apresenta um R^2 de 0,152 que é algo reduzido, por sua vez verificou-se que ao remover a Ardósia de Valongo, o coeficiente de determinação sobe consideravelmente sendo que a Equação 58 apresenta um R^2 de 0,550.

Através do estudo destas relações foi possível verificar que não só a resistência à carga pontual apresenta uma relação algo significativa com o *Work Index*, como verificado previamente, mas, ao remover o ponto mais afastado das respectivas regressões melhorou a relação da carga pontual com o *Work Index*, assim como a resistência à compressão e o valor capon passam a apresentar relações bastante favoráveis com coeficientes de determinação bastante elevados. De todas estas relações a resistência à compressão apresenta a relação mais próxima com o *Work Index* ao remover uma das variáveis, atingindo um coeficiente de correlação de 0,97, no entanto uma vez que tanto a resistência à compressão como o *Work Index* foram determinados através de pesquisa bibliográfica optou-se por não utilizar esta relação.

Assim, optou-se por desenvolver um estudo de regressão linear múltipla com as propriedades físicas previamente mencionadas.

Antes de se iniciar o estudo da regressão múltipla é necessário determinar se existe colinearidade entre as variáveis independentes, nesse sentido foi consultada a Tabela 10, na qual se verificou que a PA versus MV e MV versus RC apresentavam coeficientes de correlação significativos, pelo que foram realizadas as regressões lineares simples das duas relações e obtidos os seguintes resultados explicitados na Tabela 14.

Tabela 14: Resumo das regressões lineares simples, PA versus MV e MV versus RC.

Estadística de regressão	PA versus MV	MV versus RC
R múltiplo	0,751	0,749
Quadrado de R	0,565	0,561
Quadrado de R ajustado	0,456	0,451
Erro-padrão	2,424	0,112
Observações	6	6
F de significância	0,085	0,087

Assim, podemos verificar que embora se aproximem do F de significância máximo, nenhuma das duas relações atinge um valor inferior a 0,05, sendo que todas as variáveis relacionadas com as propriedades físicas estudadas podem ser utilizadas na regressão linear múltipla.

6.3.2. Análise de regressão linear múltipla

Sabe-se então que a porosidade aberta, massa volúmica aparente, resistência à carga pontual, resistência à compressão e o valor capon podem ser utilizados numa análise de regressão linear múltipla.

Verifica-se que não é possível realizar uma regressão múltipla em que o número de variáveis independentes é maior que o número de ocorrências menos 2, sendo assim numa primeira fase foram realizadas regressões múltiplas com todas as combinações de três variáveis independentes possíveis numa tentativa de criar uma relação que permitisse a utilização de variáveis *dummy*. Verificou-se que nenhuma dessas regressões era viável, as Tabelas síntese destas estão presentes no Anexo I.

Estando impossibilitada a criação de uma regressão linear múltipla entre o *Work Index* e três das variáveis independentes avançou-se com relações com 4 variáveis independentes. A primeira destas regressões recorreu a PA, MV, RP e CP, seguindo-se as restantes combinações. A Tabela 15 apresenta o resultado da regressão WI *versus* PA, MV, RP, e CP.

Tabela 15: Resultado da regressão linear múltipla, WI *versus* PA, MV, RP, e CP.

Estatística de regressão			Coefficientes	Valor P
R múltiplo	0,987	Interceptar	166,794	0,146
Quadrado de R	0,975	Porosidade aberta (%)	-3,331	0,139
Quadrado de R ajustado	0,874	Massa volúmica aparente (kg/m ³)	-76,693	0,145
Erro-padrão	2,101	Resistência à carga pontual (N/mm ²)	0,834	0,116
Observações	6	Capon (mm)	1,237	0,156
F de significância	0,236			

Nesta regressão encontramos um elevado coeficiente de correlação, 0,99, no entanto encontramos o F de significância muito acima dos 5% máximos que procuramos. Este modelo de regressão é então inválido.

Após esta primeira regressão foi realizada a WI *versus* MV, RP, RC, e CP. A Tabela 16 apresenta o resultado dessa regressão.

Tabela 16: Resultado da regressão linear múltipla, WI versus MV, RP, RC, e CP.

Estatística de regressão			Coefficientes	Valor P
R múltiplo	0,992	Interceptar	-148,050	0,128
Quadrado de R	0,984	Massa volúmica aparente (kg/m ³)	50,103	0,135
Quadrado de R ajustado	0,922	Resistência à carga pontual (N/mm ²)	1,349	0,088
Erro-padrão	1,654	Resistência à compressão (kg/cm ²)	-0,019	0,109
Observações	6	Capon (mm)	0,655	0,163
F de significância	0,187			

Na regressão WI versus MV, RP, RC e CP verifica-se mais uma vez um coeficiente de correlação muitíssimo elevado, 0,99, estando o erro-padrão mais baixo que na última tentativa. Embora o F de significância também se encontre mais próximo de 5% que o obtido na última tentativa, não chega a ser inferior ao limite máximo.

A Tabela 17 apresenta o resultado da regressão WI versus PA, MV, RC, e CP.

Tabela 17: Resultado regressão linear múltipla, WI versus PA, MV, RC, e CP.

Estatística de regressão			Coefficientes	Valor P
R múltiplo	0,853	Interceptar	478,797	0,388
Quadrado de R	0,728	Porosidade aberta (%)	-6,188	0,391
Quadrado de R ajustado	-0,358	Massa volúmica aparente (kg/m ³)	-196,614	0,402
Erro-padrão	6,889	Resistência à compressão (kg/cm ²)	0,021	0,406
Observações	6	Capon (mm)	1,439	0,469
F de significância	0,711			

Esta regressão apresenta resultados inferiores aos anteriores ao longo de todos os indicadores, o coeficiente de correlação é inferior ao último, o erro padrão o mais alto encontrado até agora, e F de significância muito superior ao limite e ao observado na última regressão, pelo que este modelo apresenta também uma discrepância entre o Quadrado de R e o Quadrado de R ajustado muito alta, algo a evitar em qualquer regressão.

A Tabela 18 apresenta o resultado da regressão WI *versus* PA, MV, RP, e RC.

Tabela 18: Resultado da regressão linear múltipla, WI *versus* PA, MV, RP, e RC.

Estatística de regressão			Coefficientes	Valor P
R múltiplo	0,936	Interceptar	-324,075	0,412
Quadrado de R	0,876	Porosidade aberta (%)	2,165	0,506
Quadrado de R ajustado	0,382	Massa volúmica aparente (kg/m ³)	125,478	0,405
Erro-padrão	4,647	Resistência à carga pontual (N/mm ²)	1,423	0,300
Observações	6	Resistência à compressão (kg/cm ²)	-0,027	0,360
F de significância	0,506			

Esta regressão apresenta resultados intermédios entre a última e as iniciais, mais uma vez temos o coeficiente de determinação elevado, com um erro padrão e variância entre quadrados de R preocupantes, com um F de significância muito acima do limite de 5%.

A Tabela 19 apresenta o resultado da última regressão possível, com quatro variáveis independentes, isto é, WI *versus* PA, RP, RC, e CP.

Tabela 19: Resultado da regressão linear múltipla, WI *versus* PA, RP, RC, e CP.

Estatística de regressão			Coefficientes	Valor P
R múltiplo	0,9999	Interceptar	-24,500	0,020
Quadrado de R	0,9998	Porosidade aberta (%)	-1,371	0,014
Quadrado de R ajustado	0,9991	Resistência à carga pontual (N/mm ²)	1,172	0,010
Erro-padrão	0,1772	Resistência à compressão (kg/cm ²)	-0,012	0,012
Observações	6	Capon (mm)	0,913	0,014
F de significância	0,0201			

Aqui, encontramos mais uma vez uma regressão com boa qualidade, o coeficiente de correlação é 0,99, de igual forma o quadrado de R e o quadrado de R ajustado apresentam valores muito elevados e próximos, sendo a diferença de apenas 0,0007. De igual forma o erro padrão é o segundo mais baixo observado, 0,1772. Por fim, e talvez o factor com maior relevância, o F de significância está abaixo do limite de 5% sendo apenas 2%, de igual forma o Valor P de todas as

variáveis independentes encontra-se também abaixo de 5%, demonstrando que todas elas contribuem para o modelo de regressão.

Com esta última regressão temos então, por fim, um modelo de regressão linear válido, e a Equação 59 apresenta a Equação de regressão apresentada por este modelo.

$$WI = -24,500 - 1,371PA + 1,172RP - 0,012RC + 0,913CP \text{ [59]}$$

Equação 59: Equação de regressão do modelo de regressão múltipla linear válido, WI versus PA, RP, RC, e CP.

Ao contrário do observado na bibliografia verifica-se que a porosidade também apresenta uma relação com o *Work Index*, neste caso negativa.

Verifica-se que a resistência à compressão também apresenta uma relação negativa com o *Work Index*, algo curioso visto que nesta mesma relação a resistência à carga pontual apresenta uma relação positiva com o *Work Index*.

Por fim, temos também o valor capon, que nesta relação apresenta-se relacionado directamente com o *Work Index*.

Capítulo 7

Conclusões e perspectivas futuras

Conclusões

O ensaio clássico de Bond continua actualmente a ter uso generalizado na indústria devido à respectiva confiabilidade comprovada por décadas de utilização e a natureza do *Work Index* como uma única variável representativa dos custos energéticos da operação de redução de calibre.

Esta tese teve como objectivo a tentativa de elaboração de um método alternativo para realizar uma estimativa preliminar do *Work Index*, uma vez que este requer equipamento especializado nem sempre disponível para a sua determinação.

Com esse intuito recorreu-se a técnicas de análise estatística para determinar propriedades com possível relação com o *Work Index*, verificando-se o seguinte:

No que diz respeito às propriedades químicas verificou-se através da matriz de correlação de Pearson que os elementos CaO, MnO, Na₂O, e K₂O apresentavam uma correlação com o *Work Index* com algum significado, negativa no caso de CaO e positiva para os restantes elementos. Já a análise de componentes principais revelou a presença de P₂O₅ num dos grupos mais representados no plano composto pelos Eixos 1 e 2, e CaO no grupo com menor representação.

No que diz respeito a composição mineralógica verificou-se através da matriz de correlação de Pearson que a percentagem de calcite, biotite, feldspato K, nefelina e aegirina e aegirina-augite apresentavam uma correlação com o *Work Index* com algum significado, negativa no caso da calcite positiva para os restantes elementos. A análise de componentes principais revelou a relevância da mineralogia sendo os dois grupos mais representados no plano composto pelos Eixo 1 e 2 constituídos quase exclusivamente por variáveis associadas a composição mineralógica das rochas, e estando também presente no grupo com menos representação.

Quanto às propriedades físicas na matriz de correlação de Pearson a resistência à carga pontual apresenta uma relação positiva com o *Work Index*, Na ACP num dos grupos com menor representação no plano composto pelos Eixos 1 e 2 surge o valor capon e porosidade aberta. Já no plano composto pelos eixos 1 e 3 encontra-mos oposição entre o *Work Index* e a porosidade aberta, o valor capon, e a resistência à compressão, todas elas variáveis utilizadas na regressão múltipla válida. A regressão linear simples revelou ainda que a resistência à compressão apresenta uma relação muito forte com o WI, quando excluídos os resultados da amostra Cinzento Monchique.

O valor de WI para a amostra Cinzento Monchique foi determinado através de apenas um valor bibliográfico, este apresentava-se mais alto do que o que seria de esperar tendo em conta as restantes propriedades físicas registadas para esta rocha. Esta discrepância pode ter afectado negativamente as tentativas de estabelecer relações entre as propriedades das rochas e o *Work Index*.

Utilizando regressão linear múltipla foi possível estabelecer uma relação entre o *Work Index* e algumas propriedades das rochas, nomeadamente a porosidade aberta, a resistência à carga pontual, a resistência à compressão, e o valor capon, com elevado coeficiente de correlação (0,99) e F de significância abaixo do limite máximo, atingindo o objectivo principal da tese.

A Equação estabelecida para a resistência à carga pontual apresenta uma relação positiva com o *Work Index* ao contrário do verificado na relação estabelecida por Deniz & Umucu (2013), por outro lado o valor capon tem uma relação positiva com o *Work Index*, o que é suportado por Kulu et al. (2009), quando o autor afirma que a moabilidade diminui à medida que a abrasividade aumenta, já que uma diminuição da moabilidade leva a um aumento do *Work Index*.

A porosidade aberta e a resistência à compressão apresentam uma relação negativa e positiva, respectivamente, com o *Work Index*.

Todavia, não foi possível estudar a influência de variáveis qualitativas como a textura das rochas através da regressão múltipla com variáveis *dummy*.

Perspectivas futuras

A problemática da determinação do *Work Index* de um modo expedito tem sido objecto de estudo constante, pelo que para um desenvolvimento mais aprofundado das metodologias propostas nesta tese podem apontar-se as seguintes recomendações:

- Comprovar a aplicabilidade deste modelo matemático de previsão do *Work Index* experimentalmente recorrendo a amostras cujos *Work Index* e resultados dos testes de identificação foram todos determinados experimentalmente.
- Expandir o número de litologias analisadas fortaleceria significativamente este tipo de modelo, em particular o modelo seria bastante valorizado se fossem incluídas amostras

de minérios que têm que ser submetidos a moagens exaustivas para separar a ganga do produto, como por exemplo a bauxite.

- Embora o modelo tenha sido formado recorrendo a dados de uma bateria bastante extensiva de ensaios, há várias propriedades indicadas na bibliografia que não foram incluídas neste estudo, como é o caso da friabilidade ou da dureza de Vickers, pelo que a sua inclusão em estudos futuros seria relevante.
- Seria interessante também realizar um estudo similar utilizando amostras cujo *Work Index* é conhecido experimentalmente, em particular já que permitiria a inclusão de vários espécimes de litologias similares sem ser necessário agrupá-los na mesma amostra, como foi o caso nesta tese com o grupo dos Granitos.

8. Bibliografia

- Abouzeid, A.-Z. M., & Negm, A.-T. A. (2014). Characterization and Beneficiation of an Egyptian Nepheline Syenite Ore. *International Journal of Mineralogy* , 9.
- Aksani, B., & Sönmez, B. (2000). Simulation of Bond Grindability Test by Using Cumulative Based Kinetic Model. *Minerals Engineering Vol.13, No. 6* , 673-677.
- Carvalho, J. M. (2008). Carta Geológica do Anticlinal de Estremoz - síntese à escala 1:25000. Cartografia Temática do Anticlinal - Zona dos Mármoreos. Lisboa: Cevalor-INETI.
- Cooper, J. R., Penney, W. R., & James R. Fair, P. (2012). *Chemical Process Equipment: Selection and Design*. Amsterdão: Elsevier.
- Csóke, B., Rácz, Á., & Mucsi, G. (2013). Determination of the Bond *Work Index* of Binary Mixtures by Different Methods. *International Journal of Mineral Processing* 123 , 78-86.
- Deniz, V., & Ozdag, H. (2003). A new approach to Bond grindability and *Work Index*: dynamic elastic parameters. *Minerals Engineering* 16 , 211-217.
- Deniz, V., & Umucu, Y. (2013). Interrelationships between the Bond Grindability with Physicomechanical and Chemical Properties of Coals. *Energy Sources, Part A*, 35 , 144-151.
- Deniz, V., Sütçü, N., & Umucu, Y. (2003). The Effect of Circulating Load and Test Sieve Size on The Bond *Work Index* Based on Natural Amorphous Silica. 18/" *International Mining Congress and Exhibition of Turkey* (pp. 517-522). Turquia: IMCET.
- Deniz, V., Umucu, Y., & Çayırılı, S. (2013). Prediction of the Bond Grindability Index from the Sink-Float Test Data of Coals. *Energy Sources, Part A*, 35 , 1385-1391.
- Gent, M., Menendez, M., Toraño, J., & Torno, S. (2012). A Correlation Between Vickers Hardness Indentation Values and the Bond *Work Index* for the Grinding of Brittle Minerals. *Powder Technology* 224 , 217-222.
- Gupta, A., & Yan, D. (2006). *Processing Design and Operations an Introduction*. Amsterdão: Elsevier.
- Hiroaki Masuda, K. H. (2006). *Powder Technology: Handling and Operations, Process Instrumentation and Working Hazards*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Iglésias, J. G., Álvarez, M., & Rodriguez, J. E. (1999). Influence of Gypsum's Mineralogical Characteristics on its Grinding Behaviour Applied to Cement Fabrication. *Cement and Concrete Research* 29 , 727-730.

Ipek, H., Ucbas, Y., & Hosten, C. (2005). The Bond *Work Index* of Mixtures of Ceramic Raw Materials. *Minerals Engineering* 18 , 981-983.

Jankovic, A., Dundar, H., & Mehta, R. (2010). Relationships Between Comminution Energy and Product Size for a Magnetite Ore. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy* vol. 110 , 141-146.

Kulu, P., Tarbe, R., Käerdi, H., & Goljandin, D. (2009). Abrasivity and Grindability Study of Mineral Ores. *Wear* 267 , 1832-1837.

Lyra, S., Silva, E. C., Araújo, M. C., Fragoso, W. D., & Veras, G. (2010). Classificação Periódica: Um Exemplo Didático para Ensinar Análise de Componentes Principais. *Química nova* , 1594-1597.

Manual ThermoScientific NITON XL3t 900 Analyzer.

Martins, G. d. (2002). *Estatística Geral e Aplicada*. São Paulo: Editora Atlas S.A.

Mucsi, G. (2008). Fast Test Method for the Determination of the Grindability of Fine Materials. *Chemical Engineering Research and Design* , 395-400.

Mucsi, G., Csóke, B., & Solymár, K. (2011). Grindability characteristics of lateritic and karst bauxites. *International Journal of Mineral Processing* 100 , 96-103.

Olatunji, K. J., & Durojaiye, A. (2010). Determination of Bond index of Birnin- Gwari Iron Ore in Nigeria. *Journal of Minerals & Materials Characterisation & Engineering* Vol. 9, No 7 , 635-642.

Ozkahraman, H. T. (2005). A Meaningful Expression Between Bond *Work Index*, Grindability Index and Friability Value. *Minerals Engineering* 18 , 1057-1059.

Pereira, E., Ribeiro, A., Carvalho, G., Noronha, F., Ferreira, N., & Monteiro, J. H. (1992). Notícia Explicativa da Folha 1 da Carta Geológica de Portugal (Escala 1:200 000). . Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal: DGGM.

Refahi, A., Rezai, B., & Mohandesi, J. A. (2007). Use of rock mechanical properties to predict the Bond crushing index. *Minerals Engineering* 20 , 662-669.

Rittinger, R. P. (1867). *Lehrbuch der Aufbereitungskunde*. Berlin: Ernst and Korn.

Souza, V. C., Koppe, J. C., Costa, J. F., Vargas, A. L., Blando, E., & Hübler, R. (2008). The influence of mineralogical, chemical and physical properties on grindability of commercial clinkers with high MgO level. *Cement and Concrete Research* 38 , 1119-1125.

Spínola, S. V. (2015). Caracterização térmica de pedras naturais. *Universidade de Aveiro* , 235.

- Stamboliadis, E., Emmanouilidi, S., & Petrakis, E. (2011). A New Approach to the Calculation of *Work Index* and the Potential Energy of a Particulate Material. *Geomaterials 1* , 28-32.
- Swain, R., & Rao, R. B. (2009). Alternative Approaches for Determination of Bond *Work Index* on Soft and Friable Partially Laterised Khondalite Rocks of Bauxite Mine Waste Materials. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, Vol. 8, No. 9* , 729-743.
- Tatsuo Tanaka, Y. K. (2006). Crushing and Grinding. In H. Masuda, K. Higashitani, & H. Yoshida, *Powder technology: Handling and Operations, Process Instrumentation, and Working Hazards* (pp. 9-10). Boca Raton: CRC Press.
- Tavares, L. M., & Kallembach, R. D. (2013). Gridability of Binary Ore Blends in Ball Mills. *Minerals Engineering 41* , 115-120.
- Tiryaki, B. (2005). Practical Assessment of the Grindability of Coal Using its Hardness Characteristics. *Rock Mechanics and Rock Engineering 38* , 145-151.
- Tromans, D. (2008). Mineral comminution: Energy efficiency considerations. *Mineral Engineering 21* , 613-620.
- Velázquez, A. L., Menéndez-Aguado, J. M., & Brown, R. L. (2008). Grindability of Lateritic Nickel Ores in Cuba. *Powder Technology 182* , 113-115.
- Weiss, N. L. (1985). *SME Mineral Processing Handbook Volume 1*. New York: Society of Mining Engineers.
- Weiss, N. L. (1985). *SME Mineral Processing Handbook Volume 2*. Nova York: Society of Mining Engineers.
- Yan, D., & Gupta, A. (2006). *Mineral Processing Design and Operation: An Introduction*. Amsterdam: Elsevier.

Normas

Instituto Português da Qualidade, NP EN 14157 Resistência ao Desgaste (CAPON), 2007.

European Committee for Standardization, EN 1936 Natural stone testing methods – Determination of real density and apparent density, and total and open porosity, 2006.

ASTM International, D 5731 Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock, 2002

European Committee for Standardization, En 1926 Determination of Uniaxial Compressive Strength, 2006.

Sites da Internet

Https://www.youtube.com/watch?v=dQNpSa-bq4M, consultado em 01/08/2015

Https://www.youtube.com/watch?v=qlxAJEv0oP8, consultado em 01/08/2015

Https://www.youtube.com/watch?v=CJGK-owmqSM, consultado em 01/08/2015

Https://www.youtube.com/watch?v=1Muw5jn8wxg, consultado em 01/08/2015

Https://www.youtube.com/watch?v=TLlzToelpGc, consultado em 01/08/2015

Doering International, Grinding Media Size Formula, [http://www.doering-](http://www.doering-sinn.de/fileadmin/download/mahlkoerper/Mahlkoerperformel_nach_Bond_en.pdf)

sinn.de/fileadmin/download/mahlkoerper/Mahlkoerperformel_nach_Bond_en.pdf, consultado em 07/06/2015.

Tenova, Tenova Bateman Mills (SAG, AG, Rod, Ball), [http://www.tenova.com/pdf/brochure/78-](http://www.tenova.com/pdf/brochure/78-SAG,%20AG,%20Rod,%20Ball%20Mills.pdf)

SAG,%20AG,%20Rod,%20Ball%20Mills.pdf, consultado em 17/03/2015

Https://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/01/mincarb/oconnor.pdf, consultado em 08/06/2015.

Http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/01/mincarb/oconnor.pdf, W.K. O'Connor, D.C. Dahlin, D.N Nilsen,

G.E. Rush, S.J. Gerdemann, R.P. Walters, e P.C. Turner, 2001, consultado em 05/08/2015

Doering International, Grinding Media Size Formula, [http://www.doering-](http://www.doering-sinn.de/fileadmin/masterTemplate/Resources/Public/JavaScript/rechner/Mahlkoerperformel_nach_Bond_en.pdf)

sinn.de/fileadmin/masterTemplate/Resources/Public/JavaScript/rechner/Mahlkoerperformel_nach_Bond_en.pdf,

consultado em 05/08/2015.

Leite, Mário Rui Machado, Moura A. Casal, Produto/ Rochas Ornamentais Portuguesas

<http://rop.lneg.pt/rop/index.php>. Consultado em 15/ 04/ 2014

Índice de anexos

Anexo I: Resultados da análise de regressão linear múltipla com três variáveis independentes

Anexo I

Resultados da análise de regressão linear múltipla
com três variáveis independentes

WI versus PA, MV, e RP				
SUMÁRIO DOS RESULTADOS				
Estatística de regressão			Coefficientes	Valor P
R múltiplo	0.768	Interceptar	53.954	0.543
Quadrado de R	0.590	Porosidade aberta (%)	-0.979	0.518
Quadrado de R ajustado	-0.025	Massa volúmica aparente (kg/m3)	-17.743	0.578
Erro-padrão	5.991	Resistência à carga pontual (N/mm2)	0.327	0.313
Observações	6.000			
Regressão	F de significância	0.547		

WI versus PA, MV, e RC				
SUMÁRIO DOS RESULTADOS				
Estatística de regressão			Coefficientes	Valor P
R múltiplo	0.647	Interceptar	137.875	0.364
Quadrado de R	0.418	Porosidade aberta (%)	-1.723	0.385
Quadrado de R ajustado	-0.454	Massa volúmica aparente (kg/m3)	-48.267	0.410
Erro-padrão	7.137	Resistência à compressão (kg/cm2)	0.006	0.500
Observações	6.000			
Regressão	F de significância	0.730		

WI versus PA, MV, e CP				
SUMÁRIO DOS RESULTADOS				
Estatística de regressão			Coefficientes	Valor P
R múltiplo	0.498	Interceptar	52.504	0.716
Quadrado de R	0.248	Porosidade aberta (%)	-0.896	0.732
Quadrado de R ajustado	-0.879	Massa volúmica aparente (kg/m3)	-11.631	0.838
Erro-padrão	8.112	Capon (mm)	-0.170	0.822
Observações	6.000			
Regressão	F de significância	0.876		

WI versus PA, RP, e RC				
SUMÁRIO DOS RESULTADOS				
Estatística de regressão			Coefficientes	Valor P
R múltiplo	0.820	Interceptar	7.681	0.443
Quadrado de R	0.672	Porosidade aberta (%)	-0.672	0.492
Quadrado de R ajustado	0.180	Resistência à carga pontual (N/mm2)	0.509	0.205
Erro-padrão	5.358	Resistência à compressão (kg/cm2)	-0.005	0.415
Observações	6.000			
Regressão	F de significância	0.449		

WI versus PA, RP, e CP				
SUMÁRIO DOS RESULTADOS				
<i>Estatística de regressão</i>			<i>Coefficientes</i>	<i>Valor P</i>
R múltiplo	0.712	Interceptar	2.273	0.928
Quadrado de R	0.507	Porosidade aberta (%)	-0.376	0.722
Quadrado de R ajustado	-0.232	Resistência à carga pontual (N/mm ²)	0.376	0.399
Erro-padrão	6.569	Capon (mm)	0.081	0.890
Observações	6.000			
Regressão	<i>F de significância</i>			
				0.639

WI versus PA, RC, e CP				
SUMÁRIO DOS RESULTADOS				
<i>Estatística de regressão</i>			<i>Coefficientes</i>	<i>Valor P</i>
R múltiplo	0.483	Interceptar	22.559	0.278
Quadrado de R	0.233	Porosidade aberta (%)	-0.380	0.791
Quadrado de R ajustado	-0.917	Resistência à compressão (kg/cm ²)	0.001	0.920
Erro-padrão	8.194	Capon (mm)	-0.279	0.625
Observações	6.000			
Regressão	<i>F de significância</i>			
				0.887

WI versus MV, RP, e RC				
SUMÁRIO DOS RESULTADOS				
<i>Estatística de regressão</i>			<i>Coefficientes</i>	<i>Valor P</i>
R múltiplo	0.881	Interceptar	-94.590	0.316
Quadrado de R	0.776	Massa volúmica aparente (kg/m ³)	39.002	0.297
Quadrado de R ajustado	0.441	Resistência à carga pontual (N/mm ²)	0.803	0.128
Erro-padrão	4.425	Resistência à compressão (kg/cm ²)	-0.012	0.237
Observações	6.000			
Regressão	<i>F de significância</i>			
				0.316

WI versus MV, RP, e CP				
SUMÁRIO DOS RESULTADOS				
<i>Estatística de regressão</i>			<i>Coefficientes</i>	<i>Valor P</i>
R múltiplo	0.688	Interceptar	9.819	0.871
Quadrado de R	0.473	Massa volúmica aparente (kg/m ³)	-3.747	0.884
Quadrado de R ajustado	-0.317	Resistência à carga pontual (N/mm ²)	0.411	0.409
Erro-padrão	6.792	Capon (mm)	0.099	0.883
Observações	6.000			
Regressão	<i>F de significância</i>			
				0.675

WI versus MV, RC, e CP				
SUMÁRIO DOS RESULTADOS				
Estatística de regressão			Coefficientes	Valor P
R múltiplo	0.445	Interceptar	19.920	0.855
Quadrado de R	0.198	Massa volúmica aparente (kg/m3)	0.736	0.988
Quadrado de R ajustado	-1.004	Resistência à compressão (kg/cm2)	0.001	0.900
Erro-padrão	8.378	Capon (mm)	-0.317	0.623
Observações	6.000			
Regressão	F de significância	0.912		

WI versus RP, RC, e CP				
SUMÁRIO DOS RESULTADOS				
Estatística de regressão			Coefficientes	Valor P
R múltiplo	0.812	Interceptar	-11.601	0.657
Quadrado de R	0.659	Resistência à carga pontual (N/mm2)	0.791	0.242
Quadrado de R ajustado	0.148	Resistência à compressão (kg/cm2)	-0.006	0.398
Erro-padrão	5.462	Capon (mm)	0.423	0.521
Observações	6.000			
Regressão	F de significância	0.465		