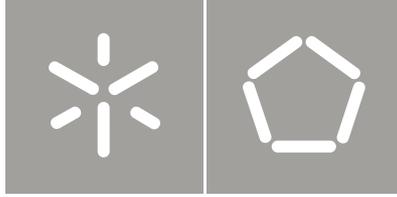




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruno Manuel Cardoso Ramos

Construção de Bases de Dados para a
Previsão das Propriedades Mecânicas dos
Granitos



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruno Manuel Cardoso Ramos

Construção de Bases de Dados para a
Previsão das Propriedades Mecânicas dos
Granitos

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação da
Professora Doutora Graça Fátima Moreira Vasconcelos

e coorientação do:
Professor Doutor Tiago Filipe da Silva Miranda

Agradecimentos

A presente dissertação é o culminar de aproximadamente um ano de trabalho e marca a etapa final dum ciclo de estudos de mais de cinco anos. A sua realização não seria possível sem a contribuição de um conjunto de pessoas que nesta secção serão alvo do meu sincero agradecimento.

A primeira pessoa a quem presto o meu agradecimento é a Professora Graça Vasconcelos, orientadora científica desta tese, pelos meios disponibilizados para que este trabalho fosse possível, transmissão de conhecimento, dedicação constante, rigor na análise do trabalho e sobretudo pelas palavras de incentivo e tranquilidade que me transmitiu nas alturas em que surgiram contrariedades e quando duvidei de que iria conseguir cumprir o prazo de entrega.

Ao Professor Tiago Miranda, coorientador científico desta tese, pela transmissão de conhecimento, empenho, sentido crítico e motivador com que sempre abordou o presente trabalho.

Ao Sr. Roriz, por ter disponibilizado e aceitado que fossem realizados ensaios no edifício estudado no presente trabalho.

À Arq. Sofia Castro, pela disponibilidade e forma célere com que partilhou e respondeu a todas as questões que coloquei acerca do edifício.

Aos donos e funcionários da empresa *Artecanter* pela disponibilidade que demonstraram.

Aos funcionários do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, nomeadamente o Sr. Matos, Carlos Jesus e Carlos Palha pela ajuda na operação e/ou reparação dos vários equipamentos que foram utilizados.

À Betânia e à Inês, pelo auxílio e boa vontade demonstrada quando foram solicitadas.

Ao Luís e ao Paulo, pela ajuda nos ensaios in-situ e sobretudo pela amizade.

Aos meus pais e irmã, pelo amor que sempre me transmitem e por me fazerem acreditar quando às vezes duvido de mim próprio. Tudo que fiz e sempre faço, faço-o por vocês.

Resumo

O principal objetivo do presente trabalho é a utilização de técnicas de Data Mining (DM) na previsão das propriedades mecânicas dos granitos. Este objetivo pretende responder às dificuldades encontradas na caracterização mecânica direta dos granitos presentes em edifícios antigos, nomeadamente devido à impossibilidade de extração de provetes para posterior análise laboratorial.

Foi executada uma campanha experimental que abrangeu duas técnicas não destrutivas designadamente: (1) medição da velocidade de propagação de ultrassons (*VPU*) e (2) Martelo de Schmidt (MS). Estas duas técnicas foram aplicadas em diferentes tipos de granito com condições superficiais próximas das dos granitos encontrados em construções de pedra; (1) granito de um edifício de habitação e (2) blocos de diferentes tipos de granito retirados diretamente de pedreiras sem tratamento superficial. Posteriormente, estes blocos foram retificados para obtenção de superfícies lisas de modo que fosse possível comparar os resultados dos ensaios não destrutivos (END) em diferentes tipos de superfície. Desta campanha foi verificada com sucesso a eficácia da técnica de ultrassons na deteção da anisotropia dos granitos, ao contrário do MS, que se revelou ineficaz na mesma tarefa. Adicionalmente, verificou-se a eficácia de ambas as técnicas na avaliação do estado de desgaste dos granitos.

Provetes cilíndricos extraídos dos granitos estudados sob a forma de blocos foram submetidos a ensaios laboratoriais com vista à obtenção das propriedades físicas, mecânicas e índices não destrutivos (IND).

Entre as diferentes propriedades mencionadas foram analisadas as suas respetivas relações.

Três bases de dados foram construídas com base em propriedades físicas e mecânicas obtidas num estudo anterior num conjunto diferenciado de granitos. Estas serviram como plataforma de aplicação de três técnicas de DM para a previsão de três propriedades mecânicas, nomeadamente a resistência à compressão (f_c), resistência à tração (f_t) e módulo de elasticidade (E). Globalmente, os modelos construídos apresentaram uma boa capacidade de previsão

Palavras-chaves: Granitos, Velocidade de Propagação de Ultrassons (*VPU*), Martelo de Schmidt (MS), Data Mining (DM), Propriedades Mecânicas.

Abstract

The main objective of the present work is the use of Data Mining (DM) techniques to predict the mechanical properties of granites. This objective intended to answering to the difficulties found on mechanical properties characterization of granites applied on ancient buildings, namely due the impossibility of extraction of samples for further laboratorial analysis.

An experimental campaign was carried out using two non-destructive techniques (NDT), namely: (1) ultrasonic pulse velocity (*UPV*) and (2) the Schmidt Hammer (SH). These two non-destructive techniques were applied in different types of granites with surface features close to the one found in granites applied in ancient constructions, namely in (1) granite blocks of an existing building and (2) blocks of distinct types of granites coming directly from different quarries without superficial treatment. Furthermore, the blocks were swan for obtaining plain surfaces in such way that a comparison of non-destructive techniques could be compared in different types of surfaces. In this campaign the good performance of the ultrasonic technique was found on the detection of anisotropy, contrarily to the SH technique, which was not efficient in detecting anisotripy. Additionally, a good performance was achieved in both techniques on the evaluation of the state of weathering and wearing of surfaces.

Cylindrical samples extracted from the granite blocks were subjected to a laboratorial campaign which intended to obtain the physical and mechanical properties and also non-destructive indexes (NDI).

The relation between the different properties mentioned above was analyzed.

Three databases were built based on a previous mechanical characterization study of different types of granites. Using the information present in those databases three different DM techniques were applied aiming the prediction of three mechanical properties, namely the compressive strength (f_c), tensile strength (f_t) and the elastic modulus (E). Globally, the models showed a good performance.

Keywords: Granites, Ultrasonic Pulse Velocity (*UPV*), Schmidt Hammer (SH), Data Mining (DM), Mechanical Properties.

Conteúdo

1	ENQUADRAMENTO	1
1.1	Problemática	1
1.2	Objetivos	4
1.3	Métodos de abordagem	4
1.4	Organização do documento	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Ensaio não destrutivo	7
2.1.1	Martelo de Schmidt	8
2.1.2	Ultrassons	10
2.1.3	Tamanho e dimensões das amostras	12
2.2	Resultados existentes na literatura	13
2.2.1	Correlações entre o valor de ressalto do MS com o índice de “impact strength” e a velocidade das ondas P em Rochas	13
2.2.2	Previsão das propriedades mecânicas dos granitos por meio da medição da velocidade dos ultrassons e do valor de ressalto do MS	15
2.2.3	Outras correlações por vários autores existentes na literatura	17
2.3	Data Mining	18
2.3.1	Aplicações do DM	20
2.3.2	Métodos de DM	20
2.3.3	Avaliação dos modelos	26
3	AValiação NÃO DESTRUTIVA	29
3.1	Introdução	29
3.2	Caso real	30
3.2.1	Procedimentos de ensaio	33
3.2.2	Análise de resultados	38
3.3	Blocos de granito	44
3.3.1	Procedimentos de ensaio	49
3.3.2	Análise dos resultados	54
3.4	Conclusões	73

4	ENSAIOS LABORATORIAIS	77
4.1	Introdução	77
4.2	Medição da <i>VPU</i> em provetes	78
4.3	Caraterização física	81
4.4	Comportamento à compressão	87
4.4.1	Modos de rotura	88
4.4.2	Diagramas tensão-extensão	90
4.4.3	Parâmetros mecânicos	93
4.5	Relação entre propriedades físicas e mecânicas	95
4.5.1	Relação entre a <i>VPU</i> e as propriedades mecânicas obtidas através do ensaio de compressão uniaxial	97
4.5.2	Relação entre a <i>n</i> e a resistência à compressão	98
4.6	Conclusões	99
5	BASE DE DADOS	101
5.1	Introdução	101
5.2	Análise e preparação dos dados	102
5.3	Modelação e avaliação	107
5.4	Modelos de previsão	109
5.4.1	Modelos de previsão: f_c	109
5.4.2	Modelos de previsão: f_t	133
5.4.3	Modelos de previsão: E	141
5.5	Validação dos Modelos	159
5.5.1	Validação: amostras secas	160
5.5.2	Validação: valores médios	164
5.6	Conclusões	168
6	CONCLUSÕES	173
6.1	Sumário e principais contribuições	173
6.2	Trabalhos Futuros	177
7	Bibliografia	181
	ANEXOS	187

Lista de Figuras

1 ENQUADRAMENTO

- 1.1 Fluxograma com a metodologia para intervenções estruturais (Lourenço, 2005) 3

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Secção longitudinal do MS do Tipo N (Nepomuceno, 1999) 10
- 2.2 Disposição dos transdutores no ensaio de ultrassons (Vasconcelos, 2005) . . 11
- 2.3 Processo de DCBD segundo Fayyad *et al.* (Cruz, 2007) 19
- 2.4 Funcionamento das RNA 24
- 2.5 Exemplo de transformação MVS (adaptado de Martins *et al.*, 2012) 25

3 AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA

- 3.1 Localização do edifício em estudo (realce a vermelho) 30
- 3.2 Vista do alçado sul com o anexo em granito do lado esquerdo em contraste com a construção original do lado direito 31
- 3.3 Esquema da malha de pontos utilizado na face G 33
- 3.4 Faces interiores *vs.* faces exteriores 33
- 3.5 Exemplo do posicionamento dos transdutores na medição indireta (EN12504-4, 2004) 34
- 3.6 Aparelho de ultrassons utilizado nos ensaios da casa de Guimarães (MA-TEST) 35
- 3.7 Exemplo da representação gráfica para a obtenção da velocidade média da onda na configuração indireta 36
- 3.8 Esclerómetro tipo NR 37
- 3.9 *VP*U indireta nas faces das pedras de granito 38
- 3.10 Disposição dos granitos exteriores ensaiados (pormenor adaptado do desenho do alçado sul fornecido pela Arq. Sofia Castro) 39
- 3.11 Progresso do valor de resalto em termos médios ao longo de impactos sucessivos nas faces de granito interiores 43

3.12	Progresso do valor de ressalto em termos médios ao longo de impactos sucessivos nas faces de granito exteriores	44
3.13	Blocos não retificados	45
3.14	Pormenor dos quatros tipos de granito seleccionados	46
3.15	Granito amarelo de Guimarães não retificado com face visivelmente degradada	48
3.16	Pormenores faces não retificadas	49
3.17	Retificação dos blocos de granitos	50
3.18	Blocos de granito com face retificada	50
3.19	Aparelho de ultrassons utilizado nos ensaios em blocos de granito	51
3.20	Calibração do <i>Pundit Lab</i> por meio de uma barra com tempo de propagação conhecido	52
3.21	Ensaio de medição da propagação de ultrassons	53
3.22	Equipamento e operação do MS	54
3.23	Direção da propagação ultrassónica para cada uma das configurações de medição e tipos de granito (amarelos à esquerda e azuis à direita)	55
3.24	Medição direta da <i>VPU</i> em blocos não retificados com a indicação da direção do respetivo plano de desmonte	58
3.25	Medição direta da <i>VPU</i> em blocos retificados com a indicação da direção do respetivo plano de desmonte	58
3.26	Medição indireta da <i>VPU</i> em blocos não retificados com a indicação da direção do respetivo plano de desmonte	62
3.27	Medição indireta da <i>VPU</i> em blocos retificados com a indicação da direção do plano de desmonte	62
3.28	<i>VPU</i> direta <i>vs.</i> <i>VPU</i> indireta obtidas em blocos de granito não retificados	63
3.29	<i>VPU</i> direta <i>vs.</i> <i>VPU</i> indireta obtidos em blocos de granito retificados	64
3.30	Progresso do valor de ressalto na face 1 não retificada: Granito amarelo Guimarães	66
3.31	Progresso do valor de ressalto ao longo de dez impactos nos quatros blocos de granitos não retificados	66
3.32	Progresso do valor de ressalto ao longo de dez impactos nos quatros blocos de granitos retificados	67
3.33	Progressão do valor de ressalto de Schmidt: Bloco retificados <i>vs.</i> não retificado	68

4 ENSAIOS LABORATORIAIS

4.1	Valores médios da <i>VPU</i> direta em provetes secos com a indicação da direção do respetivo plano de desmonte	80
4.2	Pórtico utilizado no ensaio de compressão uniaxial	87

4.3	Esquema de medição das deformações do provete ao longo do ensaio de compressão uniaxial	88
4.4	Processo de fratura à compressão do granito amarelo de Guimarães	88
4.5	Processo de fratura à compressão do granito de Gonça	89
4.6	Processo de fratura à compressão do granito azul de Guimarães	89
4.7	Processo de fratura à compressão do granito de Gondomar	90
4.8	Diagrama tensão-extensão: Granito amarelo de Guimarães	91
4.9	Diagrama tensão-extensão: Granito de Gonça	91
4.10	Diagrama tensão-extensão: Granito azul de Guimarães	92
4.11	Diagrama tensão-extensão: Granito de Gondomar	92
4.12	Comparação das curvas de tensão-deformação de uma rocha dura e de uma rocha branda (http://paginas.fe.up.pt/geng/ge/ge_dPontamentos.htm)	93
4.13	Relação entre a VPU e os parâmetros mecânicos (valores médios)	97
4.14	Relação entre a VPU e os parâmetros mecânicos (provetes)	98
4.15	Relação entre n e f_c	99

5 BASE DE DADOS

5.1	Exemplo da aplicação da biblioteca Rminer em ambiente R	107
5.2	Importância relativa (%) das variáveis de previsão para f_c nos modelos de DM (amostras secas)	111
5.3	Relação entre os valores de teste f_c medidos e estimados para a combinação 12 (amostras secas)	118
5.4	Relação entre os valores de teste f_c medidos e estimados pelo modelo MVS para a combinação 9 (amostras secas)	118
5.5	Importância relativa (%) das variáveis de previsão para f_c nos modelos de DM (valores médios)	122
5.6	Diferença entre o valor de f_c medido e estimado pelos modelos na combinação 29 (valores médios)	130
5.7	Valor estimado pelo modelo RNA na combinação 14 (valores médios)	131
5.8	Importância relativa (%) das variáveis na previsão para f_t nos modelos de DM (tração)	134
5.9	Relação entre os valores de teste f_t medidos e estimados para a combinação 14 (tração)	139
5.10	Relação entre os valores de teste f_t medidos e estimados para a combinação 15 (tração)	140
5.11	Importância relativa (%) das variáveis de previsão para E nos modelos de DM (amostras de secas)	142
5.12	Relação entre os valores de teste E medidos e estimados pelos modelos para a combinação 1 (amostras secas)	146

5.13	Relação entre os valores de teste E medidos e estimados pelo modelo RNA para a combinação 2 (amostras secas)	147
5.14	Relação entre os valores de teste E medidos e estimados pelo modelo RM para a combinação 3 (amostras secas)	147
5.15	Relação entre os valores de teste E medidos e estimados pelo modelo MVS para a combinação 4 (amostras secas)	148
5.16	Importância relativa (%) das variáveis para previsão para previsão de E nos modelos de DM (valores médios)	150
5.17	Relação entre todos os valores de E medidos e estimados pelo modelo RNA para a combinação 14 (valores médios)	155
5.18	Relação entre todos os valores E medidos e estimados pelos modelos para a combinação 13 (valores médios)	156
5.19	Relação entre todos os valores de E medidos e estimados pelo modelo RNA para a combinação 7 (valores médios)	157
5.20	Relação entre todos os valores E medidos e estimados pelos modelos para a combinação 5 (valores médios)	157
5.21	Relação entre os valores de teste f_c medidos e estimados pelos modelos para a combinação 7 (amostras secas: validação)	161
5.22	Relação entre os valores de teste f_c medidos e estimados pelo modelo MVS na combinação 8 (amostras secas: validação)	162
5.23	Relação entre os valores de teste f_c medidos e estimados pelo modelo RNA para a combinação 12 (amostras secas: validação)	162
5.24	Relação entre os valores de teste E medidos e estimados pelo modelo RM (amostras secas: validação)	164
5.25	Valores de f_c de teste estimados pelo modelo MVS (valores médios: validação)	166
5.26	Valores de f_c de teste estimados para a combinação 20 (valores médios: validação)	166
5.27	Relação entre os valores de teste E medidos e estimados pelo modelo MVS na combinação 10 (valores médios: validação)	167
5.28	Valores de f_c de teste estimados pelo modelo RM (valores médios: validação)	168

Lista de Tabelas

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Resultados das diferentes propriedades das rochas (adaptado de Sharma *et al.*, 2010) 14
- 2.2 Relações do valor de ressalto do MS com valores de resistência à compressão e módulo de Young (Adaptado de Aydin *et al.*, 2005) 18
- 2.3 Exemplo de Matriz de Confusão (adaptado de Cruz, 2007) 26

3 AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA

- 3.1 Dimensão da malha em cada face 32
- 3.2 *VPU* indireta nas faces das pedras de granito (transdutores de 55 kHz) . . 38
- 3.3 Valores médios de ressalto de Schmidt 42
- 3.4 Valores médios de ressalto de Schmidt obtidos segundo as normas ISRM e ASTM 44
- 3.5 Dimensões aproximadas dos blocos não retificado em análise 47
- 3.6 Medição direta: Valores médios da *VPU* em blocos não retificados (transdutores de 54 kHz) 56
- 3.7 Medição direta: Valores médios da *VPU* em blocos retificados (transdutores de 54 kHz) 57
- 3.8 Medição indireta: Valores médios da *VPU* em blocos não retificados (transdutores de 54 kHz) 60
- 3.9 Medição indireta: Valores médios da *VPU* em blocos retificados (transdutores de 54 kHz) 61
- 3.10 Valores médios de ressalto de Schmidt obtidos em blocos não retificados . . 69
- 3.11 Valores médios de ressalto de Schmidt obtidos segundo as normas ISRM e ASTM em blocos não retificados 70
- 3.12 Valores médios de ressalto de Schmidt obtidos em blocos retificados 71
- 3.13 Valores médios de ressalto de Schmidt obtidos segundo as normas ISRM e ASTM em blocos retificados 72

4 ENSAIOS LABORATORIAIS

4.1	Medição direta da VP_{150} em provetes secos em m/s	80
4.2	Propriedades físicas do granito amarelo de Guimarães. CV entre parêntesis (%)	83
4.3	Propriedades físicas do granito azul de Guimarães. CV entre parêntesis (%)	84
4.4	Propriedades físicas do granito de Gonça. CV entre parêntesis (%)	85
4.5	Propriedades físicas do granito de Gondomar. CV entre parêntesis (%) . .	86
4.6	Propriedades mecânicas em compressão dos quatros granitos. CV entre parêntesis (%)	96

5 BASE DE DADOS

5.1	Parâmetros presentes na base de dados de compressão em amostras secas .	103
5.2	Parâmetros presentes na base de dados de valores médios	104
5.3	Parâmetros presentes na base de dados de tração	105
5.4	Algumas estatística dos dados da base de dados de compressão em amostras secas	105
5.5	Algumas estatísticas dos dados da base de dados de valores médios	106
5.6	Algumas estatísticas dos dados da base de dados de tração	106
5.7	Combinações de parâmetros de entrada para a previsão de f_c (amostras secas)	110
5.8	Métricas globais para todas as combinações no modelo MR (f_c : amostras secas)	114
5.9	Métricas globais para todas as combinações no modelo RNA (f_c : amostras secas)	114
5.10	Métricas globais para todas as combinações no modelo MVS (f_c : amostras secas)	115
5.11	Declive da linha de tendência (a), valor da ordenada na origem (b) e R^2 entre os valores medidos e estimados de f_c (amostras secas)	116
5.12	Combinações de parâmetros de entrada para a previsão de f_c (valores médios)	120
5.13	Variáveis mais importantes ao longo das combinações para os modelos de DM na previsão de f_c (valores médios)	123
5.14	Métricas globais para todas as combinações no modelo RM (f_c : valores médios)	125
5.15	Métricas globais para todas as combinações no modelo RNA (f_c : valores médios)	126
5.16	Métricas globais para todas as combinações no modelo MVS (f_c : valores médios)	127
5.17	Declive da linha de tendência (a), ordenada na origigem (b) e R^2 entre o valores medidos e estimados de f_c (valores médios)	128
5.18	Combinações de parâmetros de entrada para a previsão de f_t (tração) . . .	133

5.19	Métricas globais para todas as combinação no modelo MR (f_t : tração) . . .	135
5.20	Métricas globais para todas as combinações no modelo RNA (f_t : tração) . . .	136
5.21	Métricas globais para todas as combinações no modelo MVS (f_t : tração) . . .	136
5.22	Declive da linha de tendência (a), ordenada na origem (b) e R^2 os entre os valores medidos e estimados de f_t (tração)	138
5.23	Combinações de parâmetros de entrada para a previsão de E (amostras secas)	142
5.24	Métricas globais para todas as combinações no modelo RM (E : amostras secas)	143
5.25	Métricas globais para todas as combinações no modelo RNA (E : amostras secas)	143
5.26	Métricas globais para todas as combinações no modelo MVS (E : amostras secas)	144
5.27	Declive da linha de tendência (a), ordenada na origem (b) e R^2 entre os valores medidos e estimados de E (amostras secas)	145
5.28	Combinações de parâmetros de entrada para a previsão de E (valores médios)	149
5.29	Métricas globais para todas as combinações no modelo RM (E : valores médios)	152
5.30	Métricas globais para todas as combinações no modelo RNA (E : valores médios)	152
5.31	Métricas globais para todas as combinações no modelo MVS (E : valores médios)	153
5.32	Declive da linha de tendência (a), ordenada na origem (b) e R^2 entre os valores medidos e estimados de E (valores médios)	154
5.33	Algumas estatísticas dos dados adicionados à base de dados de teste (amostras secas: validação)	160
5.34	Valor da linha de tendência (a), valor da ordenada na origem (b) e R^2 entre os valores medidos e estimados de f_c para o conjunto de teste (amostras secas: validação)	160
5.35	Valor da linha de tendência (a), valor da ordenada na origem (b) e R^2 entre os valores medidos e estimados de E para o conjunto de teste (amostras secas: validação)	163
5.36	Valor da linha de tendência (a), valor da ordenada na origem (b) e R^2 entre os valores medidos e estimados de f_c para o conjunto de teste (validação: valores médios)	165
5.37	Valor da linha de tendência (a), valor da ordenada na origem (b) e R^2 entre os valores medidos e estimados de E para o conjunto de teste (valores médios: validação)	167

Capítulo 1

ENQUADRAMENTO

1.1 Problemática

A reabilitação e reparação de edifícios é um tema que tem sido alvo de uma crescente preocupação, não só por parte das instituições ligadas à preservação do património histórico e cultural como de toda a sociedade.

Um dos principais desafios que esta temática levanta é a inspeção dos edifícios, que inclui a deteção de zonas danificadas, fendilhação e defeitos e a caracterização mecânica dos materiais. No caso particular de análise a construções mais antigas surgem dificuldades como a variabilidade das propriedades dos materiais tradicionais, diferentes técnicas de construção, complexidade da sua geometria, inexistência de normas aplicáveis e os elevados custos de inspeção. Aliado a estes fatores, em edifícios de maior valor histórico e cultural existem limitações no que concerne à extração de provetes para posterior análise laboratorial, o que resulta numa informação limitada acerca das propriedades dos materiais usados na sua construção.

De forma a contrariar estas dificuldades é imperativo que se apliquem e melhorem técnicas não destrutivas no diagnóstico do real estado das estruturas, assim como na previsão de patologias futuras. Neste domínio têm-se registado avanços significativos no desenvolvimento e aplicação de ensaios não destrutivos (END) para inspeção de estruturas e materiais (Vasconcelos, 2005).

Um dos materiais naturais de eleição nos edifícios antigos é a pedra e apresenta-se como um material natural de eleição do Homem dado a sua disponibilidade e o facto de esta poder ser empregue como material de construção sem que ocorram alterações significativas do seu estado natural.

A história da Humanidade dá-nos a conhecer vários exemplos de construções em pedra. As primeiras grandes construções em blocos de pedra, denominados de monumentos megalíticos, são datadas do ano 3000 a.C.. Posteriormente são famosos exemplos como as pirâmides de Quéops, a Acrópole de Atenas, a Muralha da China entre outros.

Com o passar dos séculos a utilização da pedra tornou-se ainda mais recorrente e foi expandida à construção de pontes, edifícios públicos, canais e catedrais. Na Europa, durante a Idade Média foram construídos edifícios emblemáticos como a Catedral de Notre-Dame, o Castelo de Liechtenstein, a Catedral de Colónia, o Mosteiro de Santa Maria da Vitória entre muitos outros.

Contudo, a sua fraca capacidade a esforços à tração e a necessidade de explorar novos tipos estruturais aliada ao surgimento do betão e do metal fez com que a sua utilização fosse decaindo a partir do século XX.

Apesar de inicialmente as regras de “cálculo” serem baseadas na experiência, na prática de edificar e na visualização do “comportamento estrutural” (Gouveia *et al.*, 2007) ainda hoje são visíveis vários exemplos de construções em pedra. Muitos deles por apresentarem sinais notórios de degradação foram sujeitos a reabilitações. O conceito de reabilitação de edifícios é uma preocupação secular que remonta à época do Renascimento, onde Alberti (1404-1472) estabelece as primeiras ideias de intervenção em edifícios. Contudo, só no início do século XX, com as chamadas “Cartas de Património”, é que se pode afirmar que foi definido o conceito de conservação e restauro do património edificado (Pimentel *et al.*, 2005).

Em Portugal os primeiros sinais de interesse com a conservação e reabilitação de edifícios surgiram durante o regime do Estado Novo. No entanto, essa preocupação recaía sobretudo na defesa do património histórico monumental. Foi apenas no final dos anos 70 do século passado, com o surgimento do Programa para a Recuperação de Imóveis Degradados (PRID-Decreto-Lei nº704/76), que essa preocupação passou a ter uma vertente pública (Pimentel *et al.*, 2005). Este programa foi decretado devido à crescente preocupação nesta temática, assim como a necessidade de recuperar edifícios numa vertente estética, para que esses se pudessem integrar do ponto de vista urbano.

Nos dias de hoje a reabilitação de edifícios revela-se cada vez mais importante no âmbito da construção em Portugal. Estimativas publicadas pela Euroconstruct em 2005 mostram que a atividade de reabilitação de edifícios representa na Europa, em média, cerca de 44.8% do volume total de investimento na área da Construção, enquanto para o caso português as estimativas apontam para valores da ordem dos 23%.

Apesar de Portugal apresentar valores relativamente baixos regista-se um crescimento comparativamente com estimativas anteriores, que apontavam para valores na ordem do 6 a 10% (Pereira, 2006).

Com base em valores apresentados pelo Censo 2001, existem por volta de 800 000 fogos com necessidade de obras de recuperação, onde cerca de 325 000 se encontram degradados ou muito degradados. Devido a esta necessidade, atualmente a indústria vê-se obrigada a investir em investigação e desenvolvimento, recorrendo em muitos casos a uma interatividade com Universidades, organismos técnicos oficiais e a profissionais na área da arquitetura e engenharia (Pereira, 2006).

Por sua vez, o ICOMOS que é uma organização não-governamental internacional dedicada à conservação, proteção e valorização dos monumentos, conjuntos e sítios de todo o mundo, recomendam uma metodologia (Figura 1.1) que o projetista deve seguir para intervenções no património construído. Nesta podemos observar a necessidade de adotar um processo interativo, entre as etapas de aquisição de dados, comportamento estrutural, diagnóstico e segurança (Lourenço, 2005).

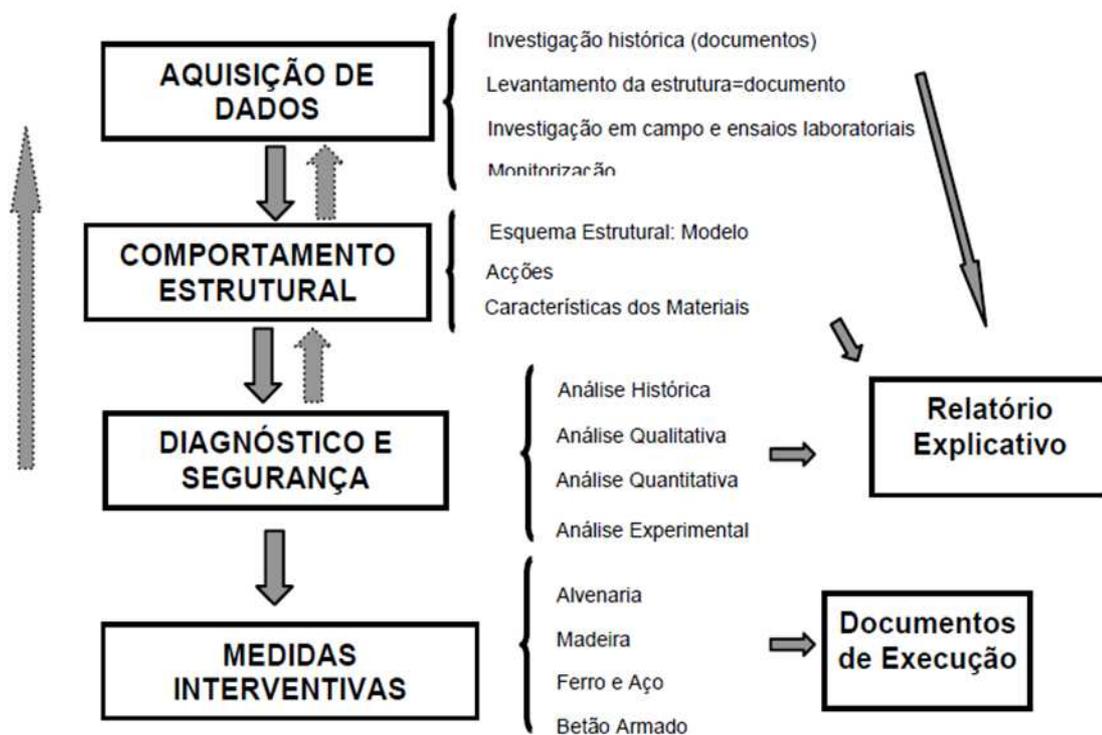


Figura 1.1: Fluxograma com a metodologia para intervenções estruturais (Lourenço, 2005)

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como principais objetivos:

1. Avaliação do desempenho de duas técnicas não destrutivas, designadamente a técnica de ultrassons e Martelo de Schmidt (MS), na:
 - (a) Estimativa das propriedades mecânicas dos materiais constituintes de alvenaria, nomeadamente o granito com base em índices obtidos através de END. Esta avaliação revela-se fundamental devido à dificuldade na extração de carotes para caracterização direta das propriedades mecânicas;
 - (b) Detecção da anisotropia dos granitos;
 - (c) Obtenção de relações entre medição de propagação de ultrassons com configuração direta e indireta;
 - (d) Avaliação das condições superficiais nos resultados obtidos nos END.
2. Fornecimento de recomendações para a utilização dos END em edifícios antigos, dado que existem frequentemente dificuldades de aplicação das técnicas não destrutivas em condições reais dos edifícios;
3. Definição de uma base de dados que reúna informação sobre os índices não destrutivos (IND) e correlações entre as propriedades mecânicas obtidas em laboratório com os IND obtidos in-situ através de métodos avançados de análise de dados;
4. Utilização da base de dados para previsão das propriedades mecânicas de granitos existentes em edifícios antigos.

1.3 Métodos de abordagem

Inicialmente foi efetuada uma pesquisa bibliográfica acerca da importância da reabilitação e dos diferentes END que foram usados nesta dissertação para a estimativa das propriedades mecânicas de granitos. Esta pesquisa bibliográfica incidiu também sobre os modelos e técnicas de Data Mining (DM) existentes e particularmente acerca das três técnicas que foram utilizadas na presente dissertação na construção de modelos de previsão.

Posteriormente foram construídas três bases de dados a partir da informação recolhida em trabalhos anteriores desenvolvidos no âmbito da aplicação dos END em granitos. Nestas foram aplicadas três técnicas de DM com o objetivo de construir modelos de previsão e avaliar a importância que cada um dos parâmetros presentes nas bases de dados tem na previsão da resistência à compressão (f_c), resistência à tração (f_t) e do módulo de

elasticidade (E).

Foram realizadas campanhas de ensaios in-situ e em laboratório com o objetivo de recolher informação acerca dos parâmetros físicos, mecânicos e IND para validação dos modelos de previsão desenvolvidos com base nas técnicas de DM.

Finalmente, com base nos modelos de previsão desenvolvidos foi feita a previsão das propriedades mecânicas dos granitos e comparada com os valores obtidos em laboratório com base nos ensaios de compressão uniaxial.

1.4 Organização do documento

O presente trabalho é constituído por 6 Capítulos, subdividindo-se em quatro estádios.

O primeiro estágio está relacionado com a apresentação do tema e a identificação da problemática, assim como as metodologias de abordagem que irão ser exploradas ao longo deste trabalho. Nesta fase são englobados dois capítulos:

- Capítulo 1: onde é feita a apresentação do tema e dos objetivos que este trabalho pretende cumprir, assim como uma breve introdução acerca da história da construção em pedra e apontamentos históricos sobre a reabilitação de edifícios.
- Capítulo 2: neste são exploradas as metodologias de abordagem do problema, assim como a revisão de estudos que apontaram em responder a problemas similares àquele que é apresentado neste trabalho.

No segundo estágio é apresentada um conjunto de campanhas in-situ e em laboratório. Neste são abrangidos os seguintes capítulos:

- Capítulo 3: onde é feita a avaliação não destrutiva dos granitos em dois casos distintos. No primeiro caso são utilizados dois END, nomeadamente o ensaio de medição da dureza superficial e o de ultrassons, aplicados na avaliação do granito inserido num edifício de habitação. Posteriormente, os ensaios realizados num caso de estudo real foram aplicados em blocos de granito no seu estado natural e após as faces serem retificadas.
- Capítulo 4: no seguimento do capítulo anterior, este descreve uma campanha laboratorial que engloba três ensaios distintos, nomeadamente o de ultrassons, porosidade e compressão uniaxial, efetuados em provetes que foram retirados dos blocos de granito com o objetivo de recolher informação acerca das propriedades físicas, mecânicas e IND em condições controladas.

O terceiro estágio é dedicado à construção de bases de dados para a previsão das propriedades mecânicas dos granitos. O capítulo referente a este estágio é o Capítulo 5. Neste são apresentadas três bases de dados distintas que serviram como plataforma de aplicação de três técnicas de DM, com o objetivo de aferir acerca do potencial destas técnicas na previsão de três parâmetros mecânicos distintos, designadamente a f_c , f_t e E , por meio de combinação de vários parâmetros presentes nas diferentes bases de dados. Posteriormente, é analisado o desempenho de cada um dos modelos construídos, assim como a utilização destes na previsão de f_c e E usando dados obtidos nas campanhas experimentais abordadas nos capítulos anteriores.

Por fim, no último estágio, onde se insere o Capítulo 6, é feita uma apreciação global acerca do presente trabalho abordando e interligando as principais conclusões feitas nos capítulos anteriores, assim como recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ensaios não destrutivos

Os ensaios não destrutivos (END) utilizados na prática da conservação e reabilitação têm a sua principal vantagem assente no facto de serem não invasivos. Os resultados obtidos por meio deste tipo de ensaios, através da definição da qualidade dos materiais, permitem a avaliação preliminar das características mecânicas dos mesmos. Segundo Binda e Saisi (2001) estes ensaios podem ser usados para:

- Detetar elementos estruturais ocultos (arcos, pilares, estruturas de pisos intermédios, etc.);
- Qualificar os materiais e caracterização das zonas de heterogeneidade;
- Avaliar a extensão dos danos mecânicos em estruturas fissuradas;
- Detetar vazios e cavidades;
- Detetar degradações superficiais;
- Avaliar algumas propriedades físicas e mecânicas dos materiais.

Das técnicas de END utilizadas podemos distinguir quatro grupos: ensaios sónicos, tomografia sónica, ensaios de radar e ensaios dinâmicos.

Os ensaios sónicos consistem em gerar um impulso ultrassónico ou impulso sonoro num determinado ponto da estrutura e por meio de um recetor, colocado noutra local da estrutura, o sinal é captado. Para estruturas contínuas com elevada homogeneidade os impulsos ultrassónicos são mais adequados. Por sua vez, os impulsos sonoros gerados por meio de dispositivos mecânicos são mais adequados para estruturas heterogéneas.

Recorrendo a este ensaio é possível verificar a existência de fendas no material contínuo, efeitos e existência de anteriores reforços, a homogeneidade das características dos materiais constituintes e fazer a estimativa do módulo de elasticidade (E) e da resistência à compressão (f_c) a partir de correlações empíricas com a velocidade da propagação das ondas sónicas (VPU) (Arede e Costa, 2002).

A tomografia sónica é uma técnica de ensaio que se baseia na anterior. A partir desta é possível obter um mapa detalhado da distribuição do som numa determinada secção plana da estrutura, verificando desta forma a integridade das estruturas em análise e determinando as suas características físicas (Oliveira, 2003).

O ensaio por radar baseia-se no uso de ondas eletromagnéticas de alta-frequência que são emitidas com impulsos muito curtos, permitindo desta forma a deteção das superfícies de separação entre materiais de natureza diferente, pois é nestas que ocorre a reflexão das ondas eletromagnéticas. Esta técnica permite determinar defeitos nos materiais que constituem a estrutura, facilitando a deteção de cavidades, juntas ou defeitos nas alvenarias. Porém, esta técnica, tal como a tomografia sónica, revela-se dispendiosa e a sua utilização deve ser direcionada apenas para casos especiais (Arede e Costa, 2002).

Por fim, a técnica de ensaios dinâmicos in-situ, para além de se revelar de grande utilidade e fiabilidade na calibração de parâmetros de comportamento global da estrutura, tem a sua crescente utilização assente na verificação da integridade da construção e comportamento estrutural. Esta técnica baseia-se na medição das frequências próprias de vibração da estrutura. Uma vez que essas frequências dependem inversamente da massa envolvida e diretamente da rigidez da estrutura, deduz-se que mantendo a massa inalterada, o controlo da frequência corresponde a um controlo indireto da rigidez (Arede e Costa, 2002).

Como no presente trabalho um dos objetivos é a estimativa das propriedades físicas e mecânicas de granitos utilizados na prática da construção, serão abordados com maior pormenor dois métodos de END:

- Método de medição da dureza superficial pelo ressalto do martelo de Schmidt (MS);
- Método de medição velocidade de propagação dos ultrassons (VPU).

2.1.1 Martelo de Schmidt

O MS tem a sua crescente popularidade e alargada área de aplicação suportadas pela sua portabilidade, facilidade de utilização e baixo custo. Através do seu uso é possível determinar a dureza de Schmidt (N) de uma determinada rocha, sendo este talvez o índice mais

usado na prática da mecânica das rochas para estimar a resistência à compressão uniaxial (UCS) e o módulo de elasticidade (E) de rocha intata, tanto em ensaios de laboratório como in-situ. Este método é também frequentemente utilizado na estimativa da UCS das paredes de descontinuidade assim como para avaliar a trabalhabilidade e facilidade de escavação e perfuração por meios mecânicos (Aydin, 2008). Contudo, importa referir que este método foi desenvolvido em 1948 por Ernst Schmidt para testar a dureza do betão de uma forma não destrutiva (Schmidt, 1951 citado por Sharma *et al.*, 2010) e só mais tarde é que foi aplicado para estimar a dureza das rochas (Cargill *et al.*, 1990 citado por Sharma *et al.*, 2010).

Recentemente Aydin e Basu uniram esforços para fazerem uma revisão crítica dos problemas comuns que surgem aquando da utilização deste método. Para isso, tiveram em conta a influência do tipo de martelo, a direção do impacto do martelo, humidade e estado de alteração da amostra. Perceberam também, que a operação dos aparelhos e os mecanismos e modos de identificação acerca do impacto do martelo eram essenciais para detetar esses problemas, determinando de que forma os dados dispersos podem ser reduzidos, assim como a definição de um aceitável ou expectável grau de dispersão (Aydin, 2008).

Neste ensaio, a dureza de um determinado material é obtida através da mensuração do ressalto de uma massa de aço, que acontece quando o martelo é percutido contra uma determinada superfície. O pistão que se encontra incorporado no martelo, que por sua vez está solidário a uma mola de carga, é automaticamente libertado da sua câmara. Assim, uma parte da energia do pistão é dissipada por absorção e transformação. A energia restante é aquela que devolve a resistência ao impacto de penetração de uma dada superfície estrutural (Teixeira, 2006). Desta forma, quanto menor for a energia libertada maior será a resistência da superfície rochosa, e, por sua vez, maior será o ressalto do pistão.

Divergindo de tipo pela quantidade de energia, existem dois tipos de martelos de Schmidt de uso comum em rochas: Tipo L e N. Importa referir que nos primeiros métodos sugeridos pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM 1978a citado por Aydin, 2008) baseavam-se apenas no Tipo L. Por sua vez a Sociedade Americana para Testes de Materiais (ASTM 2001 citado por Aydin, 2008) não faz a distinção entre os dois tipos. Relativamente a utilização deste dois tipos de martelos em ensaios de campo, Ayday e Goktan (1992) mostraram que ambos apresentam leituras bastantes semelhantes (Luzio, 2010). Contudo, o Tipo L e N de martelo, com energia de impacto de 0.735 e 2.207 Nm, respetivamente, devem ser usados com cautela quando a UCS do material rochoso ou parede de descontinuidade está fora do intervalo de 20 a 150 MPa. O Tipo N (Figura 2.1) é menos sensível a superfícies com irregularidades e deve ser preferencialmente usado em aplicações em campo. Já o martelo Tipo L tem maior sensibilidade e devolve melhores

resultados quando é testada a fragilidade, porosidade e desgaste da rocha (Aydin, 2008).

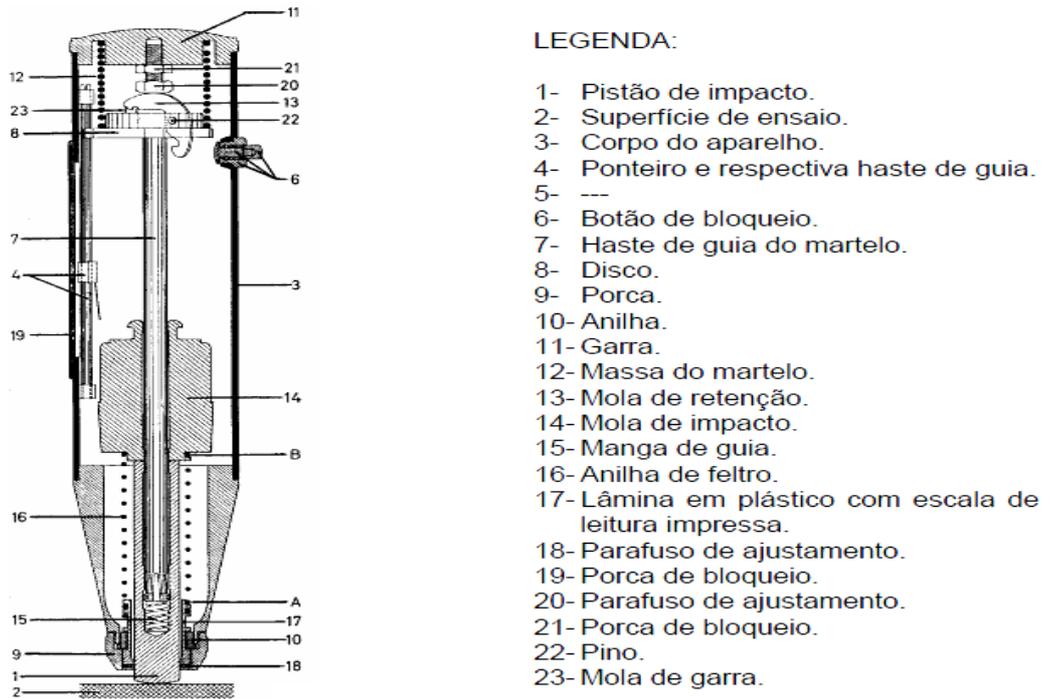


Figura 2.1: Secção longitudinal do MS do Tipo N (Nepomuceno, 1999)

2.1.2 Ultrassons

As técnicas sísmicas têm sido frequentemente utilizadas por engenheiros geotécnicos tanto em campo como em laboratório. Em campo são usadas na área da geofísica, enquanto em laboratório são empregues na determinação das propriedades dinâmicas das rochas. Devido à facilidade de operação e por serem não destrutivas, a sua utilização é cada vez mais frequente.

Estas técnicas no âmbito da geotecnia são utilizadas na previsão da deformação dos maciços rochosos, na estimativa da extensão das zonas fraturadas que se desenvolvem à volta de aberturas existentes no subsolo, na determinação das alterações devido às condições atmosféricas e na caracterização da massa de rocha fraturada.

Inicialmente esta técnica foi aplicada em ensaios de betão preconizados por Obert no ano de 1940. Na altura a onda sonora era produzida por meio de impacto de um objeto na superfície de betão, mas os equipamentos de medida, usados na altura, não ofereciam grande precisão. Devido ao elevado interesse que esta técnica suscitava e com o surgimento de novos e melhores equipamentos de medição levou a que nos anos 70 do século passado fossem produzidas as primeiras versões portáteis e de leitura digital (Nepomuceno, 1999 citado por Galvão, 2009). Devido a essa evolução, nos dias de hoje a técnica dos ultrassons

é utilizada em vários materiais, nomeadamente em madeiras, materiais cerâmicos, pedra, metal ou revestimentos de paredes (Flores-Colen, 2009 citado por Ferreira, 2011).

O equipamento é constituído por um gerador de impulsos, um transdutor emissor e um recetor, um amplificador e um temporizador eletrónico que mede o intervalo de tempo entre a emissão do sinal pelo transdutor emissor e a sua deteção no transdutor recetor.

Segundo a norma EN 12504-4: 2004 existem dois tipos de temporizadores eletrónicos disponíveis. Um deles é um osciloscópio onde a parte frontal do impulso é mostrado em relação a uma escala de tempo alterável. Este tipo de temporizador é particularmente vantajoso em situações de teste complexas ou em sistemas automáticos de medição, uma vez que facilita a monitorização da forma da onda do impulso. O segundo tipo é um temporizador de intervalos com mostrador digital de leitura.

Disposição dos transdutores

Uma das particularidades deste ensaio prende-se com a disposição dos transdutores. No total existem três configurações de disposição dos transdutores, nomeadamente a transmissão direta, semidireta e a indireta (Figura 2.2).

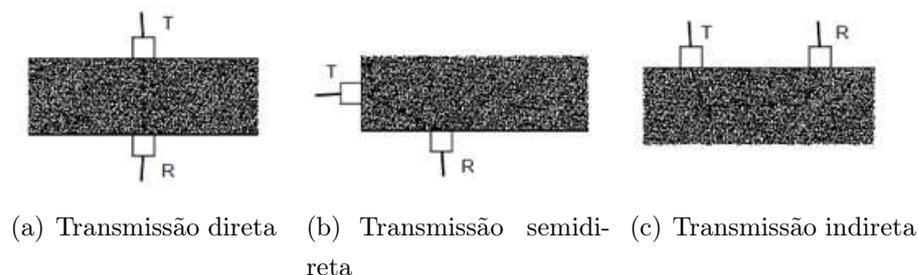


Figura 2.2: Disposição dos transdutores no ensaio de ultrassons (Vasconcelos, 2005)

A transmissão direta (Figura 2.2 (a)) é tida como a mais recomendável uma vez que o comprimento do percurso é medido com maior precisão devido ao fato de a máxima energia do impulso ser transmitida segundo a direção normal ao transdutor emissor (Nepomuceno, 1999 citado por Galvão, 2009).

A transmissão semidireta (Figura 2.2 (b)), apesar de permitir leituras bastantes satisfatórias do sinal, só deve ser utilizada aquando da impossibilidade de utilizar a transmissão direta (Ferreira, 2011).

Por último, a transmissão indireta (Figura 2.2 (c)), é a que conduz a leituras mais fracas do sinal, uma vez que o sinal detetado pode ser de apenas 3% ou menos daquele que é detetado pela transmissão direta (Malhotra e Carino, 1991).

2.1.3 Tamanho e dimensões das amostras

De acordo com ISRM (1981a), e outras normas como a ASTM (1995), Rilem/NDT1 (1972) e BS188:Part 203 (1986), a velocidade dos ultrassons é influenciada pela forma e tamanho das amostras (Vasconcelos, 2005). A mínima dimensão lateral, o tamanho do mineral das amostras e a frequência natural de ressonância são fatores que se encontram inter-relacionados e podem influenciar os resultados dos ensaios (Vasconcelos, 2005).

O comprimento de onda (λ) correspondente à frequência dominante do impulso que viaja ao longo da amostra é aproximadamente igual à razão entre a velocidade do impulso (v) e a frequência natural de ressonância dos transdutores (f):

$$\lambda \approx \frac{v}{f} \quad (2.1)$$

A dimensão lateral mínima da seção cruzada (D) deve ser pelo menos cinco vezes maior que o tamanho de comprimento de onda:

$$D \geq 5\lambda \quad (2.2)$$

Para reduzir a dispersão e de forma a melhorar a recepção do sinal no transdutor receptor, o comprimento de onda (λ) deve ser pelo menos três vezes superior ao tamanho do granulado da amostra (d):

$$\lambda \geq 3d \quad (2.3)$$

Tendo em conta as equações acima podemos estabelecer a seguinte relação para a mínima dimensão lateral (ASTM d2845, 1995, citado por Vasconcelos, 2005):

$$D \geq 5\left(\frac{v}{f}\right) \geq 5d \quad (2.4)$$

2.2 Resultados existentes na literatura

2.2.1 Correlações entre o valor de ressalto do MS com o índice de “impact strength” e a velocidade das ondas P em Rochas

No sentido de estimar relações entre o valor de ressalto do MS com os índices de “impact strength” (ISI), “slake durability” (SDI) e a velocidade das ondas P de rochas, foi publicado um estudo no ano de 2010 por Sharma *et al.*. Para estimar essas relações os autores do estudo fizeram análises regressivas. Estes determinaram para cada um dos testes a melhor equação, assim como o coeficiente de determinação (R^2).

Para alcançar esse objetivo foram recolhidos diferentes tipos de rocha de diferentes locais na Índia.

No ensaio do MS foi utilizado um martelo tipo N com uma energia de impacto de 2.207 Nm. Todos os testes foram realizados com o martelo verticalmente virado para baixo e em ângulos diretos na horizontal em relação às faces das amostras. Foram feitas dez leituras para cada amostra, onde das quais foram utilizados os cinco valores mais altos para ser feita a análise dos resultados.

Para a obtenção do ISI cada fragmento de rocha foi sujeito a vinte pancadas. O pistão, neste ensaio, pesava 1.81 kg e foi largado de uma altura de 304.8 mm, acima das amostras. Segundo os autores do estudo, um ensaio semelhante já tinha sido realizado por Hobbes (1964) que estabeleceu a seguinte equação:

$$UCS = 53 \times ISI - 2509 \quad (2.5)$$

onde UCS é a resistência à compressão uniaxial em kgf/cm^2 .

Para a obtenção da velocidade das ondas P foi utilizado neste ensaio um aparelho ultrassônico digital e portátil.

Os resultados das diferentes propriedades das rochas são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Resultados das diferentes propriedades das rochas (adaptado de Sharma *et al.*, 2010)

Tipo de Rocha	Classe da Rocha	Velocidade das ondas P (m/s)	ISI	Valor do Ressonância do MS
Arenito (FD)-1	Sedimentar	2,129.1	79.1	28
Arenito (FD)-2	Sedimentar	2,132.7	80.8	27
Arenito (FD)-3	Sedimentar	2,134.4	81.2	27
Arenito (FD)-4	Sedimentar	2,135.2	81.8	28
Arenito (FD)-5	Sedimentar	2,152.7	82.6	29
Arenito (FD)-6	Sedimentar	2,153.2	82.8	29
Arenito (FD)-7	Sedimentar	2,156.3	83.1	29
Arenito (FD)-8	Sedimentar	2,12	80.1	30
Arenito (FD)-9	Sedimentar	2,053.5	82.4	27
Arenito (MD)-1	Sedimentar	2,296.9	85.2	30
Arenito (MD)-2	Sedimentar	2,282.2	84.2	31
Arenito (MD)-3	Sedimentar	2,289.8	84.6	32
Arenito (MD)-4	Sedimentar	2,288.7	83.5	31
Arenito (MD)-5	Sedimentar	2,298.2	84.2	33
Arenito (MD)-6	Sedimentar	2,310.3	84.6	34
Silestone-1	Sedimentar	2,321.8	85.2	34
Silestone-2	Sedimentar	2,278.8	83.8	33
Silestone-3	Sedimentar	2,345.9	85.3	30
Silestone-4	Sedimentar	2,190.2	82.2	32
Silestone-5	Sedimentar	2,188.9	82.0	32
Silestone-6	Sedimentar	2,180.3	85.1	33
Conglomerado -1	Sedimentar	2,218.2	84.1	36
Conglomerado -2	Sedimentar	2,183.4	85.9	34
Conglomerado -3	Sedimentar	2,142.8	84.9	31
Conglomerado -4	Sedimentar	2,240.1	86.4	34
Arenito-1	Sedimentar	2,465.3	86.3	34
Arenito-2	Sedimentar	2,212.1	84.9	37
Xisto-1	Metarmófica	2,428.8	87.5	39
Xisto-2	Metarmófica	2,517.6	90.5	41
Xisto-3	Metarmófica	2,554.7	89.2	42
Quartzito-1	Metarmófica	3,789.07	93.5	56
Quartzito-2	Metarmófica	2,623.4	92.4	54
Quartzito-3	Metarmófica	3,562.8	93.5	53
Gnaiss-1	Metarmófica	3,559.2	93.8	54
Gnaiss-2	Metarmófica	3,592.05	94.1	53
Gnaiss-3	Metarmófica	3,55	93.8	57
Gnaiss-4	Metarmófica	3,594.4	92.1	55
Granito (GG)-1	Ígnea	4,964	98.9	62
Granito (GG)-2	Ígnea	4,970.2	98.2	61
Granito (GG)-3	Ígnea	4,976.8	98.1	62
Granito (MG)-1	Ígnea	4,985.6	97.9	63
Granito (MG)-2	Ígnea	4,992	98.1	63
Granito (MG)-3	Ígnea	4,980.2	97.8	60
Basalto-1	Ígnea	5,753	98.6	65
Basalto-2	Ígnea	5,530.2	96.9	63
Basalto-3	Ígnea	5,421.6	95.9	65
Andesito-1	Ígnea	5,426.2	96.9	62
Andesito-2	Ígnea	5,422.4	96.2	61
Andesito-3	Ígnea	5,431.6	97.0	63
Andesito-4	Ígnea	5,434.4	97.2	64
Andesito-5	Ígnea	5,512.2	97.6	62

Após terem sido obtidos os resultados para as diferentes propriedades das rochas, foram feitas tentativas de relacionar os valores obtidos de ressonância do MS com o ISI, e as velocidades das ondas P.

Concluíram que existe uma relação linear entre os valores de ressonância do MS e do ISI para todos os tipos de rocha testados. Um coeficiente forte de determinação ($R^2 = 0.96$) foi encontrado entre o valor do ressonância e o ISI para todos tipos de rochas. A equação que mostra essa relação é a seguinte:

$$ISI = 0.44 \times RR + 69.92 \quad (2.6)$$

onde RR é definido pelo autor como o valor de ressalto do MS.

Encontraram também um elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0.96$) entre o valor do ressalto e a velocidade das ondas P para todas as rochas. A equação de relação é:

$$P_v = 966.22e^{0.026RR} \quad (2.7)$$

Sharma *et al.* referem que as relações encontradas são unicamente aplicáveis para valores de ressalto no intervalo de 25 – 70. Estes chamam a atenção que para valores mais baixos de ressalto estas equações podem devolver valores não fiáveis. Assim, indicam que não devem ser usadas extrapolações na validação de resultados obtidos por equações empíricas.

Posteriormente, relacionaram valores previstos de ISI e da velocidade da onda P com os valores obtidos para todas as rochas, e concluíram que o valor de ressalto do MS é um dos métodos mais fiáveis na estimativa do ISI e da velocidade de ondas P , em comparação com outros métodos de laboratório que se apresentam como sendo mais morosos e menos precisos.

Finalizam o estudo afirmando que estas equações são práticas, simples e precisas o suficiente para a obtenção de índices de propriedades importantes de diferentes rochas.

2.2.2 Previsão das propriedades mecânicas dos granitos por meio da medição da velocidade dos ultrassons e do valor de ressalto do MS

No trabalho intitulado “*Prediction of the mechanical properties of granites by ultrasonic pulse velocity and schimdt hammer hardness*” (Vasconcelos *et al.*, 2008), os autores realizaram uma campanha de vários ensaios nomeadamente o ensaio do MS, ultrassons e ensaios à compressão e tração em amostras de granito. Deste estudo foram indicados fatores que influenciaram os END e foram estabelecidas correlações entre eles.

Fatores que influenciam os resultados dos END

De forma a avaliarem os principais fatores que contribuem para a variação dos resultados das medições das velocidades dos ultrassons (VPV) em granitos foram analisados aspetos microestruturais relacionados com a anisotropia planar, o estado de desgaste e a humidade contida nas amostras.

Relativamente ao estado de desgaste e anisotropia planar das amostras, foi observado que o estado de desgaste influencia a VPV em amostras secas ou saturadas. Segundo os

autores, maiores quantidades de vazios, poros e microfissuras resultam numa propagação mais lenta das ondas elásticas. Esta diferença é menos significativa no caso de amostras saturadas, dado que os poros, vazios e microfissuras são preenchidos com água. Uma vez que a *VPU* é fortemente afetada pela microfissuração do material, o ensaio dos ultrassons pode ser uma ferramenta económica para a avaliação do estado de desgaste das amostras em pedra.

No ensaio do MS fizeram a comparação entre granitos com maior e menor estado de desgaste e observaram que os valores mais baixos de ressalto do MS foram obtidos em granitos com maior estado de desgaste. Desta forma concluíram que o MS é também um método simples para avaliar o estado de desgaste. Por outro lado, o MS não apresentou eficiência na deteção da anisotropia planar, uma vez que encontraram diferenças pouco significativas de valores entre a direção paralela e perpendicular à anisotropia planar das amostras.

Analisando a anisotropia planar das amostras através do ensaio de ultrassons, verificaram que a *VPU* é sempre maior na direção paralela ao plano das fendas.

Na análise da influência da percentagem de humidade contida nas amostras fizeram a comparação entre os valores da *VPU* em amostras secas e saturadas. Através desta análise, observaram que a humidade contida nas amostras tem uma influência bastante significativa na *VPU*, uma vez que os resultados que obtiveram indicam a tendência de as amostras secas exibirem valores consideravelmente mais baixos comparativamente com as saturadas.

Correlações entre os END e as propriedades mecânicas

Os dados experimentais recolhidos neste estudo incluíram medições da *VPU* em cubos, valores de resistência à tração (f_t), resistência à compressão (f_c) e valores de ressalto do MS em cubos.

Encontraram uma razoável correlação não linear entre f_t e a *VPU* ($R^2 = 0.89$). A partir deste valor concluem que a *VPU* pode ser usada na previsão preliminar de f_t .

Na f_c obtiveram um coeficiente de determinação com a *VPU* mais baixo ($R^2 = 0.72$).

Entre os valores da *VPU* e o módulo de elasticidade (E) foi obtida uma correlação significativa ($R^2 = 0.84$), confirmando assim uma expectável forte relação entre ambas propriedades.

Na relação entre o valor de ressalto do MS e f_c e E foi obtido um valor de correlação de

$(R^2 = 0.83)$.

Uma vez que o valor de ressalto do MS não é sensível à anisotropia planar das amostras, a correlação não linear com f_t seria obrigatoriamente fraca.

Num comentário final os autores concluem que devido à existência de correlações estatísticas significativas entre a VPU com as propriedades mecânicas, tais como f_c e E , estes parâmetros podem ser estimados por meio de métodos não destrutivos. De uma forma similar, verificaram que o valor de ressalto do MS também pode ser usado na previsão das propriedades elásticas e de resistência assim como numa rápida e fácil avaliação do estado de desgaste dos granitos. Numa última nota realçam que as correlações estatísticas obtidas entre a VPU e os parâmetros de compressão e tração podem ser usados numa avaliação preliminar do comportamento das fraturas em granitos.

2.2.3 Outras correlações por vários autores existentes na literatura

Nesta secção serão apresentadas correlações obtidas por Miranda (2003) para maciços graníticos, assim como vários estudos que estabelecerem correlações empíricas entre o valor de ressalto do MS, UCS e módulos de elasticidade de várias rochas (Tabela 2.2).

Correlações entre diversos parâmetros geomecânicos obtidos por Miranda (2003) em maciços graníticos

Correlação entre o índice de carga pontual ($IS_{(50)}$) e o índice de repercussão esclerométrica (R_m) obtido com o MS:

$$IS_{50} = 0.02592e^{0.0535R_m}; \quad R^2 = 0.55; \quad (2.8)$$

Correlação entre a resistência à compressão uniaxial (σ_c) e o módulo de deformabilidade tangente (E_t):

$$E_t = 199.8 \times \sigma_c; \quad R^2 = 0.95; \quad (2.9)$$

Correlação entre a velocidade de propagação das ondas sísmicas P (V_p) com a resistência à compressão uniaxial (σ_c) e com o peso volúmico (γ):

$$V_p = 199.8 \times \gamma \times 10.794; \quad R^2 = 0.76; \quad (2.10)$$

$$V_p = 0.0299 \times \sigma_c + 1.22; \quad R^2 = 0.87; \quad (2.11)$$

Tabela 2.2: Relações do valor de ressalto do MS com valores de resistência à compressão e módulo de Young (Adaptado de Aydin *et al.*, 2005)

Referências	Correlações propostas	r	Tipo de Rocha	σ_{UCS}	R	
Aufmuth (1978)	$\sigma_{UCS}=0.33*(R_L + p)^{1.22}$ $E=4911.84*(R_L + p)^{1.06}$	0.80	23 diferentes litologias	12-362	10-54	
Kahraman (1986; em Yilmaz e Sendir, 2002)	$\sigma_{UCS}=0.00043*(R_N + p)^{2.46}$	0.96	10 diferente litologias			
Sokeceoglu (1996; em Yilmaz e Sendir, 2002)	$\sigma_{UCS}=0.0001*R^{2.77}$	0.84	Merl			
Yasare Endogun (204)	$\sigma_{UCS}=0.000004*R_L^{4.29}$	0.89	Carbonatos, arenito, basalto	40-112	45-55	
Deelman e iftan (1978)	$\sigma_{UCS}=0.00016*R_L^{2.47}$ $E=1.89*R_L - 60.55$	- 0.93	Granito (Graul e IV)	11-266	23-62	
Xu et al.(1990)	$\sigma_{UCS}=2.98*e^{(0.04*R_L)}$ $E=1.77*e^{(0.07*R_L)}$	0.95 0.96	Mica-xisto	9-56	17-53	
	$\sigma_{UCS}=2.99*e^{(0.04*R_L)}$ $E=2.71*e^{(0.04*R_L)}$	0.91 0.91	Frasinito	8-345	21-64	
	$\sigma_{UCS}=2.98*e^{(0.04*R_L)}$ $E=2.57*e^{(0.02*R_L)}$	0.94 0.88	Serpentinito			
	$\sigma_{UCS}=3.78*e^{(0.05*R_L)}$ $E=1.75*e^{(0.05*R_L)}$	0.93 0.95	Gabro			
	$\sigma_{UCS}=1.26*e^{(0.22*R_{2-3})}$ $E=0.07*e^{(0.24*R_{2-3})}$	0.92 0.89	Mudstone			
	Deere e Miller (1996)	$\sigma_{UCS}=9.97*e^{(0.02*R_{2-3})}$ $E=0.19*R_L*p^2 - 7.87$	0.94 0.88	28 diferentes litologias	22-328	23-59
	Beverly et al.(1978; em Xu et al., 1990)	$\sigma_{UCS}=12.74*e^{(0.02*R_{2-3})}$ $E=0.19*R_L*p^2 - 12.71$		20 diferentes litologias	38-218	-
	Cengil e Shakoor(1990)	$\sigma_{UCS}=8.32*e^{(0.04*R_{2-3})}$ $\sigma_{UCS}=8.17*e^{(0.02*R_{2-3})}$	0.93 0.98	Arenito Carbonatos	35-271	27-49
Kahraman (2001)	$\sigma_{UCS}=6.97*e^{(0.04*R_{2-3})}$ $\sigma_{UCS}=1.45*e^{(0.07*R_L)}$ $E=1.04*e^{(0.04*R_L)}$	0.78 0.92 0.91	Carbonatos Granito (Graul e IV)	4-153 6-196	15-70 20-63 23-76	
	$\sigma_{UCS}=0.92*e^{(0.07*R_L)}$ $E=0.72*e^{(0.05*R_L)}$	0.94 0.92				
	Yilmaz e Sendir (2002)	$\sigma_{UCS}=2.27*e^{(0.04*R_L)}$ $E=3.15*e^{(0.05*R_L)}$	0.91 0.95	Gypsum	15-30	30-44
	Katz et al. (2000)	$\sigma_{UCS}=2.21*e^{(0.07*R_L)}$	0.96	Arenito, Limestone	11-259	24-73
	Kidybinski (1980)	$E_L = 0.00013*R_N^{1.06}$ $\sigma_{UCS}=0.52*e^{(0.05*R_{2-3})}$	0.99	Granito arenito, carvão		
Shorey et al. (1984)	$\sigma_{UCS}=0.40*R_N - 3.60$	0.94	Carvão	3-13	15-40	
Haramye DeMarco (1985)	$\sigma_{UCS}=0.99*R_L - 0.38$	0.70	Carvão	7-46	12-44	
Ghose e Chakraborti (1986)	$\sigma_{UCS}=0.88*R_L - 1.2.11$	0.87	Carvão	13-41	28-53	
Singh et al. (1983)	$\sigma_{UCS}=2.00*R_L$	0.86	Arenito, silestone	12-73	10-33	
O'Rourke(1988)	$\sigma_{UCS}=4.85*R_L - 7.6.18$	0.77	Arenito, silestone	14-213	19-52	
Sachpazis (1990)	$\sigma_{UCS}=4.28*R_L - 67.52$ $E=1.94*R_L - 33.93$	0.96 0.88	33 diferente carbonatos	22-311	16-60	
	Tugrul e Zanir (1999)	$\sigma_{UCS}=8.36*R_L - 4.1600$	0.87	Granito	109-193	64-72

2.3 Data Mining

Nos dias de hoje assistimos a um abandono acentuado dos métodos tradicionais de análise e de construção de relatórios sobre dados. A principal razão deste abandono está relacionada com a necessidade de se fazerem análises mais aprofundadas, para que seja possível obter maior qualidade de conhecimento através da informação. Aliada a essa necessidade, e tendo em conta o aumento progressivo de informação, estão as limitações que

as ferramentas tradicionais apresentam na detecção de padrões e em revelar conhecimento inserido nos dados, uma vez que se baseiam sobretudo em métodos estatísticos (Michalski *et al.*, 1998 citado por Santos e Azevedo, 2005).

Na perspetiva de superar estas limitações, surgiu a área de Descoberta de Conhecimento em Base de Dados (DCBD). Nesta área para extrair tendências, padrões e conhecimento útil, de uma forma autónoma e semiautomática, foi necessária a utilização de modelos e técnicas de Data Mining (DM) (Apte *et al.*, 2002 citado por Santos e Azevedo, 2005).

DM, numa tradução direta, extração de conhecimento, baseia-se no uso de técnicas de reconhecimento de padrões, inteligência artificial, recuperação de informação e estatísticas entre outros, sendo parte de um processo maior de conhecimento denominado como DCBD. Segundo Cruz (2007), este processo é constituído por cinco etapas: Seleção, Pré-processamento, Transformação, DM e Interpretação (Figura 2.3).

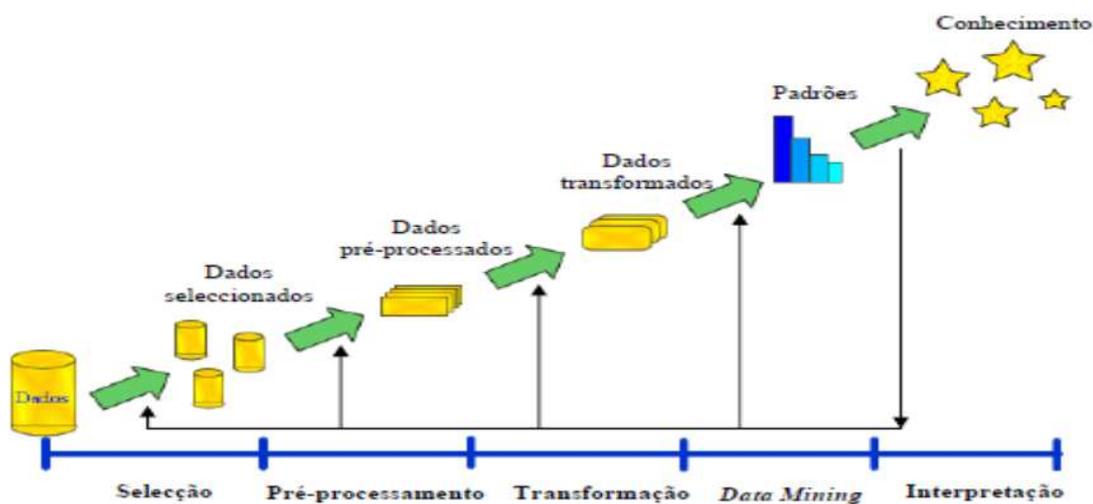


Figura 2.3: Processo de DCBD segundo Fayyad *et al.* (Cruz, 2007)

A etapa de Seleção inicia-se após a definição dos objetivos do processo. Nesta procede-se à recolha dos dados. No Pré-processamento é feito o tratamento de dados errados e omissões, a redistribuição de dados não uniformes, etc.. Na etapa de *Transformação* é feita a seleção das características mais relevantes dos dados de forma a reduzir o número de variáveis. No DM selecionam-se as técnicas e métodos para extração de padrões dos dados e modelos de previsão que serão aplicados. Na etapa final, Interpretação, é feita a visualização e análise do conhecimento extraído para permitir a sua avaliação e interpretação, fazendo com que seja possível retomar o processo em qualquer etapa anterior para uma nova iteração.

2.3.1 Aplicações do DM

O DM pode abranger um leque variado de utilizações em vários campos, existindo referências da sua utilização em aplicações científicas, comerciais e nas Tecnologias de Informação. Cruz (2007) enumera alguns exemplos de utilizações:

- *Customer Relationship Management* (CRM), aqui o DM ajuda na obtenção de conhecimento sobre o perfil dos clientes e antecipa as suas necessidades;
- Suporte à Decisão, onde o DM identifica segmentos de consumidores e padrões de consumo, assim como outras ajudas à decisão;
- Finanças, na deteção de fraudes, previsões, análise de créditos, etc.;
- Investigação Científica, o DM é usado na visualização da informação, desenvolvimento de modelos de previsão, entre outros.

No caso particular da Engenharia Civil, existem várias aplicações onde as técnicas de DM têm sido desenvolvidas. Seguem-se alguns exemplos (Solomatine *et al.*, 2003, Quintela, 2005 citados por Miranda, 2007):

- Aplicações para se obter dados de monitorização de estruturas, de forma a prever o seu comportamento futuro;
- Aplicações para a construção de grandes bases de dados para gerar conhecimento no sentido de melhorar planeamentos futuros de projetos de construções;
- Na análise da deterioração e comportamento de pontes;
- Para se fazerem prognósticos da carga máxima em vigas de aço.

2.3.2 Métodos de DM

Os dois objetivos principais no DM são a verificação e a descoberta. Na verificação, este analisa a hipótese do utilizador, enquanto na descoberta procura novos padrões, que se subdividem em previsão e descrição. Na previsão procura padrões e modelos de forma a conhecer o estado futuro. Por sua vez, a descrição procura padrões que apresentem o conhecimento de forma compreensível (Fayyad *et al.*, 1996 citado por Cruz, 2007).

Os problemas para o objetivo previsão são tratados dividindo-os em duas classes:

- Classificação: definição de uma função que faça o mapeamento dos dados em classes pré-definidas;
- Regressão: definição de uma função desconhecida cuja saída tem um domínio de valores reais.

Por sua vez, os métodos para o objetivo descrição são vários. Seguem-se alguns exemplos:

- Detecção de desvios: onde se pretende descobrir alterações significativas nos dados;
- Dependência: que se baseia na procura de um modelo para descrever as relações entre variáveis;
- Segmentação: aqui é feita a procura de um número limitado de conjuntos que descrevam os dados;
- Sumariação: onde se procura uma descrição de um conjunto ou subconjunto de dados.

Modelos e Técnicas

Os modelos e técnicas mais utilizadas no processo de DM segundo Santos e Azevedo (2005) são os seguintes:

- Árvores de Decisão (AD)

Numa definição simples, consiste numa forma de representação de valores, seguindo um conjunto de regras, que por sua vez seguem uma hierarquia de classes e de valores, que resulta em dois tipos de AD:

- Classificação: com a finalidade de qualificar os registos associando-os com a classe determinada e garantir que essa classificação esteja correta;
- Regressão: tem por sua vez, a função de realizar a estimativa do valor de uma determinada variável.

- Algoritmos Genéricos (AG)

Esta técnica é baseada nos princípios das leis de evolução natural, proposta por Charles Darwin em 1859, nas quais os mais aptos têm maior probabilidade de perpetuar parte das suas características. Os AG fazem uma analogia direta com este processo. Ao trabalhar com uma população de indivíduos, onde cada um representa uma possível solução para um dado problema, é-lhes atribuído um determinado valor de utilidade. Na natureza os indivíduos com melhor qualidade são aqueles que têm maior probabilidade de sobrevivência e reprodução. Logo nesta técnica, esse valor representa a qualidade da solução. Eliminando as soluções mais “fracas” e preservando as mais “fortes”, esperam-se soluções de melhor qualidade. Devido ao seu caráter seletivo, a sua utilização é frequente em problemas de otimização.

- Indução de Regras

O seu objetivo principal é o de, através da análise de probabilidades condicionais, encontrar dependências entre os atributos ou valores. Esta é a técnica de DM mais conhecida (Berson *et al.*, 2000 e Quinlan, 1998 citados por Santos e Azevedo, 2005).

- Conjuntos Aproximados

A Teoria dos Conjuntos Aproximados (TCA) pode ser definida com um método determinístico, onde a sua principal vantagem reside no facto de não ter necessidade de informação preliminar relativamente aos dados, uma vez que esta técnica utiliza apenas a estrutura interna dos dados analisados para modelar o conhecimento. Esta técnica foi proposta por Pawlak como uma nova ferramenta matemática para tratamento de incerteza e representação do conhecimento. A TCA trata de um tipo de incerteza, denominada por indiscernibilidade, que surge quando não é possível diferenciar elementos de um mesmo conjunto, representando-os numa situação onde esses componentes surgem como um único elemento (Sassi, 2010).

- Conjuntos Difusos

O objetivo desta teoria é o de representar o raciocínio impreciso. Desta forma, esta teoria desempenha um papel essencial na tomada de decisões em ambientes de incerteza e imprecisão. A sua vantagem reside na possibilidade de um controlo complexo por combinação de regras simples.

- Redes de Bayes

As Redes de Bayes são classificadas como sendo uma excelente ferramenta para lidar com a incerteza, uma vez que estas calculam a probabilidade de determinado evento ocorrer em função da ocorrência de outro.

- Sistemas de Classificação

São sistemas cujo objetivo é o de maximizar conhecimento. A sua estrutura faz com que os classificadores que se divulguem mais úteis para o objetivo do sistema sejam reforçados, fazendo a substituição progressiva dos classificadores menos úteis, para que o seu desempenho seja melhorado no ambiente onde se insere (Santos, 1999 citado por Santos e Azevedo, 2005).

Segundo Santos e Azevedo (2005) outro modelo bastante utilizado é o das Redes Neurais Artificiais (RNA).

Para além dos modelos e técnicas já mencionadas existem outras como a técnica de Máquinas de Vetores de Suporte (MVS), que em algumas aplicações se apresenta superior às RNA (Lorena e Carvalho, 2003), e a técnica de Regressão Múltipla (RM).

Os algoritmos de “backpropagation” de RM foram inicialmente introduzidos em 1974 e posteriormente popularizados em 1986, sendo que na modelação de dados contínuos esta é a abordagem clássica (Cortez *et al.*, 2009).

O objetivo principal deste modelo é o de ajustar uma relação linear entre várias variáveis independentes e uma variável dependente (Costa, 2011). Contudo, e apesar de ser mais fácil de interpretar (Cortez *et al.*, 2009) esta técnica tem vindo a ser preterida, ou usada para efeitos de análise complementar, por modelos como as RNA e as MVS.

Como no presente trabalho, para além do modelo RM, os modelos RNA e MVS serão utilizados, segue-se uma abordagem mais extensiva acerca de cada um deles.

Redes Neurais Artificiais

As RNA baseiam-se numa metodologia similar ao funcionamento dos neurónios do cérebro humano. Isto é, o cérebro humano é composto por milhões de neurónios ligados entre si, existindo entre eles uma constante troca de impulsos eletroquímicos. A estrutura responsável por esta constante transmissão de estímulos, ou impulsos nervosos entre neurónios é denominada por sinapse. Através da sinapse os neurónios vão comunicando entre si, permitindo desta forma que o cérebro humano processe informação recebida do exterior em forma de impulsos, conseguindo a partir dessa adaptar-se e resolver novos problemas. Em suma, quando os neurónios são submetidos a um determinado tipo de impulsos desencadeiam uma resposta adequada a esses mesmos impulsos.

O mesmo acontece com o modelo RNA. Quando submetido a um conjunto de informação previamente desconhecido, as RNA processam essa informação através do reconhecimento de padrões existentes entre dados com a finalidade de os usar na previsão de soluções para problemas similares. Ou seja, após o modelo ser construído a partir de um determinado tipo de informação será capaz de no futuro, utilizando um tipo de informação semelhante àquela que foi usada na sua construção, prever a solução de um novo problema.

Este princípio de funcionamento das RNA foi estabelecido por McCulloch e Pitts (1993) (Miranda, 2007), que substituíram o conceito de neurónios por unidades de processamento organizadas por camadas, obtendo assim uma complexa estrutura computacional paralela (Miranda, 2007). Desta forma as unidades de processamento comunicam entre si através de ligações de sinais de entrada, sendo atribuído a cada um delas um peso associado. O valor do peso que é atribuído a cada sinal de entrada é somado com os restantes pesos, sendo depois a soma do total dos pesos processada por meio de uma denominada função de ativação que, através da relação dos pesos de cada valor de entrada, gera um valor de saída (Figura 2.4). Este valor de saída é comparado com o valor de saída presente no conjunto de informação usado para gerar o modelo, sendo que os pesos de cada entrada vão sendo ajustados para que o seu peso final resulte num valor de saída gerado pelo modelo o mais aproximado possível do valor presente no conjunto usado para a formulação do modelo.

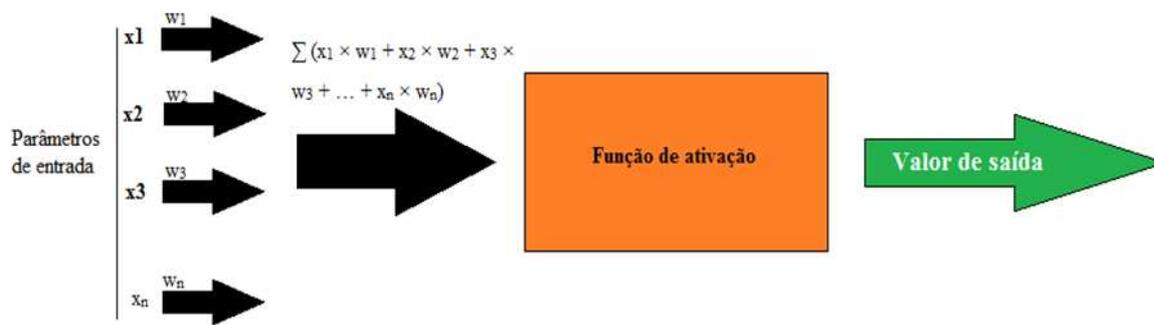


Figura 2.4: Funcionamento das RNA

Este modelo tem a particularidade de as unidades de processamento (neurónios) podem ser interligados numa estrutura de rede denominada por arquitetura ou topologias. Segundo Santos e Azevedo (2005) as principais topologias são representadas por duas categorias principais:

- Feed forward: neste tipo de redes, as ligações são unidirecionais, acíclicas e não existe qualquer ligação entre neurónios da mesma camada ou com camadas anteriores;
- Recorrente: os neurónios de saída podem estar ligados aos de entrada.

Segundo o mesmo autor, os tipos de arquiteturas mais utilizados para as RNA são as seguintes:

- Redes totalmente conectadas: onde cada um dos neurónios da rede é ligado a todos os outros neurónios da rede;
- Redes de camada única: neste tipo de arquitetura, os neurónios são separados um dos outros com a possibilidade de serem treinados separadamente;
- Redes multicamada: na qual a rede é composta por diferentes tipos de camadas dispostas paralelamente, sendo a primeira camada designada por camada de entrada e a última por camada de saída. Designam-se por camadas escondidas as camadas intermédias.

De entre os três tipos de arquiteturas a mais utilizada é a multicamada (Miranda, 2007).

Máquinas de Vetores de Suporte

As MVS são modelos de previsão construídos com base na teoria de aprendizagem estatística elaborada por Vapnik e colaboradores (Lorena e Carvalho, 2007), sendo inicialmente usadas em problemas de classificação, mas podendo também ser aplicadas com sucesso

em problemas de regressão (Kecman, 2001).

Em problemas de classificação, a premissa com que se constrói o modelo MVS passa pela separação de um conjunto de dados em duas classes usando um conjunto de funções para definir e separar dois padrões distintos. Essa separação é feita por meio da representação do conjunto de dados como pontos no espaço (Figura 2.5). Este processo de representação espacial é apelidado de mapeamento e as funções que separam cada um dos conjuntos por *kernels*. O plano que separa cada um dos conjuntos é denominado por hiperplano, sendo este o limite de decisão que separa os dois conjuntos, com o algoritmo a ser otimizado de forma a estabelecer o hiperplano com maior separação possível entre classes (Martins e Miranda, 2012).

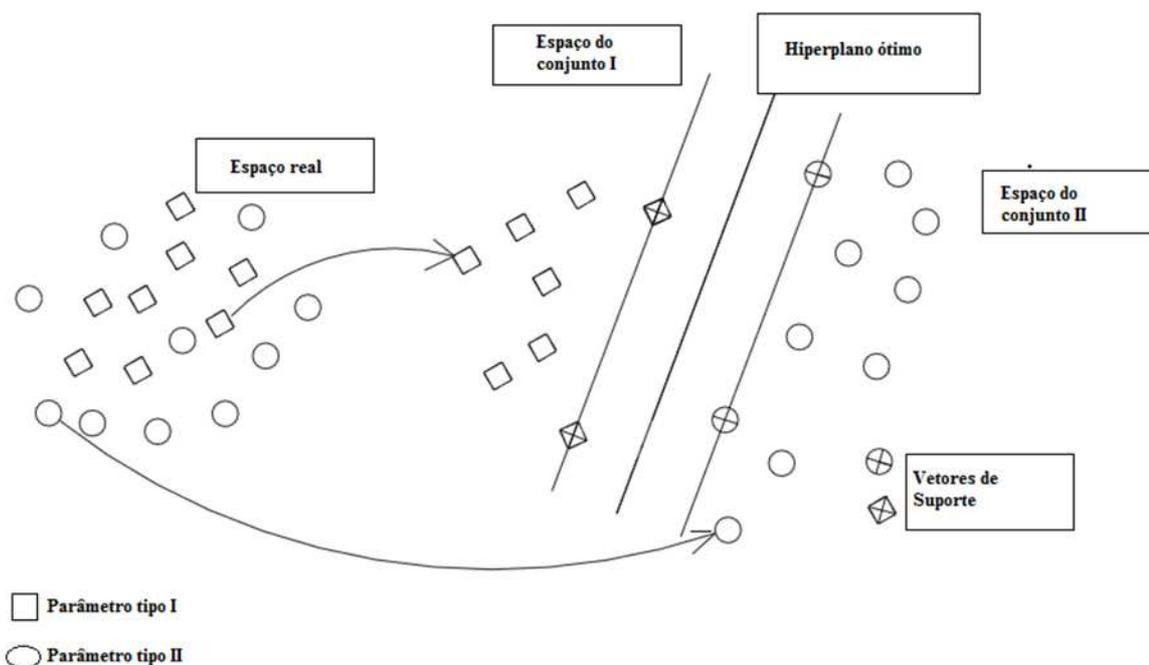


Figura 2.5: Exemplo de transformação MVS (adaptado de Martins *et al.*, 2012)

Em problemas de regressão, ao contrário dos problemas de classificação que se limitavam a devolver um valor de saída do tipo *booleano*, existem funções de valor real. Ou seja, à máquina de aprendizagem é dado um conjunto de l dados de treino, para que esta tente estabelecer uma relação entre os valores de entrada e de saída. Um conjunto de treino $D = \{[x(i), y(i)] \in R^n \times R, i = 1, \dots, l\}$ consiste num l número de pares $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_l, y_l)$, onde os valores de entrada x são vetores de dimensão n com $x \in R^n$, e os valores de resposta $y \in R$ são valores contínuos (Kecman, 2001).

A principal característica que faz com que este modelo seja bastante utilizado é a sua boa capacidade de previsão, uma vez que os classificadores gerados normalmente apresentam bons resultados. Aliado a esta característica está o facto de as MVS serem suportadas por uma forte base teórica matemática e estatística (Lorena e Carvalho, 2003).

2.3.3 Avaliação dos modelos

Depois de serem obtidos os modelos é necessário efetuar a avaliação da sua futura performance. O objetivo desta avaliação é selecionar qual o modelo mais eficaz. Para se proceder à avaliação da eficácia dos modelos é necessário recorrer a métodos de avaliação. Existem diferentes técnicas de avaliação que podem ser aplicadas aos modelos, dependendo de estes serem problemas de classificação ou de regressão.

Problemas de classificação

A Matriz de Confusão é aplicada em problemas de classificação, permitindo uma visualização clara dos resultados de um determinado modelo. A partir desta é possível a obtenção de curvas denominadas de *Receiver Operating Characteristics* (ROC) e a definição de taxas de erro.

A Matriz de Confusão de um classificador compara o número de classificações corretas com o número de previsões executadas para cada classe, sob um conjunto de exemplos T (Kohavi *et al.*, 1998 citado por Santos e Azevedo, 2005).

Cruz (2007) apresenta um exemplo de uma matriz de confusão (Tabela 2.3), onde a entrada horizontal são as classificações originais dos dados, e a entrada vertical são as classificações obtidas pelo modelo. Este observa no exemplo apresentado, que no caso da classe A todas as instâncias são corretamente classificadas. Por sua vez, no caso da classe B foram classificadas incorretamente 4 instâncias, e corretamente 46. Por fim, na classe C foram classificadas corretamente 49 instâncias e apenas 1 incorretamente.

Tabela 2.3: Exemplo de Matriz de Confusão (adaptado de Cruz, 2007)

	A	B	C
A	50	0	0
B	0	46	4
C	0	1	49

Problemas de regressão

Segundo Santos e Azevedo (2005), nos problemas de regressão o objetivo é obter o modelo mais eficaz segundo uma estimativa de erro. O erro ou resíduo (e) é medido por:

$$e = d - d' \quad (2.12)$$

onde d é o valor desejado e d' é o valor estimado pelo modelo.

Segundo Martins e Miranda (2012), para um conjunto de dados o erro global pode ser calculado a partir das seguintes métricas globais:

$$\text{Desvio Absoluto Médio : } DAM = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i| \quad (2.13)$$

$$\text{Erro Absoluto Relativo : } EAR = \frac{DAM}{\frac{\sum_{i=1}^N |y_i - \bar{y}_i|}{N}} \times 100\% \quad (2.14)$$

$$\text{Raiz do Erro Quadrático Mínimo : } REQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (2.15)$$

$$\text{Erro Quadrático Médio Relativo : } EQMR = \frac{REQM}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}{N}}} \times 100\% \quad (2.16)$$

$$\text{Coeficiente de correlação de Pearson : } COR = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}) \times (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}} \quad (2.17)$$

onde N é o número de exemplos, y_i o valor desejado, \hat{y}_i o valor estimado pelo modelo, \bar{y} a média dos valores desejados e $\bar{\hat{y}}$ a média dos valores estimados.

O desempenho dos modelos pode ainda ser avaliado por meio de utilização de curvas Características de Erro de Regressão, normalmente designadas por REC (Regression Error Characteristic). A principal vantagem do uso das curvas REC é a facilidade de serem interpretadas, sendo por isso bastante utilizadas na apresentação de resultados a público não especializado (Jinbo e Bennett, 2003).

Nestas é feita a comparação dos modelos de regressão por representação da relação entre a tolerância do erro (eixo das abcissas) e a percentagem de pontos previstos dentro dessa tolerância (eixo das ordenadas). O modelo que apresenta maior área sob a curva é o melhor (Martins e Marques, 2010).

Capítulo 3

AValiação NÃO DESTRUTIVA

3.1 Introdução

No presente Capítulo apresenta-se uma campanha experimental realizada usando dois tipos de ensaios não destrutivos (END) de fácil aplicação, nomeadamente o ensaio de medição da dureza superficial (Martelo de Schmidt) e o ensaio de medição da velocidade de propagação de ultrassons (*VPU*).

O estudo destas técnicas não destrutivas tem especial interesse no sentido de verificar as suas potencialidades na avaliação não destrutiva da pedra usada na construção, dado que na maioria dos edifícios antigos construídos em pedra as técnicas não destrutivas são as únicas que podem ser aplicadas.

A campanha experimental será dividida em duas fases:

- Numa primeira fase foram realizados END in-situ num edifício de habitação, com o objetivo de avaliar a aplicabilidade destas técnicas em situações reais. Nesta foram selecionadas sete faces de pedras de granito distintas, sendo que quatro destas são relativas a faces no interior da habitação e as restantes a faces do exterior da habitação. As faces das pedras de granito selecionadas, apesar de apresentar condições superficiais distintas, são relativas ao mesmo género de granito, nomeadamente o granito amarelo de Guimarães.
- Na segunda fase, os mesmos ensaios foram executados em quatro blocos de granito distintos, sendo dois blocos de granito azul de duas pedreiras diferentes, Guimarães e Gondomar, e os restantes blocos de granito amarelos, que foram extraídos de uma pedreira em Guimarães e outra na freguesia de Gonça, que pertence ao concelho de Guimarães. Nesta fase foram feitas leituras nos blocos com as faces no estado natural e após terem sido retificadas. Posteriormente, os blocos foram desmontados

em provetes para futuras campanhas experimentais destrutivas, possibilitando, dessa forma, que seja feita uma análise comparativa entre END e ensaios destrutivos (ED).

Com este capítulo pretende-se avaliar a capacidade destas técnicas na deteção da anisotropia dos granitos, a influência das condições superficiais, a comparação entre duas configurações de medição da *VP* e o registo dos índices obtidos a partir dos dois END com vista na construção futura de modelos de previsão de propriedades mecânicas.

3.2 Caso real

Para a utilização dos END in-situ (condições reais de aplicação), considerou-se um caso de estudo que consiste num edifício do tipo moradia unifamiliar. Este edifício localiza-se numa rua central da cidade de Guimarães (Av. S. Gonçalo) inserindo-se numa malha urbana, onde se encontram construídos essencialmente edifícios de habitação multifamiliar (Figura 3.1).



Figura 3.1: Localização do edifício em estudo (realce a vermelho)

A sua data de construção situa-se algures na década de 40 do século XX. Embora a autoria do projeto inicial não seja conhecida, em termos arquitetónicos pode ser definida como sendo do tempo da chamada “Casa Portuguesa” do arquiteto Raul Lino, uma vez que a arquitetura do edifício se identifica com essa época.

Em 1965 foi alvo de obras de ampliação fazendo com que a área de construção atual seja de 343 m^2 inseridos em 474 m^2 de área de terreno. Da referida ampliação resultou um anexo em que as alvenarias são de granito amarelo de Guimarães, contrastando com a construção previamente existente feita à base de tijolo com revestimento de argamassa (Figura 3.2).



Figura 3.2: Vista do alçado sul com o anexo em granito do lado esquerdo em contraste com a construção original do lado direito

Uma vez que o granito é o material alvo de estudo nesta dissertação, a campanha de END foi realizada apenas na ampliação feita em 1965. Para o efeito, foram selecionados três faces exteriores de pedras de granito presentes no rés-do-chão do alçado sul e quatro faces interiores de pedras de granito do rés-do-chão. Das quatro faces interiores selecionadas, duas delas são de pedras de granito que constituem a parede exterior do alçado poente e as restantes são relativas a uma parede divisória interior.

Na fase de seleção das faces dos granitos foram estabelecidos um conjunto de critérios de forma a recolher a melhor informação possível acerca destas:

1. Dimensão das pedras de granito;
2. Deteção de fatores que pudessem influenciar os resultados dos END;
3. Número de casos a estudar;
4. Posicionamento das pedras de granito na habitação.

Uma vez que os métodos sugeridos pela ISRM recomendam para a determinação do valor de resalto do Martelo de Schmidt (MS) a leitura de vinte impactos singulares no mínimo separados por uma distância igual ao diâmetro do pistão (ISRM, 1981) e tendo em vista a utilização pelo método indireto do aparelho de ultrassons, o primeiro critério de seleção foi a dimensão das pedras de granito. Estas teriam de ter dimensões que permitissem o desenho de uma malha com pelo menos vinte pontos, com um afastamento entre si e das extremidades de 10 *cm* na direção horizontal e vertical.

O critério definido com base nos fatores que influenciam o valor da *VPU* e de resalto do MS enumerados por Aydin (2008), nomeadamente o tamanho e distribuição do granulado, o grau de desgaste, a presença de humidade e de fendas superficiais visíveis, fraturas ou descontinuidades resultou na tentativa da identificação da presença destes fatores nas faces das pedras de granito. Este critério revela-se fundamental para posterior análise dos

resultados.

Uma vez que todas as pedras de granito eram de duas micas e grão grosseiro, não foi possível selecionar pedras distintas em termos de tamanho de granulado. Relativamente ao grau de alteração, uma vez que todas as pedras de granito eram amarelas, também não foi possível selecionar casos distintos. No que diz respeito à identificação de fendas superficiais, fraturas e descontinuidades foi tido o cuidado de selecionar pedras sem ou com o menor número possível destes fatores de forma a permitir a leitura correta por parte dos instrumentos.

Para posterior análise comparativa de resultados, teriam de ser selecionados um número significativo de granitos.

Por fim, todos os granitos selecionados teriam de proporcionar uma adequada acessibilidade de forma a facilitar e permitir a melhor operação de ambos instrumentos não destrutivos.

Contudo, algumas das superfícies selecionadas não preencheram na totalidade os critérios iniciais definidos. Se nas faces exteriores foi possível fazer a seleção de pedras de granito com dimensões adequadas para o desenho da malha de pontos, em algumas faces interiores não foi possível impor o critério de pelo menos vinte pontos por malha. Na Tabela 3.1 são apresentadas as dimensões da malha desenhada em cada uma das superfícies, sendo que os granitos A a D são relativos a faces das pedras interiores e os granitos E a G são de faces exteriores. Na Figura 3.3 é apresentado o esquema tipo da malha de pontos utilizado.

Tabela 3.1: Dimensão da malha em cada face

Face	Granito	Dimensão da malha ($l \times c$)
Interior	A	3×8
	B	2×9
	C	3×9
	D	2×8
Exterior	E	3×9
	F	3×8
	G	3×8

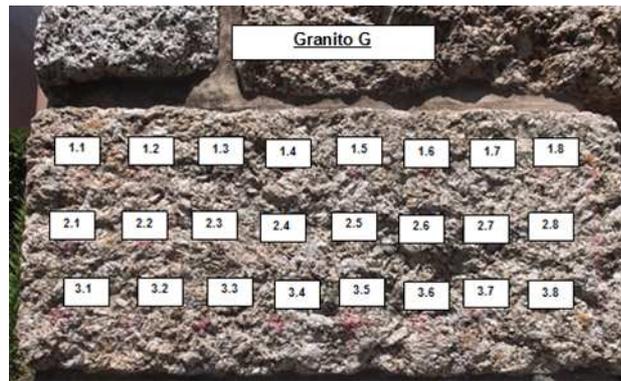


Figura 3.3: Esquema da malha de pontos utilizado na face G

Numa primeira inspeção visual foram imediatamente estabelecidas diferenças entre as superfícies das faces exteriores e interiores (Figura 3.4). As faces exteriores apresentavam superfícies com texturas bastantes rugosas, mas era notório um certo critério estético revelando que terão sido alvo de um tratamento mais cuidado que terá resultado na sua rugosidade atual. Por sua vez, as faces interiores apresentavam pouca preocupação estética, embora fossem visíveis em algumas vestígios que indicam que foi aplicada, no passado, uma ligeira camada de tinta. No que diz respeito à sua textura, comparativamente com as faces exteriores, são ligeiramente menos rugosas, apresentando irregularidades ao longo da sua superfície sob forma de depressões.



(a) Faces interiores



(b) Faces exteriores

Figura 3.4: Faces interiores *vs.* faces exteriores

Em ambos os casos não foi verificado destacamento de partículas na sequência do toque, podendo assim concluir-se que o nível de degradação não era muito elevado.

3.2.1 Procedimentos de ensaio

A campanha experimental in-situ foi iniciada logo após os desenhos das malhas nas faces estarem concluídos. Nesta campanha foram usados dois aparelhos de END: aparelho de ultrassons e o MS.

Uma vez que em campanhas anteriores, que usaram estes métodos não destrutivos em granitos, se verificou a existência de pequenas fragmentações após os primeiros impactos do MS (Luzio, 2010), foi decidido iniciar esta campanha pelo ensaio de ultrassons. Tendo em conta este aspeto é assim possível concluir que dos dois métodos utilizados, o de ultrassons é aquele que pode ser considerado completamente não destrutivo.

Ensaio de ultrassons

Os ensaios de medição da *VPU* foram realizados de acordo com a norma EN12504-4 (2004). Apesar de a norma indicar que a medição direta é aquela que apresenta melhores resultados e, por outro lado, referir que a medição indireta é a menos sensível e consequentemente conduzir a uma maior incerteza nos resultados, no presente estudo a medição indireta era a única que podia ser utilizada, uma vez que só uma face de cada granito era acessível. Esta configuração conduz a uma velocidade de propagação “aparente”, dado que o percurso é envolto em maiores incertezas e se opte para este uma distância predefinida entre o transdutor emissor e recetor (Galvão, 2009).

Para eliminar estas incertezas presentes no método indireto, o Anexo A da norma EN12504-4 (2004) indica que devem ser feitas várias medições na mesma face. Esta explica que o transdutor emissor deve ser fixado no primeiro ponto de um dos alinhamentos presentes na malha desenhada, sendo o transdutor recetor posicionado ao longo dos restantes pontos do mesmo alinhamento (Figura 3.5).

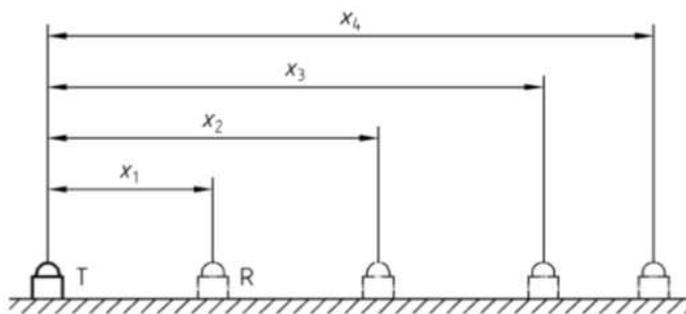


Figura 3.5: Exemplo do posicionamento dos transdutores na medição indireta (EN12504-4, 2004)

O aparelho de ultrassons utilizado nesta campanha foi o aparelho portátil da *MATEST*, disponibilizado pelo departamento de Engenharia de Civil da Universidade do Minho, com transdutores de frequência de 55 kHz (Figura 3.6).



Figura 3.6: Aparelho de ultrassons utilizado nos ensaios da casa de Guimarães (MATEST)

Antes de serem executadas as medições nas superfícies de granito o aparelho foi calibrado de acordo com as instruções do fabricante. Esta calibração é feita para que as medições devolvam valores com o máximo de precisão possível.

A calibração inclui duas ações. Na primeira, após a seleção da entrada apropriada do menu de configuração, devem ser colocados em contacto direto os dois transdutores com vista a obtenção do ponto “zero”, indicado pelo fabricante. Nesta, as faces de contacto dos transdutores devem estar cobertas com um material (gel ou massa consistente) que assegura um bom contacto entre eles sem a presença de vazios. Apesar de o fabricante fornecer um gel para este fim, foi utilizada plasticina já que esta é mais adequada para assegurar o perfeito contacto entre os transdutores e as superfícies de granito, evitando a ocorrência de vazios que influenciam os valores do tempo de propagação de ultrassons (Luzio, 2010).

Na segunda fase é utilizada uma barra de calibração, disponibilizada juntamente com o aparelho, com um tempo de propagação conhecido de $42.5 \mu\text{s}$. Seguindo o que foi feito na acoplação dos transdutores na primeira fase, aqui as faces continuam cobertas com a mesma plasticina que posteriormente irá permitir o melhor acoplamento entre estes e as superfícies de granito.

Após a calibração do aparelho foram feitas leituras numa das faces de granito, utilizando o método indireto. Aquando da finalização da série de leituras numa face, o processo de calibração do aparelho foi repetido antes de iniciar a leitura noutra face. Embora nas indicações do fabricante não seja indicada a necessidade de constantemente calibrar o aparelho em tão curto espaço de leituras, foi assim decidido para garantir que os resultados das diferentes leituras fossem mais precisos.

O cálculo da *VPU* pelo método indireto, devido às incertezas inerentes a esta configura-

ção, obriga a que os resultados obtidos numa série de leituras ao longo da mesma linha sejam desenhados graficamente, onde a inclinação da melhor regressão linear representa a velocidade média (Nepomuceno, 1999). Na Figura 3.7 encontra-se, a título exemplificativo, a representação gráfica para obtenção da velocidade média pelo método indireto, neste caso do alinhamento 1 da face do granito B.

Contudo, o declive da reta representada na Figura 3.7 representa o inverso da velocidade.

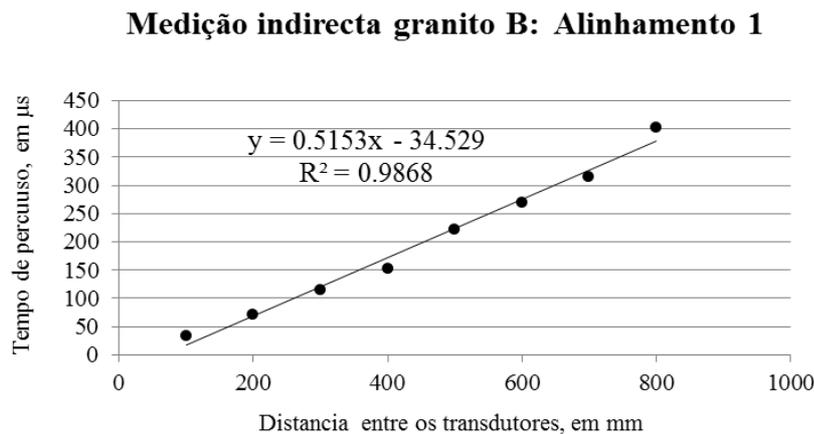


Figura 3.7: Exemplo da representação gráfica para a obtenção da velocidade média da onda na configuração indirecta

Após a determinação da *VP* em cada um dos alinhamentos, a velocidade média final para cada uma das faces é calculada pela média de todos os alinhamentos.

Ensaio de dureza superficial

Para a medição da dureza superficial das faces das pedras de granito foi utilizado o esclerómetro tipo NR com uma energia de impacto de 2.207 Nm, disponibilizado pelo laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho. A única diferença entre o esclerómetro tipo NR (Figura 3.8) e o tipo N reside no facto de o primeiro estar equipado com um acessório de escrita que regista o valor de impacto num gráfico num rolo de papel registador, facilitando o controlo do ensaio.



Figura 3.8: Esclerómetro tipo NR

O procedimento de utilização do esclerómetro foi estabelecido de acordo com a norma ASTM D5873 (1995). Seguindo esta norma, antes de cada sequência de teste ser iniciada o equipamento foi calibrado usando uma bigorna fornecida pelo fornecedor. A bigorna de calibração foi colocada sobre uma superfície lisa e sem inclinação, para que o equipamento fosse calibrado corretamente. A calibração é feita colocando o pistão do esclerómetro numa ranhura presente na bigorna e realizando dez leituras nesta. Uma vez que o valor registado pelo equipamento estava de acordo com o valor indicado pelo fabricante não foi necessário utilizar qualquer fator de correção.

Com o equipamento calibrado, seguiu-se uma inspeção visual a todos os pontos das malhas desenhadas, com o objetivo de detetar a presença de algum obstáculo à perfeita leitura dos valores de ressalto. Como obstáculo à leitura entenda-se a presença de protuberâncias significativas, partículas soltas ou qualquer outra particularidade que dificultasse o perfeito contacto entre o pistão e as superfícies dos granitos. Após a verificação referida, o esclerómetro foi colocado em contacto com a face de granito na posição horizontal fazendo um ângulo de 90° com a sua superfície para se realizarem as leituras.

O número de leituras em cada ponto singular da malha suscita alguma controvérsia, uma vez que as diferentes normas para este ensaio em rochas e as recomendações pelo fabricante divergem neste ponto. Os métodos sugeridos pela ISRM (1981) recomendam a recolha de vinte valores de impactos singulares, ao longo de toda a superfície de teste, calculando a dureza por eliminação de 50% dos valores mais baixos. Por sua vez Aydin (2008) sugere a consideração de todas as leituras no cálculo do valor médio de ressalto (Vasconcelos *et al.*, 2012). A ASTM D5873 (1995) sugere a leitura de dez impactos singulares. Esta indica que se uma leitura individual for superior ou inferior à média das dez leituras em sete unidades deve ser descartada e o resultado será dado pela média das restantes nove leituras (Nepomuceno, 1999). No caso de haverem 20% de valores que divergem da média em sete unidades estes devem ser excluídos, calculando-se a média com os restantes valores

(Luzio, 2010).

Assim foram realizados em cada ponto dez leituras sucessivas ao longo de todos os pontos da malha. Sendo assim possível fazer uma posterior comparação entre os procedimentos sugeridas pela ISRM e ASTM, e ainda analisar a evolução dos valores de ressalto ao longo dos impactos sucessivos.

3.2.2 Análise de resultados

Resultados do ensaio de ultrassons: Caso real

Na Tabela 3.2 e Figura 3.9 são apresentados os valores da VPU para cada uma das pedras de granito selecionadas previamente.

Tabela 3.2: VPU indireta nas faces das pedras de granito (transdutores de 55 kHz)

Face	Granito	$VPU_{55}(m/s)$
Interior	A	2184.66
	B	1903.14
	C	2587.67
	D	1938.80
Exterior	E	3170.24
	F	2989.70
	G	2563.87

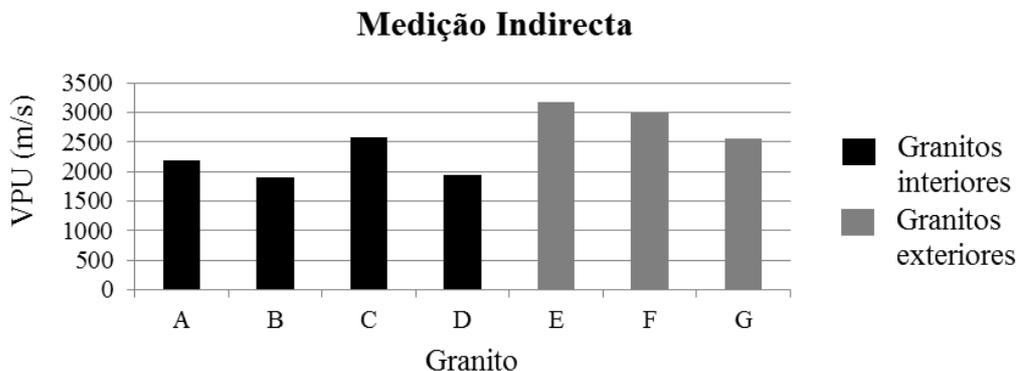


Figura 3.9: VPU indireta nas faces das pedras de granito

Da leitura global dos resultados é notório que, em termos gerais, as faces exteriores apresentam valores mais elevados de VPU comparativamente com as interiores. Contudo, é possível observar que a face G apresenta valores significativamente mais baixos relativamente às faces exteriores E e F, e inclusive ligeiramente inferiores à face interior C. Esta última apresenta, por sua vez, valores significativamente mais elevados quando comparado com as restantes faces interiores, que entre si apresentam valores bastante aproximados.

No caso particular das faces exteriores, não foi observado in-situ a existência de algum pormenor relevante que justifique por si só a diferença de valores do granito G para os restantes 2 casos. Importa também realçar que as faces exteriores foram submetidas ao ensaio de ultrassons em dias diferentes, tendo a face E sido ensaiada num dia diferente relativamente às faces G e F. Porém, para mitigar os efeitos dos ciclos de molhagem e secagem nestas, dado que se encontravam expostas ao exterior, foi traçado um plano de ensaios que imponha que a realização dos ensaios ultrassónicos tivesse lugar após um período superior a sete dias consecutivos de sol. Após as faces G e F terem sido submetidos a ensaios, foram feitas leituras em alguns pontos da face E, que tinha sido previamente ensaiada, e não foi encontrada nenhuma variação significativa relativamente às leituras iniciais. Logo, esta diferença de valores não pode ser justificada pelo diferente teor de humidade presente nas pedras de granito.

Assim, essa diferença pode ser explicada mediante um conjunto de fatores plausíveis, nomeadamente:

1. A hipótese de as faces E e F serem de granitos de uma pedreira diferente da do granito identificado pelo face G ou serem faces de granito relativas a planos de desmonte diferente. Estas hipóteses devem ser consideradas porque a disposição das pedras de granito ensaiadas variava ao longo da fachada (Figura 3.10), dado que na altura da sua seleção para esta campanha de ensaios não foi tida em consideração a disposição destas ao longo da mesma;
2. Ainda que visivelmente não se consiga avaliar o estado de alteração é possível que a pedra identificada com a letra G esteja mais alterada.

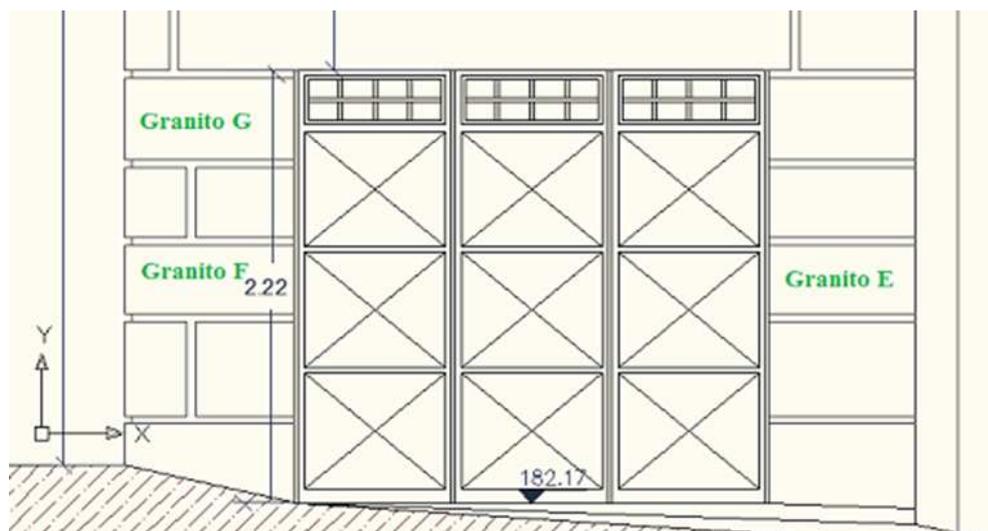


Figura 3.10: Disposição dos granitos exteriores ensaiados (pormenor adaptado do desenho do alçado sul fornecido pela Arq. Sofia Castro)

Relativamente ao caso das faces interiores, a diferença de valores VP_U da face C para as restantes pode ser explicada pelo facto de a sua superfície aparentar ser ligeiramente

mais lisa e regular que as restantes faces interiores. Deste conjunto, salienta-se que os casos que apresentam valores mais elevados, A e C, são pedras de granito com maiores dimensões, o que faz com que tenham sido submetidas a um número superior de leituras nas suas faces. Porém, devido à pequena diferença de *VPU* existente entre a face A, B e D é possível afirmar que o número de leituras nos últimos duas é satisfatória.

Analisando os dois conjuntos, exterior e interior, colocando de parte os casos particulares mencionados acima, a diferença de *VPU* pode ser justificado pela diferença superficial, dado o aspeto estético considerado no caso da superfície exterior das pedras. Isto poderá indicar a influência da rugosidade nos valores obtidos para a *VPU*.

Resultados dureza superficial: Caso real

Devido à existência de um número significativo de normas e autores que apresentam diferentes propostas de análise da determinação do valor de ressalto de Schmidt (dureza superficial), decidiu-se fazer um tratamento mais abrangente dos dados registados com vista a explorar esta técnica não destrutiva.

Na Tabela 3.3 são apresentados os valores médios de ressalto após diferentes análises dos resultados. Fazendo a análise dos resultados apresentados, chega-se à conclusão que em faces com superfícies irregulares existe um aumento significativo do valor de ressalto obtido num segundo impacto em relação ao primeiro, havendo em todos os casos destacamento de partículas. Em termos médios nas faces interiores existe uma diferença de 5.33 unidades entre o primeiro e o segundo impacto, enquanto nas exteriores é obtida uma diferença média de 4.93 unidades. Antes de ser iniciada a campanha, conforme foi descrito anteriormente, na comparação do conjunto de faces interiores e exteriores, por meio de inspeção visual, foi observado que entre ambas eram ligeiras as diferenças em termos de rugosidade e desgaste, sendo que nenhuma delas apresentava destacamento de partículas quando sujeitas ao toque. Esta diferença pode ser explicada sobretudo pelo valor obtido na face B que, segundo os resultados, apresenta maior desgaste superficial. Essa ideia pode ser reforçada quando se faz a análise da média do conjunto de valores do primeiro impacto em todos os pontos da malha, apresentando um valor de ressalto ligeiramente inferior a 50.

No cômputo geral, quando são desprezados os valores do primeiro impacto, as faces interiores apresentam valores ligeiramente superiores às exteriores, com valores de 62.44 e 62.26 e um coeficiente de variação (CV) de 1.93% e 0.80%, respetivamente. Por sua vez, quando são considerados a totalidade dos impactos o valor de ressalto, arredondado a duas unidades, é exatamente igual, divergindo apenas no valor de CV.

Analisando a progressão do valor de ressalto, em termos médios ao longo dos cinco primei-

ros impactos, é mantida a tendência das faces interiores registarem valores ligeiramente superiores. Concluí-se assim que a consideração apenas do primeiro impacto pode conduzir a resultados enganadores em superfícies bastante rugosas.

Tabela 3.3: Valores médios de ressalto de Schmidt

Face	Granito	1º impacto		Impactos sucessivos		Exceto o 1º impacto		5 primeiros impactos		(2º – 1º) impacto
		N	CV (%)	N	CV (%)	N	CV (%)	N	CV (%)	
Interior	A	53.54	12.75	62.88	6.38	63.92	3.91	60.34	7.52	4.88
	B	49.72	13.53	60.73	5.27	61.96	5.00	57.67	9.37	6.00
	C	54.81	5.28	61.75	4.00	62.78	2.59	60.03	5.21	4.96
	D	51.88	7.64	60.18	4.79	61.10	3.17	60.18	6.15	5.50
	Média	52.49	4.20	61.38	1.94	62.44	1.93	59.55	2.12	5.33
Exterior	E	51.74	10.16	60.75	5.40	61.75	5.29	57.44	6.96	5.30
	F	52.75	7.73	61.32	4.25	62.27	3.62	58.73	6.25	5.33
	G	55.83	6.92	62.06	4.27	62.75	2.56	60.20	4.40	4.17
	Média	53.44	4.00	61.38	1.07	62.26	0.80	58.79	2.35	4.93

Nas Figuras 3.11 e 3.12 é apresentado o progresso do valor de ressalto em termos médios devido à influência da rugosidade. Como já foi referido anteriormente, existe uma variação considerável entre o primeiro e segundo impacto, sendo que os valores tendem a estabilizar a partir do quinto impacto.

Na Tabela 3.4 é feita a comparação entre os valores de ressalto obtidos a partir dos métodos sugeridos pela ISRM (1981) e a norma ASTM D5873 (1995). Como seria de esperar a ISRM apresenta valores mais elevados, uma vez que são considerados apenas os 50% valores mais elevados de cada sequência de ensaio. No entanto, em ambas metodologias as faces interiores apresentam valores ligeiramente mais elevados, o que converge com a análise feita a partir da Tabela 3.3.

Dos resultados obtidos pelo ensaio esclerómetro é possível aferir que as condições superficiais (rugosidade e desgaste) dos granitos são características que influenciam os resultados finais. Apesar das faces exteriores apresentarem maior rugosidade os resultados indicam que as faces interiores apresentam um nível de desgaste superior. Esta conclusão pode parecer algo contraditória, dado que as faces exteriores estão sujeitas às intempéries ao contrário das interiores. Contudo, à partida para esta campanha foi logo perceptível que as primeiras, apesar da sua textura bastante rugosa, apresentavam um corte mais “limpo” e rigoroso.

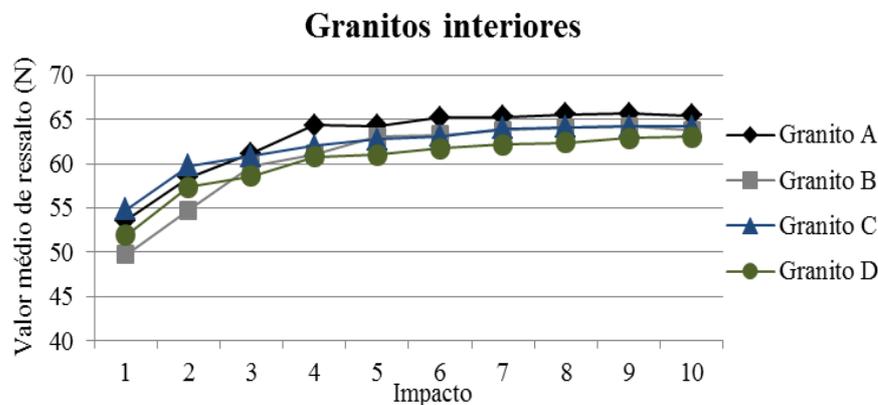


Figura 3.11: Progresso do valor de ressalto em termos médios ao longo de impactos sucessivos nas faces de granito interiores

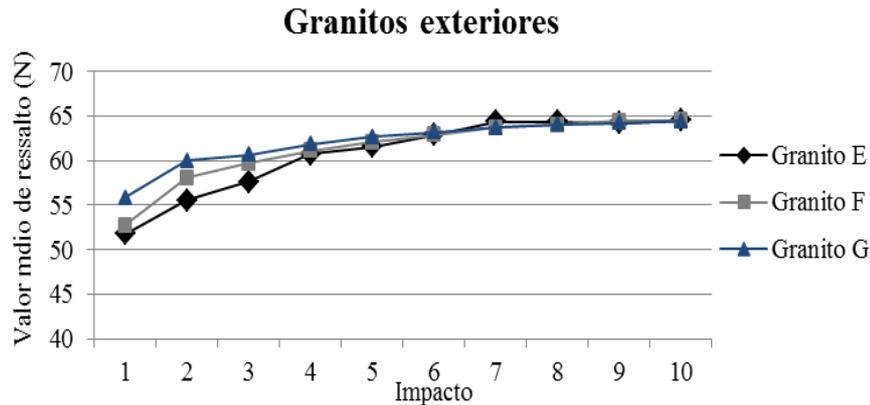


Figura 3.12: Progresso do valor de ressalto em termos médios ao longo de impactos sucessivos nas faces de granito exteriores

Tabela 3.4: Valores médios de ressalto de Schmidt obtidos segundo as normas ISRM e ASTM

Face	Granito	ISRM(N)	CV (%)	ASTM(N)	CV (%)
Interior	A	65.68	6.11	63.41	6.91
	B	64.08	5.58	62.15	5.18
	C	56.80	3.72	54.81	5.28
	D	55.00	4.76	51.88	7.64
	Média	60.39	8.73	58.06	9.65
Exterior	E	64.41	5.93	61.34	5.75
	F	55.67	5.04	52.75	7.73
	G	59.17	2.68	55.83	6.92
	Média	59.75	7.36	56.64	7.68

3.3 Blocos de granito

Uma vez que vários tipos de granito são amplamente usados como material de construção em edifícios de pedra, dependendo das suas características petrológicas, tais como o tamanho do granulado e estrutura interna (Vasconcelos, 2005), e procurando fazer um estudo mais aprofundado da aplicabilidade dos métodos de análise não destrutiva, assim como a posterior caracterização física e mecânica deste material, foram selecionados quatro tipos diferentes de granito. Tendo conhecimento dos vários tipos de granito que estudos anteriores da autoria de Vasconcelos (2005) e Luzio (2010) abordaram, neste trabalho foram analisados dois blocos de granito amarelos e dois azuis (Figura 3.13). Os granitos amarelos são ambos de Guimarães, sendo que um deles foi extraído na freguesia de Gonça localizada no extremo nordeste do concelho de Guimarães. Os granitos azuis são provenientes de Guimarães e Gondomar.

Petrograficamente os granitos amarelo e azul de Guimarães são de grão médio a grosseiro. A sua ilustração é apresentada na Figura 3.14 (a) e Figura 3.14 (b), respetivamente. Os granitos de Gonça e Gondomar são ilustrados nas Figura 3.14 (c) e Figura 3.14 (d), respetivamente, e são granitos de grão fino a médio de duas micas.

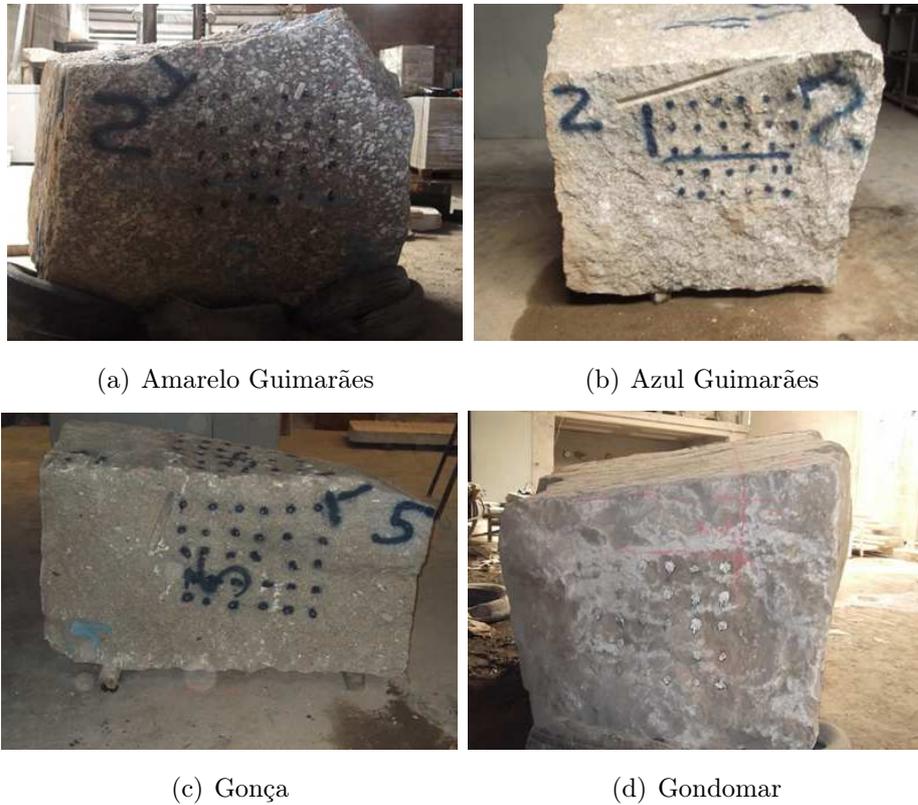


Figura 3.13: Blocos não retificados

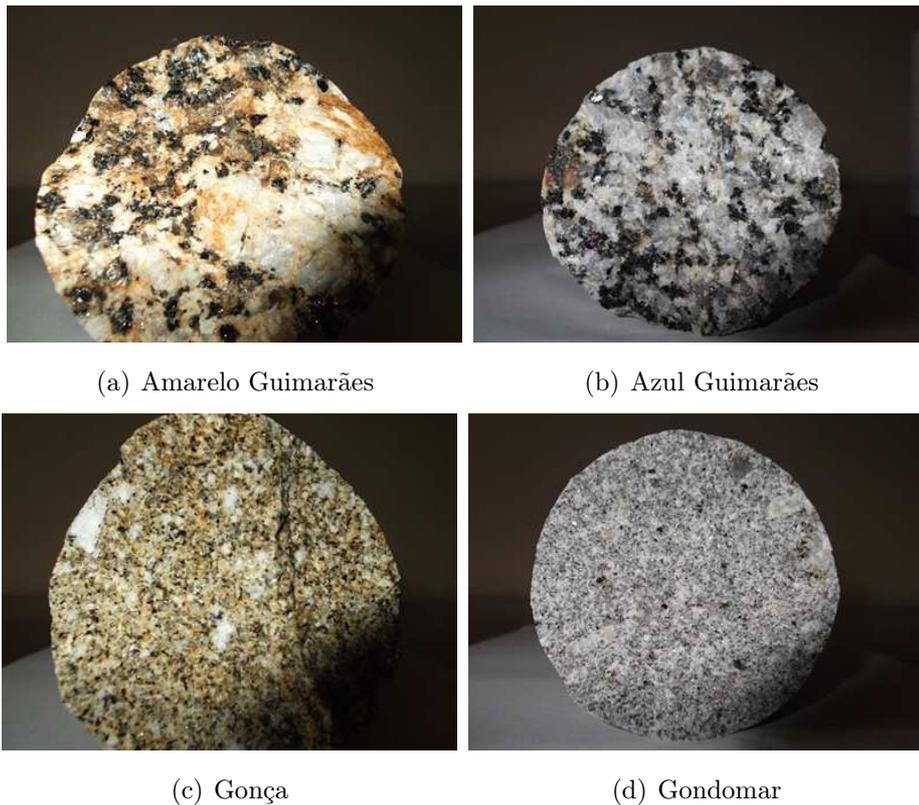


Figura 3.14: Pormenor dos quatro tipos de granito selecionados

Com vista numa campanha experimental posterior, a dimensão mínima de cada um dos blocos obedeceu à necessidade do seu desmonte em provetes de acordo com um número e tamanho previamente estabelecidos. No entanto estes apresentavam entre si dimensões distintas, uma vez que os blocos, embora respeitando essa necessidade, foram selecionados conforme a sua disponibilidade imediata. Assim, para além do requisito da dimensão mínima, a sua dimensão máxima também teve de ser estabelecida, pois estes iriam ser submetidos a ensaios de ultrassons na configuração direta, imposta pelo comprimento dos cabos disponíveis com o aparelho de ultrassons.

Contudo, não foi possível a obtenção de um bloco amarelo de Gonça que obedecesse a estes dois critérios de seleção. Face a essa contrariedade foi decidido avançar com a campanha experimental num bloco com dimensões inferiores às mínimas, fazendo com que os provetes de Gonça em falta fossem posteriormente obtidos a partir de outro bloco. Porém, este não foi disponibilizado atempadamente impossibilitando a sua avaliação não destrutiva, sob forma de bloco.

Na Tabela 3.5 são apresentadas as dimensões aproximadas dos blocos submetidos a avaliação não destrutiva.

Tabela 3.5: Dimensões aproximadas dos blocos não retificado em análise

Bloco	Dimensão (m^3)
Amarelo de Guimarães	$1.35 \times 0.90 \times 1.00$
Azul de Guimarães	$1.45 \times 0.95 \times 1.20$
Amarelo de Gonça	$1.44 \times 0.90 \times 0.60$
Azul de Gondomar	$1.18 \times 1.21 \times 1.13$

Antes de ser iniciada a campanha de ensaios que englobaria as duas técnicas não destrutivas anteriormente usadas na secção 3.2, inicialmente foi feita a análise da anisotropia dos blocos de granito. A anisotropia das rochas está diretamente relacionada com a orientação dos materiais constituintes destas e com as alterações a que estas estão sujeitas ao longo do tempo. Segundo Fort *et al.* (2011), a anisotropia em materiais rochosos pode ser identificada como resultado da orientação dos grãos e cristais, pela acumulação de minerais, pela sua disposição ao longo das diferentes camadas, pela orientação das pressões a que estão sujeitas e também pelo número e orientação de poros e falhas.

Apesar de inicialmente o efeito da anisotropia em rochas ígneas ser subestimado comparativamente com as rochas metamórficas (Prikryl, 2001), sendo os granitos considerados como rochas de baixa anisotropia (Luzio, 2001), estudos suportam a ideia que a maioria dos granitos não deve ser analisado como material isotrópico. Uma vez que a anisotropia dos granitos pode ser relevante numa posterior análise das propriedades mecânicas (Prikryl, 2001 citado por Vasconcelos, 2005), e como esta poderá ser avaliada com base na medição da propagação de ultrassons (Kahraman, 2007, Vishnu *et al.*, 2010 e Altindag, 2012), neste trabalho foram feitos esforços para identificar os planos de anisotropia. Esta identificação pode ser feita por observação da orientação preferencial dos minerais de quartzo ou feldspato. Contrariamente ao pretendido, nos blocos de granito ensaiados, não foi possível determinar essa orientação. Assim foi decidido numerá-los de acordo com a direção paralela e perpendicular ao plano de desmonte dos maciços rochosos, identificado com o auxílio dos operários da empresa *Artecanter*.

Nos granitos amarelos de Gonça e Guimarães a direção do plano de desmonte é identificado pela direção das faces 1 e 3, enquanto nos granitos azul de Guimarães e Gondomar este é indicado pela direção das faces 5 e 6.

Posteriormente à numeração das faces foram desenhadas malhas de pontos em cada uma delas, com uma finalidade análoga à dos ensaios realizados na casa. Contrariamente às dificuldades encontradas no desenho das malhas nas pedras de granito das paredes da casa de Guimarães que, devido às dimensões das diferentes superfícies, obrigaram que a malha de pontos variasse de dimensão entre as faces em estudo, nos blocos foi possível desenhar

malhas iguais em todas as faces dos diferentes blocos. Em todos os blocos não retificados e, posteriormente, retificados foram desenhadas malhas de trinta pontos, separados entre si por 10 *cm*, tanta na direção horizontal como na vertical.

Devido ao número elevado de faces onde iriam ser desenhadas malhas de pontos foi decidido criar um molde. O molde consistiu numa folha de cartão com dimensão suficiente para serem perfurados trinta pontos respeitando a configuração da malha pretendida. Após o molde estar concluído, os pontos foram marcados nos blocos com tinta de *spray*. Para além de acelerar o processo, a sua utilização permitiu desenhar malhas com um método mais preciso. Essa precisão é essencial, sobretudo quando se pretende aplicar o método de ultrassons na configuração direta entre faces de blocos separados por um comprimento considerável. Assim foi garantido que os pontos em faces opostas se encontravam marcados exatamente no mesmo alinhamento.

Durante o desenho das malhas foram confirmadas algumas particularidades dos blocos que numa primeira observação já tinham sido detetadas. Para além da forma bastante irregular, inerente a todos os blocos, o granito amarelo de Guimarães apresentava níveis de desgaste superficial bastante elevados. Quando submetido a ligeiros toques eram visíveis destacamentos de partículas. Isto pode ser explicado com base no facto de este bloco ter sido extraído da pedreira há bastante tempo tendo sido mantido, até ao início desta campanha, no exterior com outros blocos empilhados sobre ele. O peso provocado por esse empilhamento de blocos fez com que a face em contato com o solo se encontrasse enterrada. Através da Figura 3.15 é possível observar o estado bastante degradado em que esta se encontrava, onde inclusivamente se podia observar a presença de alguma vegetação.



Figura 3.15: Granito amarelo de Guimarães não retificado com face visivelmente degradada

Para além disso, quase todas as faces continham camadas de terra entre as suas zonas mais irregulares. Esse estado obrigou a uma escovagem das faces de forma a possibilitar a realização dos ensaios.

No granito azul de Guimarães, apesar de em alguns casos pontuais se verificar destacamento de partículas, encontrava-se menos degradado comparativamente com o granito

amarelo de Guimarães. A sua superfície era bastante irregular e algumas das faces tiveram de ser escovadas para eliminar partículas de solo.

O bloco de Gonça apresentava faces pouco rugosas e sem destacamento de partículas ao toque. Neste foram detetadas a presença de fissuras com cerca 2 *mm* de abertura, apesar de não ter sido possível apurar a sua profundidade. Com efeito, alguns dos pontos da malha foram intercalados por fissuras (Figura 3.16 (a)).

Finalmente, a inspeção visual do granito de Gondomar resultou na verificação da presença de marcas do uso de ferramentas de extração em duas das suas faces. Essas marcas são ilustradas na Figura 3.16 (b). As restantes faces apresentavam superfícies bastantes lisas e macias, ressaltando a presença de algumas protuberâncias.



(a) Fissura entre 2 pontos (granito de Gonça)



(b) Aberturas provocadas pelo uso de ferramentas de extração (granito de Gondomar)

Figura 3.16: Pormenores faces não retificadas

3.3.1 Procedimentos de ensaio

Após a identificação do plano de desmonte, limpeza das faces dos blocos não retificados e desenho das malhas, estes foram submetidos a uma campanha de END. Analogamente ao que foi feito na casa de Guimarães foi usado um aparelho de ultrassons e um MS.

Seguindo o mesmo procedimento, inicialmente foram determinadas as *VPU*, na configuração indireta e direta, e posteriormente foram realizados ensaios esclerométricos. Esta ordem de ensaios foi seguida nos blocos de granito com faces não retificadas e com faces retificadas.

A retificação dos blocos foi feita na empresa *Artecanter* por meio de uma máquina equipada com um fio de corte. Para facilitar o processo de corte os blocos estiverem sob jorrimento de grandes quantidades de água (Figura 3.17). Assim, todos os blocos após serem retificados foram expostos ao sol durante períodos alargados de tempo a fim de,

quanto possível, estarem secos e em condições similares às apresentadas na fase não retificada, no que concerne ao teor de água.



Figura 3.17: Retificação dos blocos de granitos

Como resultado deste processo todos os blocos passaram a apresentar superfícies lisas e não rugosas. Devido à imposição das dimensões dos blocos, expostas anteriormente, a forma final de alguns blocos continha irregularidades, havendo pontualmente locais onde a retificação deixou algo a desejar. Todavia as malhas de pontos foram desenhadas sobre superfícies lisas. O resultado final é ilustrado na Figura 3.18.



(a) Amarelo Guimarães



(b) Azul Guimarães



(c) Gonça



(d) Gondomar

Figura 3.18: Blocos de granito com face retificada

Importa salientar que nesta campanha os ensaios ultrassónicos foram levados a cabo com o instrumento ultrassónico *Pundit Lab* (Figura 3.19) fabricado pela *procep*, disponibilizado pelo laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho. Relativamente ao instrumento ultrassónico operado na secção 3.2, para além da diferença de fabricante existem diferenças ao nível da frequência dos transdutores que acompanham os aparelhos. Os

transdutores utilizados nesta secção têm uma frequência de 54 kHz, ao contrário dos 55 kHz utilizados anteriormente.



Figura 3.19: Aparelho de ultrassons utilizado nos ensaios em blocos de granito

Esta alteração de equipamento foi executada em razão da maior facilidade de detecção de sinal que o segundo apresentou comparativamente com o primeiro. Todavia, para avaliar os efeitos da troca de aparelhos, foram realizadas medições nas barras de calibração, que acompanham cada um deles, com tempos de propagação conhecidos e também em granitos iguais. Os resultados obtidos não apresentaram diferenças consideráveis, permitindo que esta transição fosse realizada sem comprometer os objetivos do presente trabalho.

Ensaio de medição da *VPU* em blocos de granito

Adicionalmente às medições indiretas efetuadas na casa de Guimarães, impostas pela disposição das pedras de granito ensaiadas, nos blocos de granito foram realizadas também medições diretas. Medições indiretas foram realizadas nas seis faces de cada bloco com o propósito de comparar com os resultados obtidos anteriormente, avaliando a aplicabilidade deste método em condições reais onde na maioria dos casos não é possível testar outra tipo configuração. O uso de duas configurações distintas de posição de transdutores permitirá também obter novas correlações entre ambos os métodos, assim como uma comparação com outras existentes, como é o caso da correlação obtida por Kahraman (2001) e Luzio (2010).

Além de a configuração direta garantir melhores resultados, porque a sua disposição possibilita que maiores quantidades de energia emitida seja recebida, e maior facilidade de utilização que a indireta, que obriga a várias leituras por necessidade de incrementos da posição do transdutor recetor (Malhotra *et al.*, 1991), foi, também utilizada com o objetivo de aferir a influência e grau de anisotropia presentes nos blocos. Para isso foram realizadas medições diretas ao longo dos três planos ortogonais.

Diferentes condições superficiais das faces dos granitos foram consideradas com o objetivo de avaliar as condições de irregularidade superficial e o impacto que estas provocam nas configurações de leitura do instrumento de ultrassons.

Os ensaios ultrassónicos foram realizados de acordo com a norma EN12504-4 (2004).

Embora o instrumento ultrassónico usado nesta campanha seja diferente do anterior o método de operação é bastante semelhante. O ensaio inicia-se com a calibração do aparelho utilizando uma barra fornecida especificamente para esse efeito com um tempo de propagação de $25 \mu s$ (Figura 3.20).



Figura 3.20: Calibração do *Pundit Lab* por meio de uma barra com tempo de propagação conhecido

De igual modo ao procedimento explicado na secção 3.2 foi utilizada uma plasticina para facilitar o contacto dos transdutores com a superfície dos blocos de granito. Nesta campanha o uso da plasticina revelou-se bastante importante porque algumas faces dos blocos não retificados obrigaram ao uso de quantidades consideráveis deste material. Como em alguns blocos nas faces existiam destacamento de partículas quando submetidas ao toque a plasticina tinha de ser constantemente substituída, obrigando que o processo de calibração fosse repetido várias vezes. No caso das faces retificadas a quantidade usada foi claramente menor, dado que as faces eram completamente lisas e limpas.

O procedimento de cálculo da *VPU* na configuração indireta foi anteriormente explicado na secção 3.2.1, encontrando-se ilustrada na Figura 3.21 (a) a operação do equipamento para esta configuração.

No ensaio direto foram feitas medições em todos os pontos das malhas, com os transdutores em faces opostas sendo que o recetor era colocado no ponto exatamente oposto àquele em que se encontrava o emissor. Devido às dimensões consideráveis dos blocos esta configuração obrigou a intervenção de outra pessoa (Figura 3.21 (b)).



(a) Configuração indireta



(b) Configuração direta

Figura 3.21: Ensaio de medição da propagação de ultrassons

O cálculo da VPU na transmissão direta em cada ponto foi obtido através da seguinte expressão:

$$VPU = \frac{l}{t} \quad (3.1)$$

onde VPU é a velocidade de propagação dos ultrassons (m/s), l é a distância entre transdutores em (m) e t é o tempo de propagação das ondas (s).

O valor médio final da VPU em cada direção foi calculado a partir da média da VPU na totalidade dos pontos.

Ensaio de medição da dureza superficial em blocos de granito

Tal como aconteceu no ensaio de ultrassons, os ensaios esclerométricos seguiram procedimentos iguais aos executados na casa de Guimarães. Em suma, nesta campanha de ensaios foi utilizado o mesmo MS e seguida a norma ASTM D5873 (1995) na operação do aparelho. A fim de ser possível uma análise comparativa de resultados entre as normas ASTM D5873 (1995) e ISRM (1981) foram executados trinta impactos singulares, correspondentes ao número de pontos da malha, em cada face. Para análise da evolução da rigidez foram aplicados dez impactos sucessivos em quinze pontos da mesma face, sendo que apenas metade das faces de cada bloco foram ensaiadas. A seleção das três faces a ensaiar foi feita de acordo com as orientações paralela e perpendicular ao plano de desmonte, à semelhança do que foi feito nos ensaios de transmissão direta de ultrassons, com o MS posicionado na horizontal perpendicularmente à superfície (Figura 3.22)



Figura 3.22: Equipamento e operação do MS

O equipamento era calibrado antes de serem medidos cada um dos quatro blocos, na fase retificada e não retificada. Uma vez que este é um método de análise superficial esta alteração assume especial interesse.

Durante as leituras o bloco amarelo de Guimarães não retificado apresentou danos bastante consideráveis nos pontos em que estas eram feitas. Sempre que o pistão de impacto era comprimido contra a superfície eram visíveis grandes destacamentos de partículas, sobretudo nas faces mais degradadas.

Entre os restantes blocos não retificados registou-se um comportamento semelhante, havendo destacamento de partículas na sequência dos primeiros impactos, ainda que menos acentuados relativamente aos registados no bloco amarelo de Guimarães não retificado.

Em sentido oposto, nas leituras em blocos retificados não foram detetados grandes destacamentos imediatamente após o primeiro impacto, mas com a aplicação de impactos sucessivos eram visíveis sinais ligeiros de destruição da superfície. No entanto, o nível de destruição era variável entre os diferentes tipos de granitos ensaiados.

3.3.2 Análise dos resultados

Análise dos resultados obtidos por meio do ensaio de medição da *VPU* em blocos de granito

Como resultado da campanha ensaios de medição da *VPU* nos quatro blocos foram obtidos valores médios de *VPU* na configuração direta em três dos blocos não retificados e em quatro blocos retificados. A exceção da não medição direta no bloco amarelo não retificado de Guimarães deveu-se em parte às suas condições de elevado desgaste que dificultaram a deteção do sinal e a problemas com os cabos do aparelho de ultrassons. De forma a não prolongar excessivamente esta campanha, foi decidido proceder à sua retificação.

No que diz respeito à medição indireta da *VPU* em blocos não retificados, não foram efetuadas medições na face 6 do granito azul de Gondomar por razão da presença de fendas de largura considerável, anteriormente referidas e ilustradas na secção 3.3. Todas as restantes faces em blocos não retificados e retificados foram medidas.

Considerando o percurso de viagem do sinal ultrassónico para cada uma das configurações, importa explicar como são identificados os planos paralelos e perpendiculares ao plano de desmorte de cada um dos blocos. Importa referir que neste trabalho foram considerados os planos de desmorte identificados por direções de faces diferentes, de acordo com o que foi anteriormente explicitado. Assim na configuração direta são considerados como plano paralelo ao desmorte a direção 1_3 no caso dos blocos de granito amarelos e a direção 5_6 para os granitos azuis. Por outro lado, na configuração indireta a identificação da direção paralela ao plano de desmorte não é feita de acordo com a direção das faces mas sim pelas faces em si.

Na Figura 3.23 é representada a direção de propagação do impulso sónico em função do plano paralelo ao desmorte. A direção paralela relativa à configuração direta encontra-se assinalada a verde, e a vermelho é indicada a direção paralela no método indireto para cada um dos conjuntos de planos de desmorte considerados.

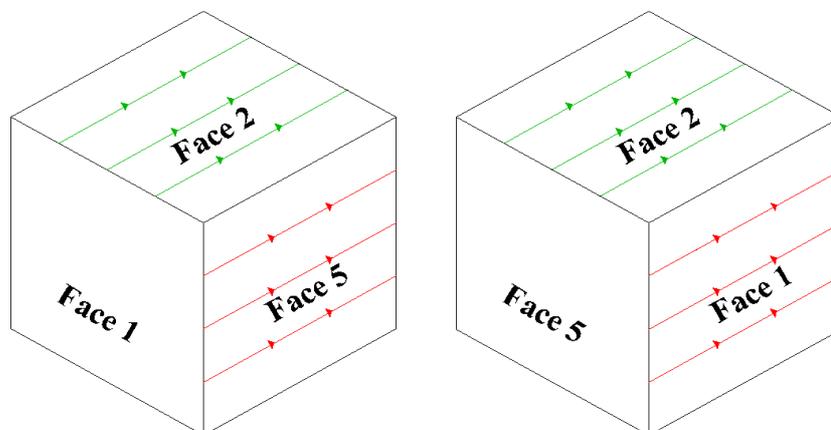


Figura 3.23: Direção da propagação ultrassónica para cada uma das configurações de medição e tipos de granito (amarelos à esquerda e azuis à direita)

Os valores obtidos a partir das duas configurações de medição de *VPU* de transdutores são apresentados nas Tabelas 3.6 a 3.9. Para uma melhor perceção da influência da anisotropia os mesmos são ilustrados nas Figuras 3.24 a 3.27.

Através da comparação dos valores apresentados na Tabela 3.6 e 3.7 é notório que o valor da *VPU* é superior na direção paralela ao plano de desmorte, quer no caso da superfície rugosa, quer na superfície lisa após a retificação dos blocos. Por outro lado verifica-se que os valores obtidos nas superfícies lisas após retificação apresentam valores de *VPU* supe-

riores nas três direções, resultando por isso numa variação positiva em todos em termos médios de VPU em cada um dos blocos.

Percentualmente o valor de variação da VPU entre blocos não retificados e retificados é maior no granito azul de Guimarães e menor no granito amarelo Gonça, com 16.18% e 2.38%, respetivamente. Estes resultados podem ser justificados com base na inspeção visual inicial que indicava diferentes estados de desgaste. Por esta razão é correto concluir que a configuração direta de medição de ultrassons permite avaliar com satisfação o estado superficial dos granitos.

Analisando o valor médio de VPU dos blocos de Guimarães retificados é registado um valor superior no granito amarelo. Uma vez que a cor amarela significa um maior grau de alteração é com alguma surpresa que se regista essa superioridade. No entanto, outros parâmetros devem ser tidos em consideração nesta análise, nomeadamente o número e tamanho dos cristais presentes, assim como a percentagem de água contida.

Tabela 3.6: Medição direta: Valores médios da VPU em blocos não retificados (transdutores de 54 kHz)

Bloco	Direção	$VPU_{54}(m/s)$
Amarelo Guimarães	1_3	-
	2_4	-
	5_6	-
Média		-
Azul Guimarães	1_3	3611.53
	2_4	3672.66
	5_6	3796.71
Média		3693.63
Gonça	1_3	3034.00
	2_4	2982.36
	5_6	2553.01
Média		2856.46
Gondomar	1_3	4724.83
	2_4	4496.70
	5_6	5193.00
Média		4804.84

Tabela 3.7: Medição direta: Valores médios da VPU em blocos retificados (transdutores de 54 kHz)

Bloco	Direção	$VPU_{54}(m/s)$
Amarelo Guimarães	1_3	4628.31
	2_4	4376.57
	5_6	4317.93
Média		4440.93
Azul Guimarães	1_3	4137.22
	2_4	4317.12
	5_6	4420.52
Média		4291.62
Gonça	1_3	3111.36
	2_4	3028.79
	5_6	2629.27
Média		2923.80
Gondomar	1_3	5133.70
	2_4	5282.99
	5_6	5356.10
Média		5257.59

Observando as diferenças de VPU em cada uma das três direções consideradas, são visíveis em todos os blocos de granito valores mais altos na direção paralela ao plano de desmonte nas duas fases (Figura 3.24 e 3.25). Como seria de esperar essa diferença é mais acentuada no granito azul de Guimarães retificado, por razão da eliminação da rugosidade e imperfeições que dificultavam a acoplação dos transdutores, dificultando dessa forma a deteção do sinal emitido.

Em face retificada a diferença de VPU entre a direção com valores mais altos e a direção com valores intermédios, os granitos que são constituídos por grãos de maiores dimensões apresentam diferenças mais acentuadas comparativamente com os granitos compostos por grãos menores. Este resultado poderá indicar que o grau de anisotropia é superior nos granitos de grão médio a grosseiro.

Todavia, pelo mesmo critério de análise, em face não retificada o granito de Gondomar apresenta valores bastante mais elevados que os restantes granitos, com uma diferença de $468.17 m/s$. Notar que em face não retificada este apresentava fendas ao longo da face 6 que podem ter interferido com a leitura do sinal ultrassónico.

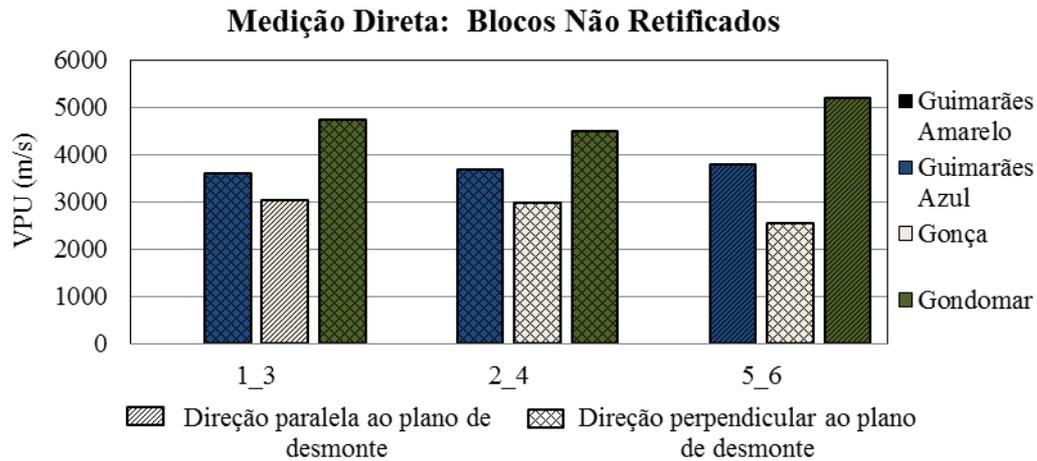


Figura 3.24: Medição direta da *VP*U em blocos não retificados com a indicação da direção do respetivo plano de desmorte

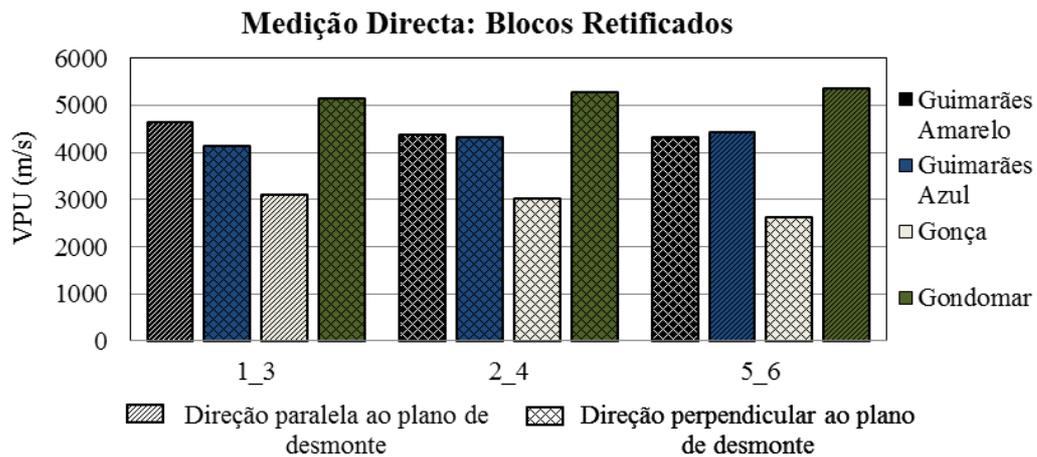


Figura 3.25: Medição direta da *VP*U em blocos retificados com a indicação da direção do respetivo plano de desmorte

Dos valores registados pelo método indireto durante a fase não retificada (Tabela 3.8) o primeiro aspeto que prende a atenção é a permuta de posição da ordem de grandeza de valores de *VP*U entre o granito amarelo de Guimarães e os granitos azul de Guimarães e de Gonça obtidos na medição direta. Das faces que o constituem são perceptíveis as diferenças de valores das faces 2 e 3 com as restantes. Curiosamente a face 1 que apresentava sinais mais notórios de degradação, por ser a face enterrada no solo, apresenta números superiores aos de outras faces do mesmo granito. Com o alisamento das faces essa superioridade relativa desvanece-se, mostrando até uma diferença significativa para com as restantes (Tabela 3.9), o que pode ser interpretado como que mesmo após a retificação os efeitos de degradação não foram totalmente eliminados, embora superficialmente não fossem notados.

Com a retificação das faces é reposta a posição de ordem de grandeza dos valores de VPU que tinha sido obtida por medição direta, com os valores do granito amarelo de Guimarães a serem superados apenas pelo granito de Gondomar.

Na configuração indireta é novamente observada a tendência de a VPU aumentar aquando da retificação das faces. Como seria de prever a variação é maior no caso do granito amarelo de Guimarães com uma percentagem de 93.82%. Nesta configuração o granito de azul de Guimarães, Gondomar e Gonça apresentam valores de variação notoriamente superiores comparativamente com os observados na configuração direta, com percentagens de 30.32%, 17.78% e 20.78%, respetivamente.

Tabela 3.8: Medição indireta: Valores médios da VPU em blocos não retificados (transdutores de 54 kHz)

Bloco	Face	$VPU_{54}(m/s)$
Amarelo Guimarães	1	1602.88
	2	3002.74
	3	3023.85
	4	1771.87
	5	1566.03
	6	1523.95
Média		2081.89
Azul Guimarães	1	3117.14
	2	2290.63
	3	2230.18
	4	2558.02
	5	2701.60
	6	2319.90
Média		2536.25
Gonça	1	1624.24
	2	2768.53
	3	2129.37
	4	2522.01
	5	2716.45
	6	2230.18
Média		2331.80
Gondomar	1	3543.04
	2	3595.29
	3	4064.33
	4	3519.46
	5	4467.01
	6	-
Média		3837.82

Tabela 3.9: Medição indireta: Valores médios da VPU em blocos retificados (transdutores de 54 kHz)

Bloco	Face	$VPU_{54}(m/s)$
Amarelo Guimarães	1	3382.23
	2	4089.57
	3	4028.60
	4	4121.55
	5	4323.28
	6	4265.51
Média		4035.12
Azul Guimarães	1	3498.53
	2	3172.08
	3	3400.51
	4	2812.53
	5	3353.46
	6	3594.91
Média		3305.34
Gonça	1	2422.08
	2	2975.69
	3	2190.91
	4	2748.90
	5	3138.60
	6	3001.77
Média		2746.32
Gondomar	1	4957.14
	2	4714.10
	3	4727.73
	4	4548.57
	5	4511.75
	6	4353.72
Média		4635.50

No estudo do efeito da anisotropia o método indireto apresenta leituras menos esclarecedoras em granitos de face alterada. Como se observa na Figura 3.26, em todos os granitos são detetadas faces perpendiculares ao plano de desmonte com valores mais elevados que os detetados em faces paralelas ao plano de desmonte.

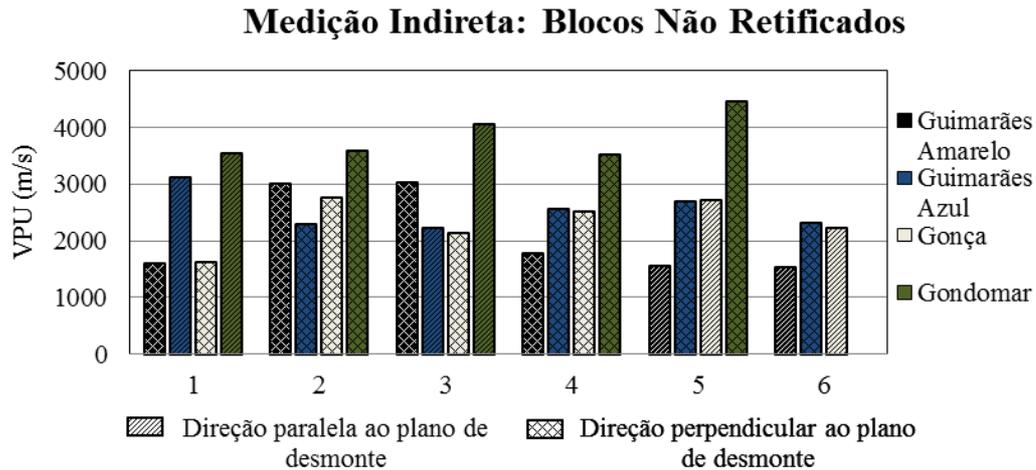


Figura 3.26: Medição indireta da *VPU* em blocos não retificados com a indicação da direção do respetivo plano de desmorte

Em sentido oposto, o efeito da anisotropia foi claramente detetado em três dos granitos após a retificação das faces (Figura 3.27). A única exceção é protagonizada pelo granito azul de Guimarões, com as leituras na face 6 a conduzirem ao valor mais elevado da *VPU* alcançado para este bloco. A face 6 constituiu uma exceção ainda mais representativa uma vez que as faces 1 e 3, paralelas ao plano de desmorte, ostentam valores ligeiramente inferiores a esta mas consideravelmente superiores às faces 2 e 4.

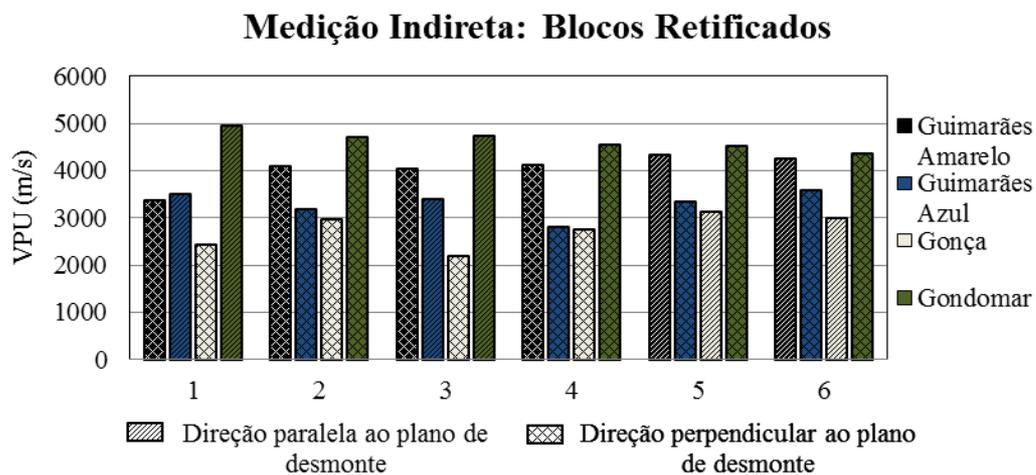


Figura 3.27: Medição indireta da *VPU* em blocos retificados com a indicação da direção do plano de desmorte

Da análise comparativa dos resultados obtidos pelo método direto e indireto é confirmada a ideia inicial que o primeiro método permite uma melhor deteção do sinal ultrassónico, pois todos os valores relativos ao método direto são superiores aos registados pelo método indireto. Este valores vão de encontro às análises de Luzio (2010), cujo estudo se debruçou apenas em granitos, e a Kahraman (2001) que aplicou o método de medição da *VPU* a

vários tipos de rochas, entre elas o granito.

A Figura 3.28 apresenta a relação dos valores obtidos pelos dois métodos em blocos com face não retificada em termos de valores médios calculados com base nos resultados obtidos para as faces e direções de medição. A correlação obtida de $R^2 = 0.90$ indica uma elevada correlação entre os dois métodos. Por razões previamente explicadas não foi incluída nesta análise o bloco amarelo de Guimarães e o valor de médio de VPU na configuração indireta para o bloco de Gondomar foi calculado por meio da média de apenas cinco faces.

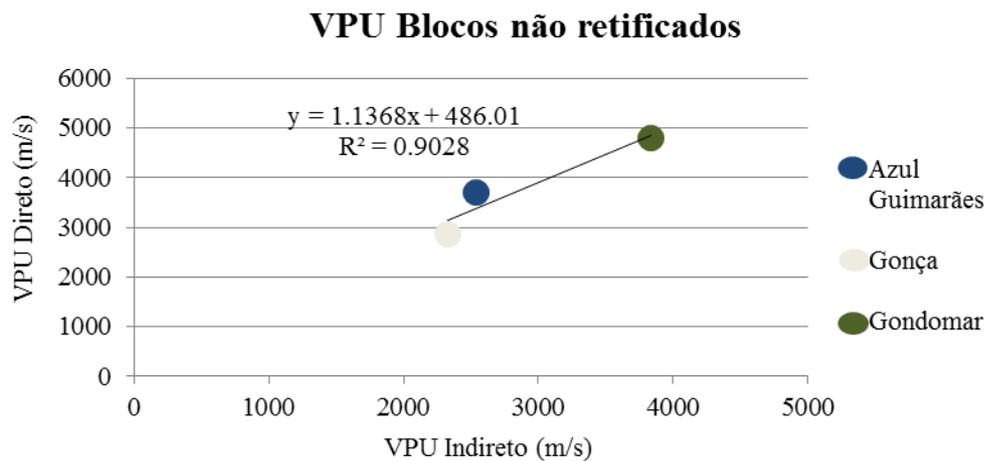


Figura 3.28: VPU direta *vs.* VPU indireta obtidas em blocos de granito não retificados

A equação que permite definir a relação entre os valores de VPU diretos e indiretos medidos em faces rugosas é a seguinte:

$$V_{NR(D)} = 1.14V_{NR(I)} + 486.01 \quad (3.2)$$

onde $V_{NR(D)}$ é a velocidade da propagação direta da onda em blocos não retificados (m/s) e $V_{NR(I)}$ é velocidade de propagação indireta da onda em blocos não retificados (m/s).

Numa análise análoga à anterior mas agora com os valores em blocos retificados (Figura 3.29) foi obtida a correlação entre as variáveis de $R^2 = 0.88$. Da análise regressiva resultou a seguinte equação:

$$V_{R(D)} = 1.10V_{R(I)} + 185.40 \quad (3.3)$$

onde $V_{R(D)}$ é a velocidade de propagação direta da onda em blocos retificados (m/s) e $V_{R(I)}$ é a velocidade de propagação indireta da onda em blocos retificados (m/s).

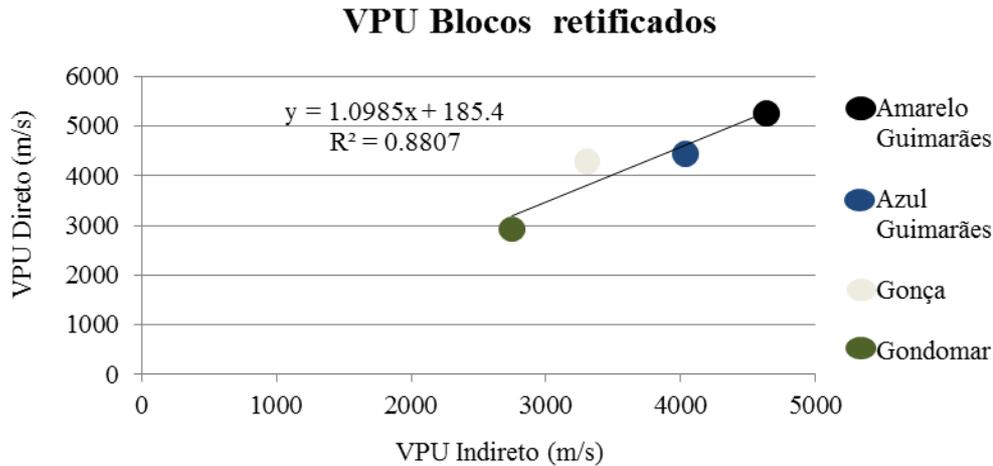


Figura 3.29: *VPU* direta *vs.* *VPU* indireta obtidos em blocos de granito retificados

Os valores elevados de correlação entre variáveis em ambas as fases estudadas neste trabalho são ligeiramente inferiores aos valores de correlação de Luzio (2010), que apresentou correlações de $R^2 = 0.99$ e $R^2 = 1$ em fase não retificada e retificada, respetivamente. A explicação da diferença entre os dois estudos pode ser encontrada no facto de os blocos estudados por Luzio (2010) apresentarem na fase inicial níveis de desgaste consideravelmente inferiores e no caso do valor de correlação para blocos retificados terem sido analisados apenas dois blocos.

Já no caso da correlação obtida por Kahraman (2001) de $R^2 = 0.65$ deve ser tido em consideração o facto de nesse estudo terem sido estudados vários tipos de rochas sob a forma de provetes. Apesar de níveis de correlação relativamente inferiores o autor concluiu serem bastantes satisfatórios para o uso desta técnica em rochas no âmbito da engenharia.

Resultados dureza superficial: Blocos

A análise dos valores de ressalto esclerométrico obtidos nesta campanha vai para além das recomendadas pelas normas. Se na casa de Guimarães a justificação dessa análise exaustiva passou pelo número reduzido de superfícies sujeitas a ensaios, procurando extrair o máximo de informação de poucos ensaios, agora a razão desta análise aponta para uma observação o mais rigorosa possível das potencialidades do ensaio do MS.

A progressão da dureza superficial ao longo dos impactos em três faces de cada um dos blocos encontra-se ilustrada nas Figuras 3.30 a 3.33, relativa às duas condições superficiais estudadas. Os resultados obtidos e correspondentes CV em cada bloco de granito com faces não retificada são expostos nas Tabelas 3.10 e 3.11, enquanto nas Tabelas 3.12 e 3.13 são apresentados os resultados obtidos após a retificação das faces dos granitos. Estas podem ser consultadas no final da presente secção.

Os resultados obtidos em todos os blocos de granitos no seu estado natural em termos de valores médios de ressalto após o primeiro impacto, ao longo dos trinta pontos da malha considerada, variam entre 53.01 (CV=14.44%) e 63.92 (CV=1.32%), com os granitos amarelo e azul de Guimarães a protagonizarem os valores mínimos e máximos, respetivamente. A leitura dos valores médios após dez impactos sucessivos contraria esta tendência de serem os granitos de Guimarães a devolverem os valores extremos do conjunto de blocos ensaiados, com o granito de Gonça a apresentar valores ligeiramente inferiores ao amarelo de Guimarães, com o primeiro, segundo este critério, a devolver leituras de 61.46 (CV=1.39%) e o segundo com 61.89 (CV=5.07%) de valor de ressalto. Continuando a análise comparativa destes blocos é perfeitamente visível que a diferença de resultados entre a média do primeiro impacto e a média dos dez impactos sucessivos se deve ao estado bastante degradado da superfície do bloco de Guimarães, uma vez que observando os valores médios ao fim de cinco impactos sucessivos o granito de Gonça apresenta valores superiores em mais de 2 unidades. Aliás, o bloco de Gonça nesta fase até se apresenta como sendo, a par do bloco azul de Guimarães, aquele com menor diferença entre o primeiro e o segundo impacto. No bloco de Gonça, observando com mais atenção os valores médios da diferença dos dois primeiros impactos, é a manifesta a influência da face 2 na média final, pois as restantes faces apresentam valores inclusive inferiores aos observados no granito azul de Guimarães.

Do conjunto de blocos não retificados o granito amarelo de Guimarães é por si só um caso à parte com valores que representam fielmente o seu estado inicial. Duas das faces submetidas a impactos sucessivos apresentam valores de diferença entre o primeiro e o segundo impacto de 10.40 e 8.67 unidades, quando em todas as outras faces de granitos de diferentes locais o valor mais elevado é de 4.80 unidades de diferença. Na sua face mais degradada, que influencia grande parte dos valores de ressalto obtidos pelos critérios assumidos neste trabalho, na média do primeiro impacto com 41.16 (CV= 9.11%), e mesmo na média dos cinco primeiros impactos sucessivos com 53.25 (CV=10.41%) são inferiores aos de vários tipos de rochas metamórficas relatados por Kahraman *et al.* (2002).

O caso singular que a face 1 do granito amarelo de Guimarães representa é ilustrado na Figura 3.30. A partir desta é possível observar a variação do ressalto de Schmidt ao longo de dez impactos. Entre o primeiro e quinto impacto é registada uma variação de 29.30%, de 9.88% entre o quinto e o décimo e existindo uma variação 35.39% entre o primeiro e último impacto. Estes valores representam fielmente o que foi observado ao longo da aplicação deste ensaio neste bloco, com elevadas quantidades de destacamento de partículas de rocha a serem notadas.

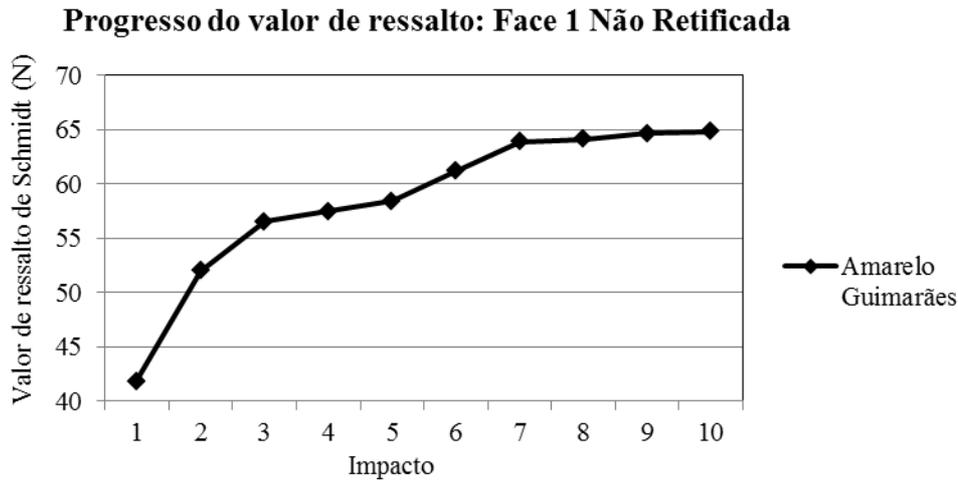


Figura 3.30: Progresso do valor de ressalto na face 1 não retificada: Granito amarelo Guimarães

Na Figura 3.31 são apresentados os progressos dos valores de ressalto em todos os blocos, calculados como a média dos dez impactos em três das faces dos quatro granitos no seu estado natural.

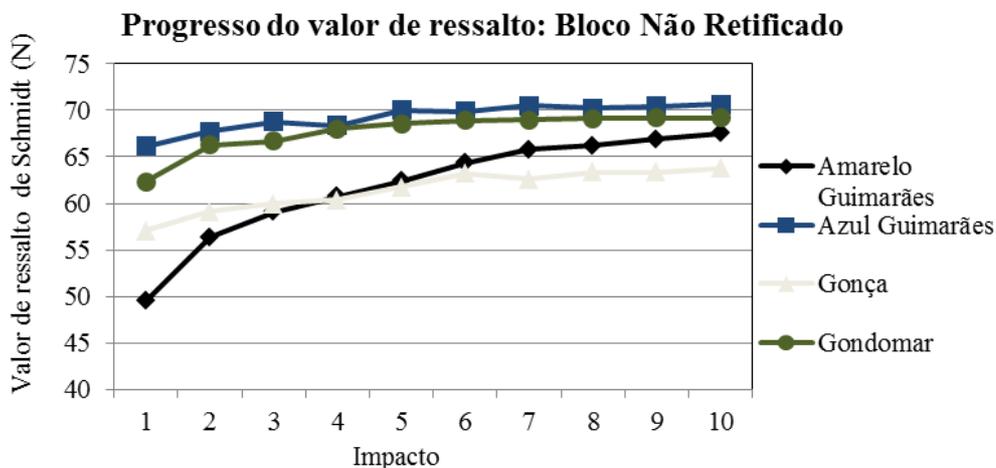


Figura 3.31: Progresso do valor de ressalto ao longo de dez impactos nos quatro blocos de granitos não retificados

Apesar de serem observadas variações menos acentuadas que as presentes no granito amarelo de Guimarães, em todos são registadas variações ao longo da aplicação de impactos sucessivos até o quinto impacto, verificando-se praticamente a estabilização após este ponto.

Após a retificação são registados aumentos consideráveis dos valores de ressalto de Schmidt. Como resultado das recomendações da norma ASTM D5873 (1995) é encontrado um intervalo extremado por um mínimo de 68.19 (CV=0.49%) no granito de Gonça e um

máximo de 74.32 ($CV=0.83\%$) obtido no bloco azul de Guimarães. Esta gama de valores é aproximada daquela que foi obtida por Vasconcelos (2005) em laboratório de acordo com a mesma norma e nas mesmas condições superficiais (faces lisas e após serragem dos blocos).

Com a retificação também é registada uma diminuição acentuada da diferença entre o primeiro e o segundo impacto, com o valor médio máximo de 2.16 a ser registado no granito de Gondomar. Este valor ganha ainda maior relevância quando comparado com o mínimo de 2.62 obtido em face não retificada.

Na análise à progressão dos valores ao longo de dez impactos sucessivos (Figura 3.32) é perceptível, nesta fase, uma variação baixa entre eles. A partir do segundo impacto os valores tendem a convergir para o valor do último impacto. Entre o primeiro e o último impacto a variação máxima em termos médios foi registada no bloco de Gondomar com 5.49%, e, em sentido completamente oposto ao sucedido em blocos com superfície natural, a mínima de 2.81% no bloco amarelo de Guimarães.

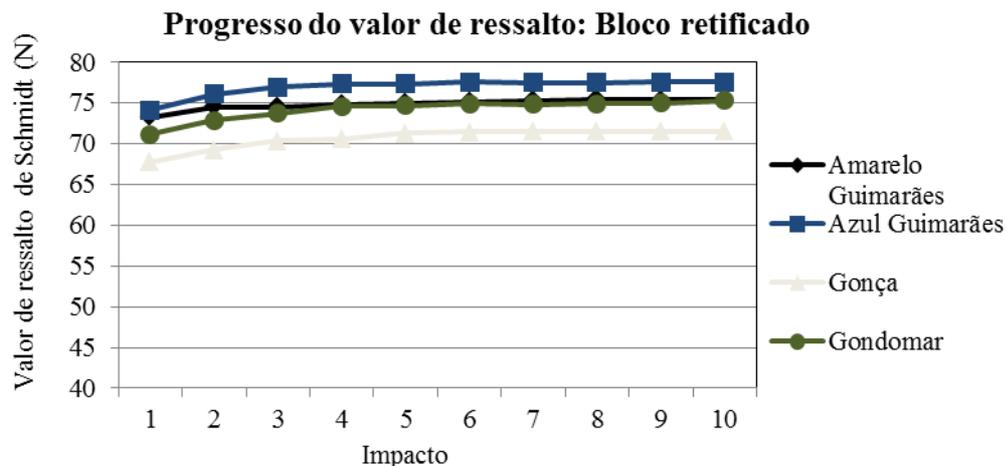


Figura 3.32: Progresso do valor de ressalto ao longo de dez impactos nos quatro blocos de granitos retificados

Como seria de esperar através do cálculo do ressalto seguindo as recomendações ISRM (1981) foram, novamente, alcançados valores mais elevados em comparação com a norma ASTM D5873 (1995). A explicação para este facto foi anteriormente abordada na secção 3.2.

Fazendo uma análise comparativa dos valores obtidos de acordo com as recomendações ISRM (1981) nas duas fases em estudo é observado um aumento substancial da primeira para a segunda. Em valores percentuais no granito amarelo de Guimarães o aumento foi de 28.51%, enquanto nos granitos azul de Guimarães, Gonça e Gondomar foram registados

aumentos de 8.92%, 15.71% e 13.89%, respetivamente. Como resultado deste aumento o granito amarelo de Guimarães deixou de ser aquele em que foram medidos valores mais baixos de ressalto, passando a ser o segundo granito no que diz respeito aos valores mais altos de ressalto.

Para melhor interpretação do efeito causado pela retificação dos blocos são ilustradas na Figura 3.33 as progressões do valor do ressalto de Schmidt observadas ao longo de impactos sucessivos em ambas fases.

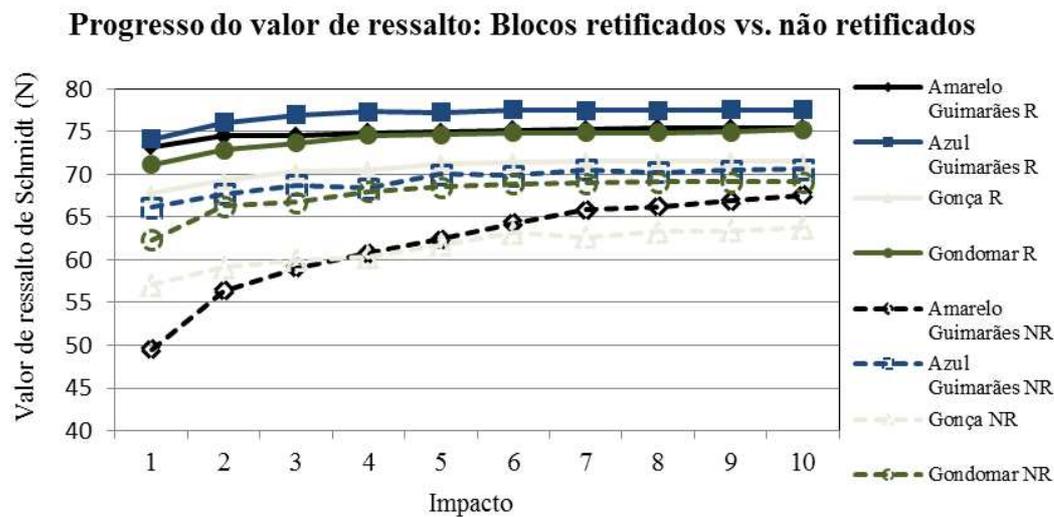


Figura 3.33: Progressão do valor de ressalto de Schmidt: Bloco retificados *vs.* não retificado

Apesar de a anisotropia ser um dos fatores que influencia o valor de ressalto do martelo de Schmidt (Lednická e Kaláb, 2012) com base nos resultados de ambas as fases não é possível concluir que este é um método eficiente na sua deteção, uma vez que entre as direções perpendiculares e paralela não foram encontradas diferenças de valor significativas que pudessem ser propensas a esse fator. Este método é muito mais sensível ao estado de alteração superficial e às condições superficiais de rugosidade. Note-se que os valores mais baixos do ressalto obtidos para o granito amarelo de Guimarães justificam-se pelo facto de este granito apresentar um estado de alteração maior quando comparado com os restantes granitos.

Tabela 3.10: Valores médios de ressalto de Schmidt obtidos em blocos não retificados

Granito	Face	1º impacto		Impactos sucessivos		Exceto o 1º impacto		5 primeiros impactos		(1º - 2º) impacto
		N	CV (%)	N	CV (%)	N	CV (%)	N	CV (%)	N
Amarelo Guimarães	1	41.16	9.11	58.49	6.90	60.34	7.34	53.25	10.41	10.40
	2	47.23	11.21	62.50	5.19	64.21	5.23	57.39	7.07	8.67
	3	62.29	6.23							
	4	55.68	6.78							
	5	58.06	5.12	64.68	4.18	65.24	4.25	62.24	4.58	2.67
	6	53.61	6.87							
Média		53.01	14.44	61.89	5.07	63.27	4.09	57.63	7.81	7.24
Azul Guimarães	1	64.65	4.19	69.92	3.20	70.22	3.22	68.88	3.03	2.13
	2	63.87	4.65	69.05	4.22	69.41	4.44	68.05	4.38	3.33
	3	62.52	4.98							
	4	64.84	7.84							
	5	63.52	5.82	68.83	3.43	69.22	3.27	67.63	3.94	2.40
	6	64.16	4.49							
Média		63.92	1.32	69.27	0.83	69.62	0.76	68.19	0.93	2.62
Gonça	1	55.68	7.85	62.09	3.97	62.47	4.12	60.35	3.71	1.2
	2	54.84	7.50	61.80	4.03	62.49	4.22	59.76	3.93	4.80
	3	56.87	7.56							
	4	54.77	8.31							
	5	55.16	5.28	60.49	3.64	60.89	3.57	58.88	4.31	1.87
	6	56.00	9.91							
Média		55.55	1.45	61.46	1.39	61.95	1.48	59.66	1.24	2.62
Gondomar	1	61.81	2.81	68.32	2.01	68.86	2.14	66.88	2.02	3.33
	2	59.61	3.23	67.61	2.94	68.30	3.19	66.24	2.35	4.80
	3	60.39	4.55							
	4	61.03	2.82							
	5	60.03	3.40	67.25	3.22	67.82	3.35	66.05	3.28	3.73
	6	61.03	3.07							
Média		60.65	1.31	67.73	0.80	68.33	0.76	66.39	0.65	3.96

Tabela 3.11: Valores médios de ressalto de Schmidt obtidos segundo as normas ISRM e ASTM em blocos não retificados

Granito	Face	Média ISRM		Média ASTM	
		N	CV (%)	N	CV (%)
Amarelo Guimarães	1	45.87	5.16	42.53	8.81
	2	52.93	5.14	48.80	10.85
	3	67.33	4.33	64.37	6.03
	4	60.80	2.61	57.53	6.56
	5	62.4	1.60	60.00	4.95
	6	57.73	2.89	55.40	6.65
Média		57.84	13.10	54.77	14.44
Azul Guimarães	1	68.88	2.11	66.80	4.06
	2	68.25	3.19	66.00	4.50
	3	66.75	2.15	64.60	4.82
	4	70.50	4.80	67.00	7.59
	5	68.38	3.06	65.63	5.64
	6	68.44	3.20	66.30	4.34
Média		68.53	1.76	66.06	1.32
Gonça	1	60.75	3.09	57.53	7.59
	2	59.63	4.62	56.67	7.26
	3	61.75	2.33	58.77	7.31
	4	60.00	3.44	56.60	8.04
	5	59.25	2.43	57.00	5.11
	6	61.81	4.58	58.17	5.61
Média		60.53	1.80	57.46	1.52
Gondomar	1	65.07	1.59	63.87	1.74
	2	63.07	1.64	61.60	1.92
	3	64.67	2.78	62.40	2.75
	4	64.53	1.42	63.07	1.72
	5	63.67	2.03	62.03	2.04
	6	64.67	1.51	63.07	1.87
Média		64.28	1.17	62.67	1.31

Tabela 3.12: Valores médios de ressalto de Schmidt obtidos em blocos retificados

Granito	Face	1º impacto		Impactos sucessivos		Exceto o 1º impato		5 primeiros impactos		(2º-1º) impacto
		N	CV (%)	N	CV (%)	N	CV (%)	N	CV (%)	N
Amarelo Guimarães	1	71.03	2.24	73.88	1.92	73.91	2.08	73.57	1.85	0.40
	2	70.32	1.72	75.27	1.44	75.54	1.52	74.83	1.67	2.13
	3	69.94	1.80							
	4	70.39	1.75							
	5	72.84	3.92	75.36	3.28	75.54	3.18	74.80	4.10	1.47
	6	70.06	3.04							
Média		70.76	1.53	74.83	1.11	75.00	1.26	74.40	0.97	1.33
Azul Guimarães	1	72.13	2.52	77.27	2.88	77.57	3.05	76.67	2.73	2.13
	2	70.90	3.10	76.60	2.87	76.96	2.97	75.89	2.93	2.00
	3	71.94	3.02							
	4	71.74	2.63							
	5	72.13	2.41	76.96	2.45	77.23	2.57	76.48	2.36	1.60
	6	72.71	2.95							
Média		71.92	0.83	76.94	0.43	77.25	0.39	76.35	0.53	1.91
Gonça	1	65.48	3.50	71.19	2.17	71.56	2.28	70.27	2.48	1.33
	2	66.00	3.31	70.92	3.47	71.26	3.66	70.13	3.47	2.13
	3	66.39	3.72							
	4	66.26	3.94							
	5	65.81	3.48	69.93	3.18	70.19	3.23	69.15	3.19	1.47
	6	66.00	3.76							
Média		65.99	0.49	70.68	0.93	71.00	1.01	69.85	0.88	1.64
Gondomar	1	69.29	2.77	73.99	3.06	74.33	3.33	73.23	2.89	2.40
	2	68.58	1.83	74.13	2.73	74.50	2.93	73.28	2.58	2.27
	3	68.90	2.71							
	4	71.29	3.13							
	5	69.16	2.39	74.39	2.60	74.70	2.78	73.61	2.48	1.80
	6	69.74	2.66							
Média		69.49	1.38	74.17	0.28	74.51	0.25	73.37	0.29	2.16

Tabela 3.13: Valores médios de ressalto de Schmidt obtidos segundo as normas ISRM e ASTM em blocos retificados

Granito	Face	Média ISRM		Média ASTM	
		N	CV (%)	N	CV (%)
Amarelo Guimarães	1	74.53	1.23	73.40	2.16
	2	73.60	1.13	72.67	1.67
	3	73.07	1.41	72.27	1.74
	4	73.73	0.95	72.73	1.69
	5	77.33	1.26	75.27	3.79
	6	73.73	2.88	72.40	2.94
Média		74.33	2.08	73.12	1.53
Azul Guimarães	1	74.67	2.19	74.53	1.81
	2	73.20	3.06	73.27	2.20
	3	74.40	2.73	74.33	2.17
	4	74.27	2.47	74.13	1.89
	5	74.53	2.37	74.53	1.74
	6	76.80	1.32	75.13	2.15
Média		74.64	1.58	74.32	0.83
Gonça	1	69.47	2.30	67.67	2.29
	2	69.87	2.29	68.20	2.19
	3	70.67	1.38	68.60	2.47
	4	70.53	2.00	68.47	2.61
	5	69.60	2.48	68.00	2.29
	6	70.13	2.01	68.20	2.48
Média		70.04	0.7	68.19	0.49
Gondomar	1	72.93	2.04	71.60	1.92
	2	72.00	0.00	70.87	1.25
	3	72.53	1.26	71.20	1.86
	4	75.60	1.79	73.67	2.23
	5	72.67	1.7	71.47	1.66
	6	73.33	1.97	72.07	1.86
Média		73.18	1.73	71.81	1.38

3.4 Conclusões

Da aplicação de duas técnicas de avaliação não destrutiva num caso real é possível concluir que as condições superficiais dos granitos influenciam bastante as leituras de ambos os métodos não destrutivos, uma vez que mesmo na presença do mesmo género de granito são registados valores distintos entre as faces dos granitos.

Na medição da *VPU* foram registados, em termos médios, valores superiores em 25.94% das faces exteriores em relação às interiores. Nas últimas, apesar de menos rugosas, era visível um maior desgaste e menor cuidado estético relativamente às primeiras.

Os valores do ensaio de dureza superficial demonstram que em granitos de superfície rugosa e irregular existe uma grande diferença entre o primeiro e o segundo impacto no mesmo ponto, havendo destacamentos consideráveis de partículas ao longo dos primeiros impactos.

O método de cálculo da dureza superficial também foi analisado neste capítulo, mostrando que, no presente caso, a norma ASTM D5873 (1995) conduz a valores ligeiramente inferiores àqueles que são obtidos quando calculados de acordo com os métodos sugeridos pela ISRM (1981).

No caso dos ensaios em blocos foi, mais uma vez, possível observar a influência das condições superficiais em ambos os ensaios.

Relativamente ao estudo dos blocos é possível concluir que:

1. No caso dos ultrassons, foram encontradas dificuldades na deteção do sinal pelo método direto no bloco amarelo de Guimarães, devido, em parte, às condições degradadas da sua superfície. Com a retificação das faces foram registados aumentos de *VPU* em todos os blocos em ambas as configurações de transdutores utilizadas;
2. Relativamente à capacidade do ensaio de ultrassons em detetar a anisotropia dos granitos, foram obtidas leituras que demonstram claramente o bom desempenho desta técnica, sobretudo em faces retificadas. Os resultados demonstram que as medições indiretas não são tão sensíveis à anisotropia;
3. Foi possível estabelecer uma correlação entre as medições com os ultrassons nas configurações direta e indireta;
4. A aplicação do ensaio de dureza superficial na deteção da anisotropia revelou-se ineficaz, quer em face não retificada quer em face retificada;

5. De modo semelhante ao caso de estudo in-situ, neste ensaio foram registados valores bastantes distintos entre os primeiros impactos em blocos de face não retificada, com a particularidade de o valor mínimo da diferença entre valores de ressalto entre impactos em face não retificada ser de 2.62 unidades, enquanto que em face retificada o máximo é de 2.16 unidades. O bloco amarelo de Guimarães é aquele em que se registaram valores mais elevados de variação entre as duas fases, com uma percentagem de 28.51% e de 33.50% com base nos valores calculados de acordo com as normas ISRM (1981) e ASTM D5873 (1995), respetivamente;
6. À luz dos resultados obtidos no granito amarelo de Guimarães, o estado de alteração dos granitos, pelo menos superficial, poderá de forma simplificada ser analisada pela variação entre o primeiro e os restantes impactos;
7. A análise de resultados com base em diferentes normas (ASTM e ISRM) conduz a valores distintos, sendo sempre superiores no caso de ser utilizada a norma ISRM.
8. A *VPU* na medição direta entre a fase não retificada e retificada registou uma variação positiva de 16.18%, 2.38% e 9.42% para os granitos azul de Guimarães, Gonça e Gondomar, respetivamente. No granito amarelo de Guimarães não foram feitas medições diretas da *VPU* para a fase não retificada;
9. Na obtenção da *VPU* na medição indireta entre a fase não retificada e retificada registou-se também uma variação positiva de 93.80%, 30.32%, 20.78% e 17.78% para os granitos amarelo de Guimarães, azul de Guimarães, Gonça e Gondomar, respetivamente.

Acerca das recomendações para o uso destes dois instrumentos destacam-se as seguintes:

1. Os ensaios de dureza superficial podem provocar danos ligeiros nas superfícies em estudo, sobretudo nas mais degradadas, logo na ordem de execução destes dois ensaios, o ensaio de MS deve ser executado em último lugar;
2. Para garantir um maior rigor na obtenção dos resultados, ambos os instrumentos devem ser constantemente calibrados, ou pelo menos proceder à verificação acerca do seu estado de calibração;
3. De forma a garantir uma perfeita acoplação entre os transdutores e as superfícies em estudo, deve ser utilizada plasticina convencional, com a quantidade desta que é aplicada ser função do estado da superfície de granito em análise. Para eliminar interferências no sinal emitido e recebido pelos transdutores por meio de partículas de granito que se vão acumulando na plasticina, esta deve ser constantemente substituída;

4. Quando os transdutores, na configuração direta, se encontram de tal forma distanciados que obriguem o auxílio de outra pessoa para efetuar as medições, deve ser utilizado um sistema auxiliar de marcação para garantir que os pontos entre duas faces distintas estejam perfeitamente alinhados.

Capítulo 4

ENSAIOS LABORATORIAIS

4.1 Introdução

No presente capítulo serão analisadas três campanhas experimentais em laboratório, nomeadamente a medição da velocidade de propagação de ultrassons (*VPU*), o ensaio de porosidade e o de resistência à compressão uniaxial, apontando para a determinação dos parâmetros físicos, mecânicos e índices não destrutivos (IND) dos granitos analisados no Capítulo 3 sob a forma de blocos. Esta caracterização destina-se a alimentar a base de dados das propriedades físicas e mecânicas de modo a validar e aplicar os modelos de previsão a desenvolver no Capítulo 5.

Para o efeito, de cada um dos blocos estudados no Capítulo 3 foram extraídos dezoito provetes cilíndricos, seis para cada uma das três direções estabelecidas, com dimensões de 15 *cm* de altura e de 7.5 *cm* de diâmetro respeitando a relação de 2 entre as duas dimensões. A dimensão final dos provetes foi definida de acordo com os métodos sugeridos pela ISRM (1981), que estabelece que a menor dimensão deve ser superior em cinco vezes à dimensão máxima do grão. Note-se que a este respeito, para o granito de Guimarães de grão médio a grosseiro, deveriam ser cilindros de maiores dimensões, mas decidiu-se optar pelas mesmas dimensões dada a pequena influência esperada nos resultados.

A primeira das três campanhas abordadas no presente capítulo é a de medição da *VPU* em provetes cilíndricos. A necessidade desta nova campanha de ensaios de ultrassons está relacionada com o facto de ser necessária a obtenção das propriedades físicas e de *VPU* nos mesmos provetes onde se pretende obter a resistência à compressão (f_c) e módulo de elasticidade (E) de modo a ser possível a previsão das propriedades mecânicas e comparação com os valores estimados (Capítulo 5).

Importa também realçar, que na campanha em laboratório foi utilizado o mesmo aparelho

usado na medição da *VPU* em blocos mas com transdutores com uma frequência de 150 kHz, quando anteriormente eram de 54 kHz. Esta alteração deveu-se à dimensão reduzida dos provetes que obrigam que o comprimento de onda seja menor para que esta possa ser detetada pelo aparelho. No entanto, de acordo com Vasconcelos *et al.* (2008), não são de esperar diferenças significativas pela utilização de transdutores de 150 kHz relativamente aos valores obtidos com transdutores com frequência de 54 kHz.

Relativamente ao ensaio de compressão uniaxial, este assume particular importância neste estudo, uma vez que os granitos usados em construção estão principalmente sujeitos a esforços de compressão.

Neste capítulo será também feita a análise da relação entre as propriedades físicas, mecânicas e IND obtidos ao longo do mesmo.

4.2 Medição da *VPU* em provetes

Após os blocos terem sido desmontados em provetes para os ensaios de compressão uniaxial estes foram colocados em estufa à temperatura de $105^{\circ}C$ durante 24 horas. Após o controlo da massa após secagem foram realizados ensaios de medição da *VPU* com transdutores de 150 kHz, na configuração direta. Os transdutores foram colocados a uma distância entre si de 15 cm e foram realizadas medições num total de dezoito provetes de cada tipo de granito, seis provetes para cada direção.

Os valores de *VPU* direta obtidos nos provetes de laboratório são apresentados na Tabela 4.1. Para uma melhor comparação da influência da anisotropia são também ilustrados em termos médios na Figura 4.1.

Uma vez que alguns dos provetes relativos ao granito de Gonça (direções 2_4 e 5_6) foram obtidos a partir de um bloco distinto daquele que foi ensaiado na secção 3.3 eram esperadas diferenças de *VPU* comparativamente com os resultados apresentados anteriormente. Mesmo tendo sido os provetes do novo bloco selecionados de acordo as direções em falta, foram medidos valores bastante diferentes daqueles que tinham sido obtidos no bloco ensaiado anteriormente. Por exemplo, na direção 5_6 foi medido um valor médio de 4203.81 *m/s* que é superior, inclusive, a alguns dos valores obtidos nos granitos amarelo e azul de Guimarães. Isto pode ser explicado de acordo com o menor grau de alteração do segundo bloco de Gonça que era bastante diferente do bloco inicial, apresentando uma cor ligeiramente azulada. Mesmo tendo sido feitos esforços para garantir blocos com igual grau de alteração, os resultados indicam que os dois blocos são bastante distintos em

termos de estado de alteração. Contudo, e apesar da sua cor azulada, os valores de *VPU* são menores comparativamente com os medidos por Luzio (2010) num bloco de Gonça azul, que obteve em todas as direção valores superiores a 5000 *m/s*.

Relativamente aos restantes blocos, no granito amarelo de Guimarães foi registado um valor de *VPU* inferior na direção 2_4, quando na fase retificada do bloco, na configuração direta, o menor valor foi registado na direção 5_6.

No conjunto dos provetes azuis de Guimarães e de Gondomar e amarelo de Guimarães, foram medidos valores inferiores aos registados na fase retificada do bloco. Uma vez que os provetes estiveram em estufa é possível que esta diferença de valores entre fases esteja relacionada com o maior teor de água presente nos blocos retificados, fazendo com que sejam registados valores mais elevados de *VPU* em superfícies com maior teor de água (Vasconcelos *et al.*, 2008).

Nota ainda para o facto de as leituras devolverem valores mais elevados de *VPU* na direção paralela ao plano de desmonte em três dos blocos, nomeadamente no amarelo de Guimarães e azuis de Guimarães e Gondomar, o que está de acordo com os resultados obtidos na literatura (Vasconcelos *et al.*, 2008). No caso do granito de Gonça não é possível analisar esta diferença, face à diferença em termos de alteração observada no bloco dos quais foram retirados os provetes em falta.

Tabela 4.1: Medição direta da VPU_{150} em provetes secos em m/s

Direção	Provete	Amarelo Guimarães	Azul Guimarães	Gonça	Gondomar
1_3	1	4518.07	3778.34	3151.26	4360.47
	2	4658.39	3797.47	3048.78	4437.87
	3	4261.36	3856.04	2772.64	4491.02
	4	4464.29	3896.10	3018.11	4385.97
	5	4587.16	3836.32	2890.17	4347.83
	6	4518.07	3826.53	2712.48	4464.29
Média		4501.22	3831.80	2932.24	4425.39
2_4	1	3676.47	4087.19	3916.45	4437.87
	2	3957.78	4021.45	3816.79	4310.35
	3	3896.10	3797.47	3797.47	4437.87
	4	3947.37	3968.25	3703.70	4310.35
	5	3846.15	4132.23	3926.70	4360.47
	6	3787.88	3896.10	3916.45	4373.18
Média		3851.96	3983.78	3846.26	4371.68
5_6	1	3989.36	4347.82	4178.27	4573.17
	2	4098.36	4411.76	4310.35	4504.51
	3	4189.94	4545.45	4109.59	4411.77
	4	4010.70	4587.16	4310.35	4716.98
	5	4261.36	4411.76	4065.04	4531.72
	6	4213.48	4373.17	4249.29	4437.87
Média		4127.20	4446.19	4203.81	4529.35

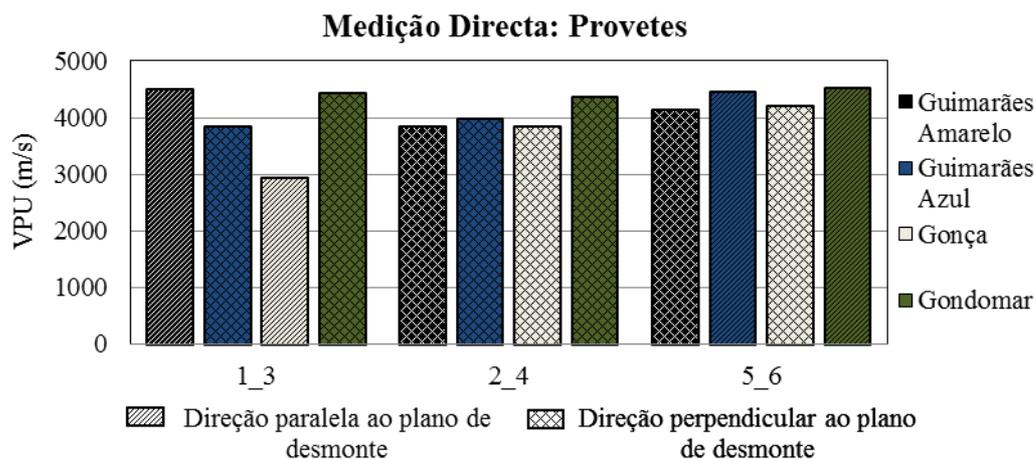


Figura 4.1: Valores médios da VPU direta em provetes secos com a indicação da direção do respetivo plano de desmorte

4.3 Caraterização física

Posteriormente aos ensaios de medição da VPU em provetes foram executados ensaios de porosidade em todos provetes no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

A determinação da porosidade (n) e das densidades dos provetes foi levada a cabo para conhecimento destas propriedades o que conduziria a uma melhor compreensão das propriedades mecânicas dos granitos (Vasconcelos, 2005). Para além disso, uma vez que um dos objetivos do presente trabalho é a construção de modelos de previsão de propriedades mecânicas, o conhecimento das propriedades físicas irá permitir avaliar a capacidade dos modelos de Data Mining (DM) na previsão de f_c , f_t e E usando estas mesmas propriedades, que são obtidas de forma não destrutiva.

A determinação de n foi realizada seguindo os métodos sugeridos pela ISRM (1981). Esta norma recomenda para a aferição da massa saturada (m_{sat}) que as amostras fiquem imersas dentro de um equipamento de vácuo (inferior a $800Pa$) durante um período de tempo de pelo menos uma hora. Para ajudar a remover o ar preso no interior das amostras estas devem ser agitadas periodicamente. Posteriormente as amostras foram retiradas do equipamento de vácuo e submersas num balde de água, que através de um arame de metal se solidarizava com a balança, permitindo assim a determinação da massa saturada-submersa (m_{sub}). Com o conhecimento destes parâmetros foi calculado o volume da amostra (V) através da seguinte equação:

$$V = \frac{m_{sat} - m_{sub}}{\rho_w} \quad (4.1)$$

onde ρ_w é a densidade da água.

Para a determinação do volume de vazios (V_V) foi necessário colocar os provetes em estufa à temperatura de $105^\circ C$ durante 24 horas, de forma a obter a massa seca dos provetes (m_{dry}).

$$V_V = \frac{m_{sat} - m_{dry}}{\rho_w} \quad (4.2)$$

A partir do volume da amostra e de volume de vazios foi obtida a n através da seguinte expressão:

$$n = \frac{V_V}{V} \times 100 \quad (4.3)$$

Posteriormente foram determinadas a densidades seca (ρ_{dry}) e saturada (ρ_{sat}):

$$\rho_{dry} = \frac{m_{dry}}{V} \quad (4.4)$$

$$\rho_{sat} = \frac{m_{dry} + V_V \rho_w}{V} \quad (4.5)$$

Os valores finais de cada um dos parâmetros encontram-se nas Tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5.

Da análise global dos resultados verifica-se que os granitos azuis de Guimarães e Gondomar apresentam valores médios de n inferiores a 1%, nomeadamente de 0.94% (CV=11.26%) e 0.89% (CV=7.67%), respetivamente. Por outro lado, nos granitos amarelos foram obtidos valores ligeiramente superiores, tendo sido obtido no granito amarelo de Guimarães um valor médio de 1.15% (CV=9.64%) e 1.57% (CV= 26.61%) para o granito de Gonça. Neste último é registada uma variação assinalável entre os valores médios de n para os provetes na direção 1_3 (2.09%) relativamente às direções 2_4 (1.31%) e 5_6 (1.30%), o que significa que nestas direções se tem apenas uma porosidade de 64% da que se obteve nos provetes do primeiro bloco de granito de Gonça.

De acordo com Vasconcelos (2005) os valores da densidade são inversamente proporcionais aos valores de n . Desta forma, é com alguma surpresa que no granito de Gondomar tenham sido obtidos valores mais baixos de densidade, quando este apresenta valores mais baixos de n . Nos restantes granitos é verificada a proporcionalidade inversa entre densidade e n .

Uma vez que existe uma boa correlação entre a VPU e n (Prikryl, 2001), seria expectável que a n medida no granito amarelo de Guimarães fosse ligeiramente superior à do granito azul da mesma cidade. Contudo, a comparação entre estes dois casos é por si só uma exceção, uma vez que a cor amarela deveria indicar um maior grau de alteração que resultaria em valores mais baixos de VPU como foi explicado no Capítulo 3. Isto poderá indicar que é possível que o menor valor da VPU possa estar associada com alguma fissuração interna do bloco azul.

No entanto, uma boa correlação entre n e a VPU é verificada nos restantes casos, com o granito de Gondomar, onde foram registados valores mais altos de VPU , a ser o que apresenta um valor médio de n menor, e o granito de Gonça, onde foram obtidos valores mais baixos de VPU , a ser aquele que apresenta valores de n mais elevados.

Tabela 4.2: Propriedades físicas do granito amarelo de Guimarães. CV entre parêntesis (%)

Direção	Provete	$m_{sat}(g)$	$m_{sub}(g)$	$m_{dry}(g)$	$V(cm^3)$	$Vv(cm^3)$	$n(\%)$	$\rho_{dry}(kg/m^3)$	$\rho_{sat}(kg/m^3)$
1_3	1	1752.3	1093.9	1744.0	658.4	8.3	1.26	2648.85	2661.45
	2	1759.9	1102.0	1751.8	657.9	8.1	1.23	2662.72	2675.03
	3	1768.0	1108.9	1760.6	659.1	7.4	1.12	2671.22	2682.45
	4	1771.3	1109.1	1764.0	662.2	7.3	1.10	2663.85	2674.87
	5	1764.8	1104.8	1757.2	660.0	7.6	1.15	2662.42	2673.94
	6	1757.8	1088.3	1750.2	669.5	7.6	1.13	2614.19	2625.54
2_4	1	1775.2	1109.8	1766.4	665.4	8.8	1.32	2654.64	2667.87
	2	1787.8	1118.1	1780.2	669.7	7.6	1.13	2658.21	2669.55
	3	1768.2	1107.9	1760.7	660.3	7.5	1.14	2666.52	2677.87
	4	1803.2	1128.3	1794.9	674.9	8.3	1.23	2659.51	2671.80
	5	1757.8	1098.4	1750.1	659.4	7.7	1.17	2654.08	2665.76
	6	1771.1	1099.6	1762.6	671.5	8.5	1.27	2624.87	2637.54
5_6	1	1746.4	1094.6	1739.8	651.8	6.6	1.01	2669.22	2679.35
	2	1808.4	1131.8	1801.0	676.6	7.4	1.09	2661.84	2672.78
	3	1768.6	1106.7	1759.6	661.9	9.0	1.36	2658.41	2672.01
	4	1794.1	1122.0	1787.4	672.1	6.7	1.00	2659.43	2669.39
	5	1776.6	1111.8	1770.1	664.8	6.5	0.98	2662.61	2672.38
	6	1755.1	1096.0	1748.4	659.1	6.7	1.02	2652.71	2662.87
Média		1771.5 (0.97)	1107.3 (1.08)	1763.8 (0.98)	664.1 (1.03)	7.6 (9.74)	1.15 (9.64)	2655.85 (0.55)	2667.36 (0.53)

Tabela 4.3: Propriedades físicas do granito azul de Guimarães. CV entre parêntesis (%)

Direção	Provete	$m_{sat}(g)$	$m_{sub}(g)$	$m_{dry}(g)$	$V(cm^3)$	$Vv(cm^3)$	$n(\%)$	$\rho_{dry}(kg/m^3)$	$\rho_{sat}(kg/m^3)$
1_3	1	1772.8	1108.7	1766.4	664.1	6.4	0.96	2659.84	2669.48
	2	1801.8	1130.0	1795.1	671.8	6.7	1.00	2672.08	2682.05
	3	1783.9	1116.4	1776.7	667.5	7.2	1.08	2661.72	2672.51
	4	1831.8	1119.8	1826.3	712.0	5.5	0.77	2565.03	2572.75
	5	1790.0	1120.3	1783.5	669.7	6.5	0.97	2663.13	2672.84
	6	1821.3	1135.2	1814.5	686.1	6.8	0.99	2644.66	2654.57
2_4	1	1814.0	1133.9	1807.0	680.1	7.0	1.03	2656.96	2667.26
	2	1792.5	1129.3	1785.9	663.2	6.6	1.00	2692.85	2702.81
	3	1805.9	1129.3	1799.1	676.6	6.8	1.01	2659.03	2669.08
	4	1789.3	1120.5	1782.0	668.8	7.3	1.09	2664.47	2675.39
	5	1800.0	1128.1	1793.5	671.9	6.5	0.97	2669.30	2678.97
	6	1791.6	1111.5	1784.6	680.1	7.0	1.03	2624.03	2634.32
5_6	1	1749.3	1094.5	1743.9	654.8	5.4	0.82	2663.26	2671.5
	2	1771.9	1109.9	1767.1	662.0	4.8	0.73	2669.34	2676.59
	3	1762.8	1103.7	1756.9	659.1	5.9	0.90	2665.61	2674.56
	4	1791.4	1121.1	1784.8	670.3	6.6	0.98	2662.69	2672.54
	5	1799.4	1128.6	1793.7	670.8	5.7	0.85	2673.97	2682.47
	6	1747.3	1087.4	1742.0	659.9	5.3	0.80	2639.79	2647.83
Média		1789.8 (1.27)	1118.2 (1.20)	1783.5 (1.26)	671.6 (1.90)	6.3 (11.44)	0.94 (11.26)	2656.00 (1.01)	2665.42 (1.02)

Tabela 4.4: Propriedades físicas do granito de Gonça. CV entre parêntesis (%)

Direção	Provete	$m_{sat}(g)$	$m_{sub}(g)$	$m_{dry}(g)$	$V(cm^3)$	$Vv(cm^3)$	$n(\%)$	$\rho_{dry}(kg/m^3)$	$\rho_{sat}(kg/m^3)$
1_3	1	1762.5	1092.7	1750.5	669.8	12.0	1.79	2613.47	2631.38
	2	1776.0	1100.2	1762.8	675.8	13.2	1.95	2608.46	26280
	3	1772.2	1096.0	1756.4	676.2	15.8	2.34	2597.46	2620.82
	4	1769.6	1096.8	1756.6	672.8	13.0	1.93	2610.88	2630.20
	5	1783.9	1103.9	1769.1	680.0	14.8	2.18	2601.62	2623.38
	6	1794.4	1106.1	1778.1	688.3	16.3	2.37	2583.32	2607.00
2_4	1	1735.7	1073.4	1726.3	662.3	9.4	1.42	2606.52	2620.72
	2	1705.7	1054.2	1697.0	651.5	8.7	1.34	2604.76	2618.11
	3	1758.9	1090.3	1750.6	668.6	8.3	1.24	2618.31	2630.72
	4	1771.5	1094.8	1761.1	676.7	10.4	1.54	2602.48	2617.85
	5	1746.8	1085.7	1739.0	661.1	7.8	1.18	2630.46	2642.26
	6	1750.9	1081.5	1742.9	669.4	8.0	1.2	2603.68	2615.63
5_6	1	1734.1	1077.5	1726.6	656.6	7.5	1.14	2629.61	2641.03
	2	1792.0	1077.5	1783.5	714.5	8.5	1.19	2496.15	2508.05
	3	1794.7	1115.5	1786.2	679.2	8.5	1.25	2629.86	2642.37
	4	1751.3	1083.7	1743.2	667.6	8.1	1.21	2611.14	2623.28
	5	1769.7	1093.9	1759.4	675.8	10.3	1.52	2603.43	2618.67
	6	1779.9	1108.5	1770.0	671.4	9.9	1.47	2636.28	2651.03
Média		1763.9 (1.33)	1090.7 (1.35)	1753.3 (1.27)	673.2 (2.02)	10.6 (27.30)	1.57 (26.61)	2604.88 (1.16)	2620.58 (1.15)

Tabela 4.5: Propriedades físicas do granito de Gondomar. CV entre parêntesis (%)

Direção	Provete	$m_{sat}(g)$	$m_{sub}(g)$	$m_{dry}(g)$	$V(cm^3)$	$Vv(cm^3)$	$n(\%)$	$\rho_{dry}(kg/m^3)$	$\rho_{sat}(kg/m^3)$
1_3	1	1784.1	1100.4	1776.9	683.7	7.2	1.05	2598.957	2609.48
	2	1778.3	1098.1	1772.5	680.2	5.8	0.85	2605.85	2614.38
	3	1756.4	1083.0	1749.5	673.4	6.9	1.02	2598.01	2608.26
	4	1789.7	1106.2	1783.6	683.5	6.1	0.89	2609.51	2618.44
	5	1795.6	1108.6	1789.7	687.0	5.9	0.86	2605.10	2613.68
	6	1760.4	1086.3	1754.9	674.1	5.5	0.82	2603.32	2611.48
2_4	1	1743.1	1076.2	1737.4	666.9	5.7	0.85	2605.19	2613.74
	2	1751.2	1080.9	1745.2	670.3	6.0	0.9	2603.61	2612.56
	3	1734.6	1073.9	1728.9	660.7	5.7	0.86	2616.77	2625.40
	4	1742.2	1075.2	1736.3	667.0	5.9	0.88	2603.15	2611.99
	5	1752.3	1081.6	1746.6	670.7	5.7	0.85	2604.15	2612.64
	6	1732.4	1069.0	1726.5	663.4	5.9	0.89	2602.50	2611.40
5_6	1	1748.5	1080.6	1742.4	667.9	6.1	0.91	2608.77	2617.91
	2	1761.2	1087.2	1755.2	674.0	6.0	0.89	2604.15	2613.06
	3	1736.1	1072.2	1729.8	663.9	6.3	0.95	2605.51	2615.00
	4	1750.1	1082.5	1744.3	667.6	5.8	0.87	2612.79	2621.48
	5	1765.1	1090.3	1760.0	674.8	5.1	0.76	2608.18	2615.74
	6	1775.0	1096.8	1768.8	678.2	6.2	0.91	2608.08	2617.22
Média		1758.7 (1.09)	1086.1 (1.08)	1752.7 (1.09)	672.6 (1.12)	6.0 (7.93)	0.89 (7.67)	2605.76 (0.17)	2614.66 (0.16)

4.4 Comportamento à compressão

Como anteriormente se referiu, neste trabalho um dos objetivos é a previsão de f_c de granitos em função de propriedades físicas e índices obtidos por meio de END. Para a avaliação da qualidade da estimativa é necessário obter a f_c dos granitos em estudo.

Recorrendo a um pórtico rígido (Figura 4.2) localizado no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho, foram efetuados ensaios de compressão uniaxial nos provetes cilíndricos que têm vindo a ser analisados ao longo do presente capítulo.



Figura 4.2: Pórtico utilizado no ensaio de compressão uniaxial

Na fase de preparação do ensaio, os provetes cilíndricos foram retificados de forma que a face superior e inferior ficassem completamente paralelas entre si, procurando assim evitar a ocorrência de excentricidades relativas à força vertical que poderiam conduzir à adulteração dos resultados finais do ensaio. Dado que a retificação dos granitos obrigou à molhagem dos provetes cilíndricos, foi decido proceder à secagem de todos os provetes à temperatura de 105°C (ISRM, 1981) durante 24 horas, procurando desta forma garantir que todos os granitos se encontrassem em condições idênticas de humidade contida.

Com a finalidade de uniformizar a carga aplicada pelo pórtico, sobre os provetes ensaiados foi colocada uma chapa metálica maciça. Nesta soldou-se três chapas metálicas com o propósito de permitirem a medição das deformações dos provetes entre a base e o topo do provete através de três sensores de medição de deslocamento linear (LVDTs), distanciados de um ângulo de 120° (Figura 4.3). Os ensaios de compressão foram efetuados com um controlo de deformação vertical com uma velocidade de $2 \mu\text{m/s}$ de modo a ser possível ainda a medição da resposta de pós pico.



Figura 4.3: Esquema de medição das deformações do provete ao longo do ensaio de compressão uniaxial

4.4.1 Modos de rotura

A rotura dos provetes amarelos de Guimarães foi frágil, ainda que na maioria dos casos não se tivesse verificado um colapso total dos provetes. Em grande parte dos provetes foi possível verificar o desenvolvimento de superfícies de rotura duplas de 45° (Figura 4.4).



Figura 4.4: Processo de fratura à compressão do granito amarelo de Guimarães

Por sua vez, no granito amarelo de Gonça as diferenças verificadas entre os provetes originários de blocos diferentes é evidenciada na análise do processo de fratura. Nos provetes relativos à direção 1_3 a rotura é dúctil conduzindo a uma desfragmentação parcial, sendo possível observar a formação de várias superfícies de rotura verticais ao longo do carregamento (Figura 4.5 (a)). Nas restantes direções foi observado em alguns dos provetes uma rotura frágil, que provocou o colapso total do provete (Figura 4.5 (b)). Esta diferença de comportamento deve estar relacionada com a maior resistência dos provetes associados a uma menor n .



(a) Rotura dúctil característica dos provetes na direção 1_3 (b) Rotura frágil característica dos provetes nas direções 2_4 e 5_6

Figura 4.5: Processo de fratura à compressão do granito de Gonça

A rotura observada em todos os provetes azuis de Guimarães foi frágil resultando em alguns casos no colapso total do provete. Esse comportamento foi sobretudo observado nos provetes relativos à direção 1_3 (Figura 4.6). Este resultado pode estar associado ao facto de nestes provetes as tensões de tração se mobilizarem na direção perpendicular ao plano de mais fácil desmonte.

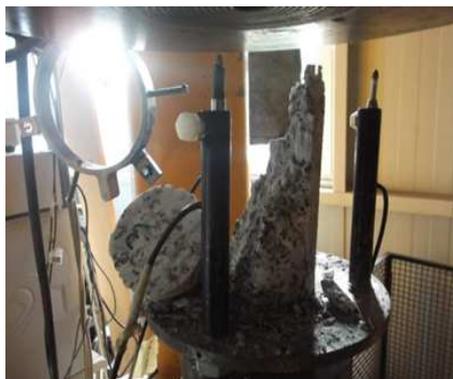


Figura 4.6: Processo de fratura à compressão do granito azul de Guimarães

Nos provetes de Gondomar a rotura foi bastante frágil (Figura 4.7 (a)) levando ao colapso total da amostra, impossibilitando a definição das linhas de rotura. Este resultado está relacionado com o facto de este granito se considerar de alta resistência. Noutros foi também verificada uma rotura frágil, embora menos que a anterior, com uma linha de rotura centrada praticamente a 90° ao longo do eixo vertical (Figura 4.7 (b)). Em alguns dos provetes foi registado colapso parcial, que pode ter sido causado por imprecisões no alinhamento do provete ou pela existência de microfissuras que originam a existência de zonas de menor resistência (Figura 4.7 (c)).

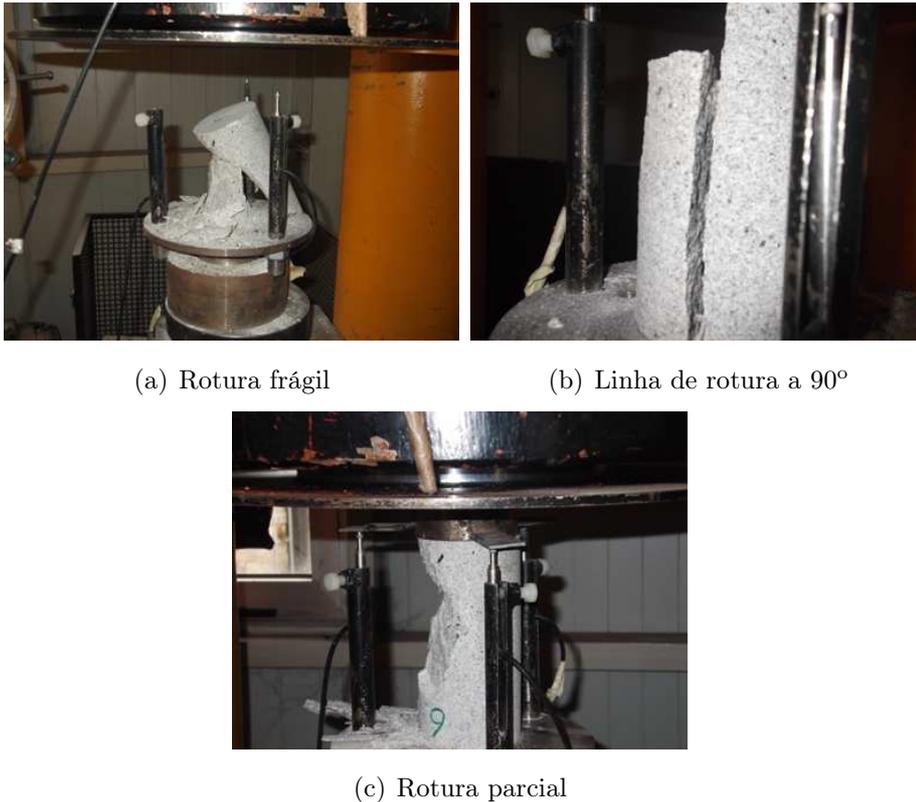


Figura 4.7: Processo de fratura à compressão do granito de Gondomar

Dos resultados obtidos é importante verificar que o modo de rotura está associado ao tipo de granito e que os granitos onde a resistência é superior apresentam uma fendilhação predominantemente vertical (granito de Gondomar), ao passo que nos granitos mais alterados se verificar uma rotura por corte (fendas inclinadas).

4.4.2 Diagramas tensão-extensão

A definição dos digramas tensão-extensão destina-se a analisar o comportamento global dos granitos à compressão uniaxial.

Os valores de f_c , foram obtidos através da seguinte expressão:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (MPa) \quad (4.6)$$

onde F é a força aplicada e A é a área da secção transversal do provete.

Por sua vez, os valores de extensão (ϵ) foram calculados a partir da razão entre a média do deslocamento medido ao longo dos três LVDTs (ΔL) e a altura do provete (L), que corresponde à distância de aplicação dos transdutores de deslocamento (equação 4.7).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (mm) \tag{4.7}$$

Os diagramas tensão-extensão correspondentes aos granitos amarelos de Guimarães e Gonça são apresentados nas Figuras 4.8 e 4.9, respetivamente, enquanto as Figuras 4.10 e 4.11 ilustram os diagramas tensão-extensão relativos aos granitos azuis de Guimarães e Gondomar, respetivamente.

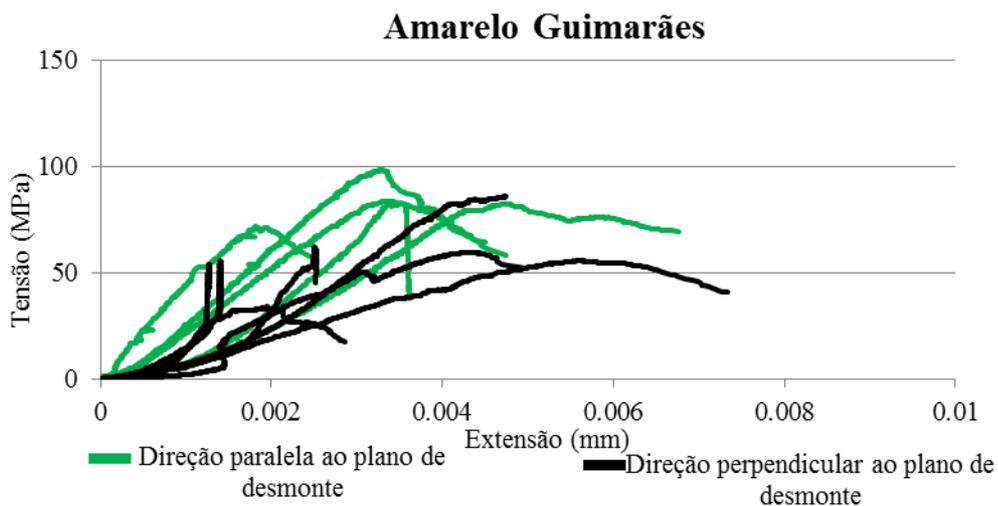


Figura 4.8: Diagrama tensão-extensão: Granito amarelo de Guimarães

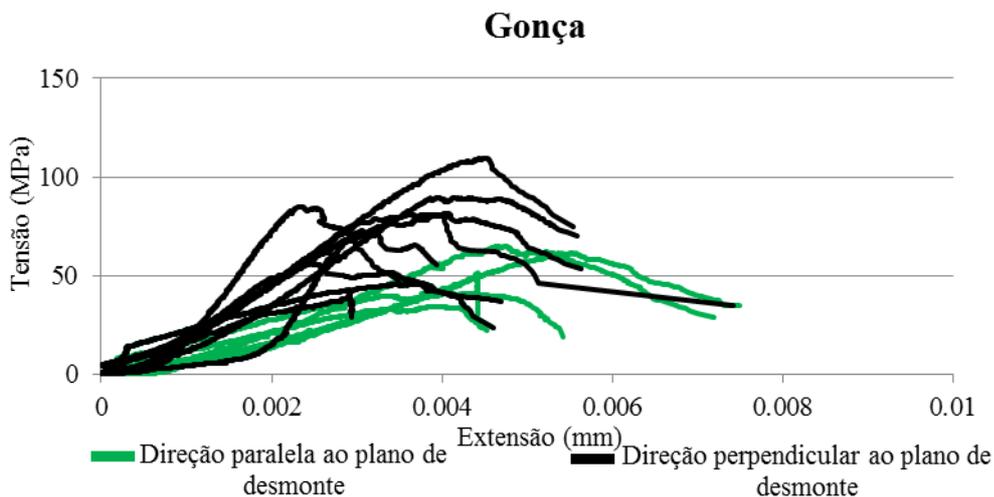


Figura 4.9: Diagrama tensão-extensão: Granito de Gonça

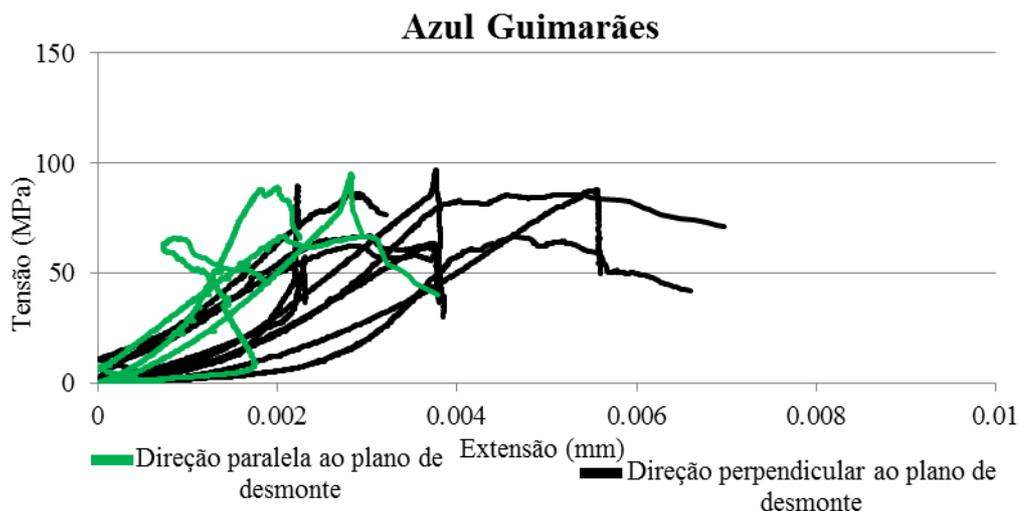


Figura 4.10: Diagrama tensão-extensão: Granito azul de Guimarães

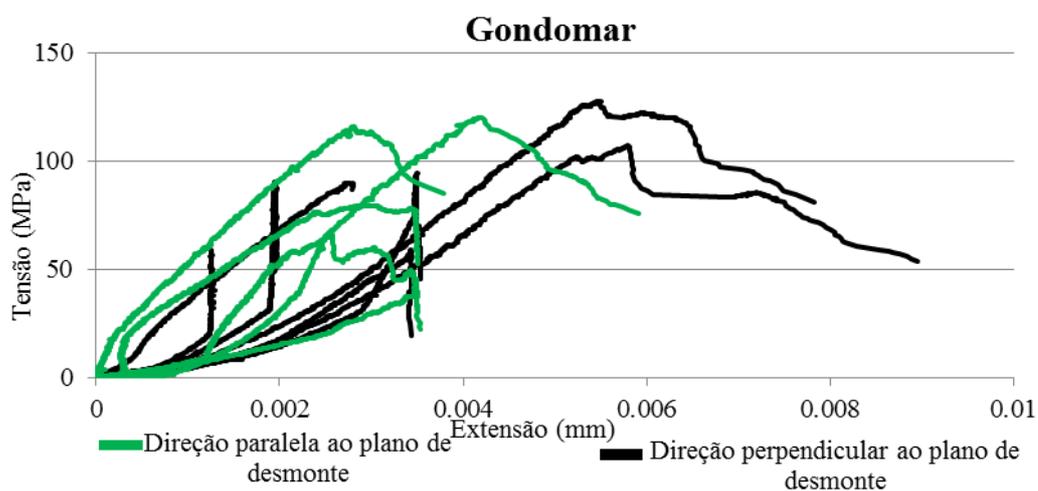


Figura 4.11: Diagrama tensão-extensão: Granito de Gondomar

Numa fase inicial é visível em praticamente todos os digramas um trecho inicial com concavidade voltada para cima. Este comportamento é em parte estrutural e em parte associado ao comportamento do material. Em termos de material justifica-se pela tendência de fecho progressivo das fissuras iniciais presentes nos granitos para cargas baixas. Este efeito é aumentado pelo facto de as deformações dos provetes contabilizarem o ajuste nas interfaces entre as chapas metálicas e os provetes. Este efeito é depois diminuído na fase elástica do material. Após esta fase inicial é observável uma fase de comportamento elástico, após à qual se segue uma região de comportamento não linear do pré-pico até ser atingida a tensão limite de fissuração. O comportamento não linear resulta da progressão da microfendilhação interna que provoca a rotura total do provete.

Importa realçar que foram registadas algumas imprecisões no alinhamento dos provetes, que em certos casos resultaram em colapso parcial de um dos lados da amostra. Nesses

casos após o primeiro pico máximo de tensão ser atingido os granitos continuaram a suportar cargas. Aliado a este facto, foi também verificado ocasionalmente que um dos sensores não fez a medição correta da deformação vertical, o que resulta que alguns diagramas de tensão-extensão se assemelhem aos diagramas tensão-extensão típicos de rochas brandas (Figura 4.12).

Estas dificuldades verificadas nos ensaios traduziram-se na variabilidade obtida em termos de f_c e particularmente em termos de E . Não foi possível obter resultados muito conclusivos acerca da influência da anisotropia no comportamento em compressão.

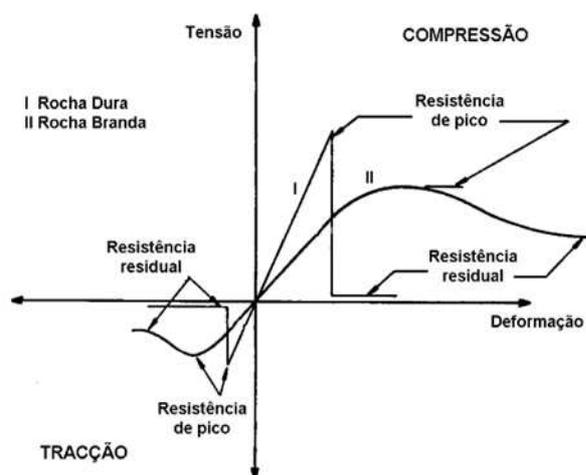


Figura 4.12: Comparação das curvas de tensão-deformação de uma rocha dura e de uma rocha branda (http://paginas.fe.up.pt/geng/ge/ge_apontamentos.htm)

4.4.3 Parâmetros mecânicos

Os valores de f_c e E , calculado segundo a ISRM (1981) como o módulo tangente de 50% de f_c para cada um dos provetes, são apresentados na Tabela 4.6. Note-se que este valor é inferior ao que se obteria se fossem colocados extensómetros para a medição das deformações verticais, dado que os LVDTs medem também a deformação da interface no topo e base dos provetes (Vasconcelos, 2005).

Os valores máximos de f_c na média das três direcções são encontrados nos granitos azuis de Gondomar e de Guimarães com 84.85 MPa (CV=21.66%) e 73.69 MPa (CV=7.18%), respetivamente. Relativamente aos granitos amarelos, o granito de Gonça é aquele que apresenta os valores mais baixos no conjunto dos quatro tipos ensaiados, onde na média das três direcções é obtido um valor de 64.89 MPa (CV=18.47%), ligeiramente inferior ao registado pelo granito de Guimarães com 68.90 MPa (CV=24.95%).

No que concerne aos valores de E , uma leitura semelhante pode ser feita uma vez que

os valores mais elevados são também eles registados nos granitos azuis de Gondomar e Guimarães de 29548.85 MPa (CV=18.96%) e 28688.93 MPa (CV=21.00%), respetivamente, e os mais baixos são relativos aos granitos amarelos com valores de 25293.98 MPa (CV=36.53%) no granito de Guimarães e 24488.40 MPa (CV=43.99%) no granito de Gonça.

Contudo, como para os valores obtidos para ambos os parâmetros mecânicos relativos ao mesmo tipo de granito, inclusive em cada uma das três direções, são registados percentagens elevadas de CV a análise dos resultados, tal como foi feita análise do processo de fratura em compressão, deve ser feita caso a caso.

No granito amarelo de Guimarães os valores mais elevados de f_c são relativos aos provetes na direção 1_3, que neste caso é a direção paralela ao plano de desmorte. Uma vez que no ensaio de compressão uniaxial as tensões de tração se desenvolvem na direção perpendicular à direção de carga (Vasconcelos *et al.*, 2012), é com alguma surpresa que se regista essa superioridade na direção 1_3. Estes resultados podem ser justificados pelos valores elevados de CV obtidos nas direções 2_4 e 5_6 de 18.12% e 24.11%, respetivamente. Assim, deve ser admitida a hipótese de terem sido cometidas imprecisões de alinhamento dos provetes. A essa hipótese deve ser dada ainda mais relevância quando se observa a variabilidade apresentada nos diagramas de tensão-extensão (Figura 4.8), que consequentemente se reflete nas percentagens elevadas de CV apresentadas pelos valores de E .

Um comportamento algo similar ao granito amarelo de Guimarães é verificado no granito de Gonça com a direção 1_3, também ela relativa à direção paralela ao plano de desmorte, a apresentar valores médios de f_c de 51.22 MPa (CV=23.41%) inferiores comparativamente com as restantes direções que apresentam valores de 69.87 MPa de 73.59 MPa na direção 2_4 e 5_6, respetivamente. Embora, tenham sido registados valores igualmente elevados de CV, deve ser tido em consideração que este granito representa um caso especial no conjunto dos quatro granitos, uma vez os provetes das direções 2_4 e 5_6, como foi mencionado anteriormente, foram obtidos de um bloco de Gonça diferente. Essa diferença entre os dois blocos traduz-se também nos valores de E , com a direção 1_3 a apresentar um valor consideravelmente mais baixo relativamente às restantes. As diferenças obtidas em termos direcionais estão relacionadas com o diferente estado de alteração do granito.

Por sua vez, no granito azul de Guimarães na direção paralela ao plano de desmorte (5_6) são registados valores de f_c consideravelmente mais baixos relativamente àqueles que são obtidos na direção 1_3, o que está em linha com os resultados obtidos por Vasconcelos (2005). O valor mínimo, na média das três direções, é verificado na direção 2_4. Uma

vez que os CV são elevados em ambas as direções e a diferença dos valores médios entre a direção 2_4 e 5_6 é de apenas aproximadamente de 1 MPa, pode-se concluir que do conjunto dos granitos analisados este é aquele onde os valores se aproximam mais dos resultados que seriam esperados antes desta campanha de ensaios.

Nota para o valor de E exageradamente elevado obtido no provete 6 de 79664.00 MPa. Este valor é o mais alto no conjunto de todas as direções e, inclusive, de todos os provetes ensaiados ao longo desta campanha. Como já foi referido anteriormente, foram detetadas imprecisões de alinhamento e falhas nas medições dos sensores de deslocamento e este provete comprova esse facto com um valor de E bastante acima da média de valores registados em outros provetes. Contudo, se neste caso é obtido um valor bastante elevado noutros como é o caso do provete 5 da direção 2_4 e no provete 4 da direção 5_6 são verificados valores bastante reduzidos. Ora, estes resultados anómalos fazem com que o CV para o parâmetro E sejam os mais elevados entre todos os granitos ensaiados, com as direções 1_3 e 5_6 a apresentarem-se com CV de E acima dos 60%. Conclui-se então que estes resultados são de baixa fiabilidade.

Por fim, o granito de Gondomar é aquele onde são registados valores mais de altos de CV para f_c , nomeadamente na direção 2_4 e 5_6 com percentagens de 36.35% e 38.30%, respetivamente. Mais uma vez, essas percentagens elevadas de CV são reveladoras de imprecisões no alinhamento do provete, que anteriormente foram evocadas aquando da análise do modo de rotura deste granito.

No entanto na direção 1_3 os CV de variação de f_c e E são relativamente mais baixos, existindo apenas um valor inferior obtido na direção 1_3 para o granito amarelo de Guimarães.

4.5 Relação entre propriedades físicas e mecânicas

Na presente secção serão analisadas as relações entre as propriedades físicas e mecânicas obtidas ao longo do presente capítulo. Assim, pretende-se com esta secção aferir acerca da capacidade dos IND, como é o caso da VPU que é englobada no conjunto de propriedades físicas, em estimar a f_c e E , cujos ensaios obrigam à destruição do material. Será, também, avaliada a relação entre os valores de n , que são obtidos de forma não destrutiva, com a f_c .

Tabela 4.6: Propriedades mecânicas em compressão dos quatro granitos. CV entre parêntesis (%)

		Amarelo Guimarães		Azul Guimarães		Gonça		Gondomar	
Direção	Provete	f_c (MPa)	E (MPa)	f_c (MPa)	E (MPa)	f_c (MPa)	E (MPa)	f_c (MPa)	E (MPa)
1_3	1	84.59	26657.26	87.76	21108.64	66.77	15726.34	109.89	31089.02
	2	74.61	41572.19	63.72	25758.40	42.80	12682.21	91.42	29551.68
	3	-	-	97.94	34203.38	35.67	9876.16	102.54	37019.74
	4	85.34	26733.95	68.97	30342.7	46.74	16407.00	96.49	45028.93
	5	84.18	47960.58	68.22	15178.49	63.20	18100.82	91.97	-
	6	99.96	35759.39	91.99	79664.00	52.15	12932.53	135.35	31194.03
Média		85.74(10.59)	35736.67(26.06)	79.77(18.18)	34375.93(67.43)	51.22(23.41)	14287.51(20.99)	104.61(15.86)	34776.68(18.41)
2_4	1	50.18	-	54.28	19407.89	64.49	26562.32	-	-
	2	60.78	11358.31	62.32	25710.83	44.05	14459.31	85.34	6760.96
	3	36.10	29580.25	89.61	15299.86	83.23	36492.46	113.18	35783.59
	4	45.84	-	58.13	30465.21	46.74	17391.91	60.48	18445.70
	5	57.40	13575.16	68.06	10413.76	110.85	22223.90	53.37	-
	6	57.95	-	88.10	32957.03	-	-	60.10	33545.16
Média		51.38(18.12)	18171.24(54.72)	70.08(21.76)	22375.76(39.50)	69.87(39.77)	23425.98(36.90)	74.93(33.32)	23633.85(57.68)
5_6	1	64.31	13589.56	89.82	51592.17	49.57	25109.21	56.07	35518.00
	2	-	-	96.13	38214.77	87.17	44527.67	47.15	10715.53
	3	-	-	67.73	34155.33	83.57	38367.57	67.14	38582.37
	4	56.09	16700.73	49.07	9033.47	57.56	35985.05	121.55	21832.88
	5	88.37	35631.76	57.38	13579.70	91.63	34769.12	116.93	41142.36
	6	-	-	67.14	-	75.76	-	81.17	33624.95
Média		69.59(24.11)	21974.02(54.29)	71.21(25.72)	29315.09(60.49)	73.59(23.11)	35751.72(19.69)	81.67(38.30)	30236.02(38.56)

4.5.1 Relação entre a VPU e as propriedades mecânicas obtidas através do ensaio de compressão uniaxial

Uma vez que as percentagens elevadas da variabilidade dos resultados obtidos apontam para uma baixa fiabilidade dos valores de f_c e E , para mitigar essa variação, para além da relação entre os valores obtidos para cada um dos provetes, serão relacionados os valores médios obtidos no conjunto das três direções. Para além disso, como os valores mais elevados de VPU são medidos na direção paralela ao plano de desmorte e tendo em conta que as tensões de tração se desenvolvem na direção perpendicular à direção de carga, ou seja na prática os valores mais baixos de f_c obtidos no ensaio de compressão uniaxial ocorrem quando o carregamento é feito na direção paralela ao plano de desmorte, a análise em termos globais permite avaliar com maior fiabilidade o desempenho do ensaio de ultrassons na estimativa de f_c . Note-se que o efeito da anisotropia pode influenciar as correlações estatísticas em compressão quando a anisotropia é importante

A relação em termos médios entre a VPU medida em laboratório e f_c é apresentada na Figura 4.13 (a). A sua relação com E , também em termos médios, é ilustrada na Figura 4.13 (b).

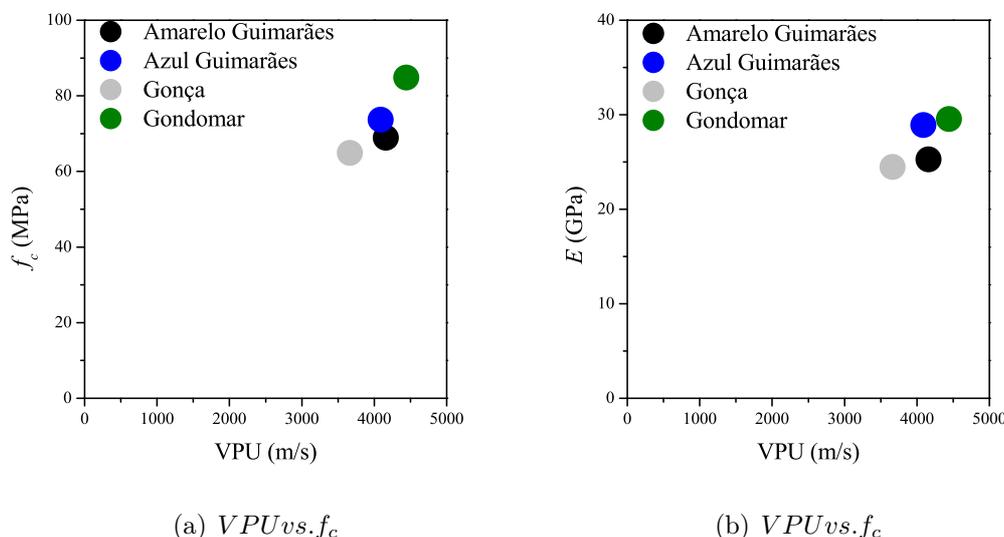


Figura 4.13: Relação entre a VPU e os parâmetros mecânicos (valores médios)

Da Figura 4.13 é possível observar que a VPU aumenta para valores maiores de f_c e E . Nos casos extremos, personificados pelos granitos de Gonça e Gondomar, é notória essa relação.

Contudo, para os granitos de Guimarães essa relação não é tão linear como se esperava. Porém, desde a sua fase em blocos que estes dois granitos se apresentam bastante semelhantes no que diz respeito aos valores obtidos pelos diferentes tipos de ensaios. Seria de

esperar que o granito amarelo apresentasse valores mais baixos de VPU , devido ao seu maior estado de alteração. No entanto, este sempre apresentou valores mais elevados de VPU comparativamente com o granito azul. Na medição direta em bloco retificado no granito amarelo de Guimarães foram lidos valores médios no conjunto de todas as faces de 4440.93 m/s sobrepondo-se ao granito azul onde foram obtidos, nas mesmas condições, apenas 4291.62 m/s .

No mesmo ensaio, mas em laboratório e com condições de humidade controladas a diferença de VPU entre estes dois granitos diminuiu, mas no granito amarelo de Guimarães continuaram a ser lidos valores mais altos do que no azul com 4160.13 m/s e 4087.26 m/s , respetivamente.

A partir da Figura 4.14, são repetidas as relações anteriores mas agora considerando os valores obtidos para cada um dos provetes. Nestas é possível observar a mesma tendência verificada aquando da consideração dos valores médios. Porém, através da Figura 4.14 (a) e sobretudo da Figura 4.14 (b) é possível verificar vários casos que contrariam a tendência dos valores mais elevados do IND considerado estarem relacionados com os valores mais elevados dos parâmetros mecânicos. No entanto, como foi referido anteriormente, este comportamento era expectável pela baixa fiabilidade dos valores dos parâmetros mecânicos obtidos em alguns dos granitos.

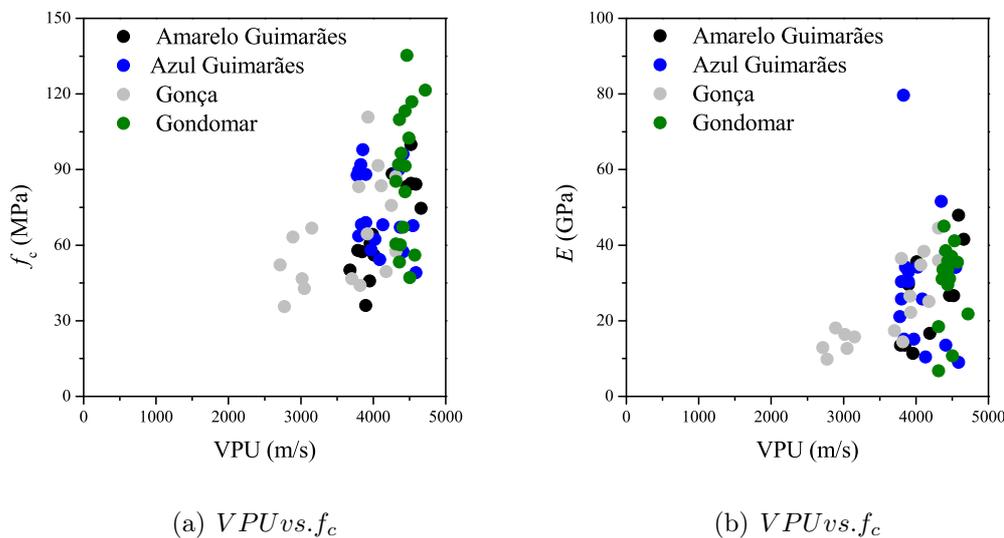


Figura 4.14: Relação entre a VPU e os parâmetros mecânicos (provetes)

4.5.2 Relação entre a n e a resistência à compressão

Da análise da relação entre n e f_c (Figura 4.15) é notória a proporcionalidade inversa entre as duas propriedades, sobretudo quando a relação é feita em termos de valores médios (Figura 4.15 (b)). Os granitos mais porosos como é o caso dos amarelos (Gonça e

Guimarães) apresentam valores mais baixos de f_c , uma vez que maior número de vazios e fissuras resultam numa estrutura menos resistente do material.

Analisando a Figura 4.15 (a), onde são considerados os valores obtidos em cada um dos provetes, é verificada a mesma tendência que é observada em termos de valores médios, mas tal como aconteceu na relação entre propriedades mecânicas e o IND são verificados alguns casos onde essa tendência é contrariada, resultado de alguns valores de f_c serem de baixa qualidade, devido às imprecisões de medição referidas na secção anterior.

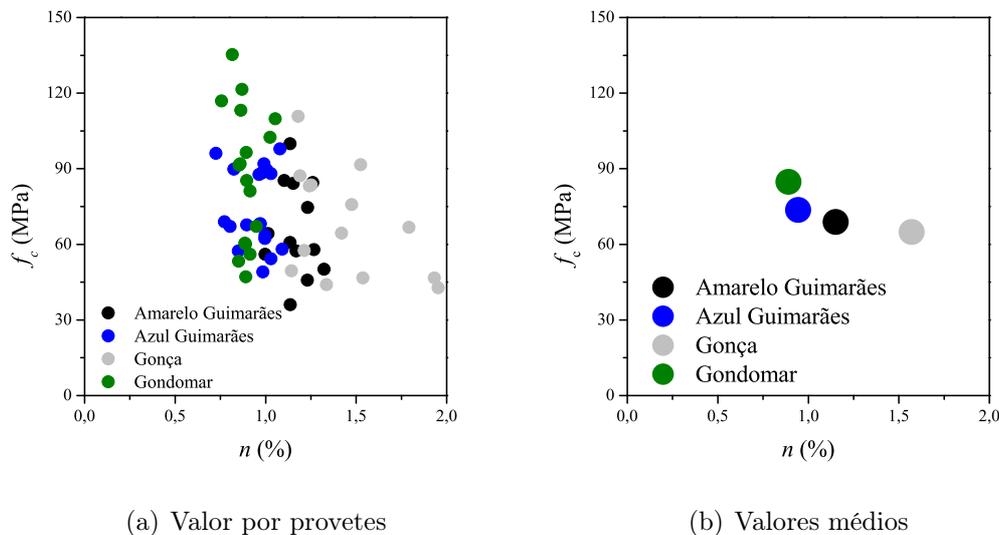


Figura 4.15: Relação entre n e f_c

4.6 Conclusões

Do ensaio da medição da VPU em laboratório foram obtidas leituras ligeiramente inferiores àquelas que foram registadas nos blocos retificados analisados na secção anterior em três dos granitos. A exceção é protagonizada pelo granito de Gonça, que é por si só um caso singular neste estudo uma vez que doze dos seus provetes, analisados ao longo deste capítulo, são oriundos de um bloco diferente daquele que foi estudado no Capítulo 3.

Deixando de parte o granito de Gonça, pelas razões apontadas no parágrafo anterior, desta campanha são apresentados valores que se aproximam bastante dos resultados obtidos em condições menos rigorosas de controlo de humidade contida no material. No granito amarelo de Guimarães foi registada uma redução de VPU de cerca de 6.30%, no granito azul da mesma cidade essa redução é de apenas 4.76% e no granito de Gondomar a redução é de 15.50%. Esta redução deve-se ao facto de os provetes antes de serem ensaiados terem sido secos em estufa, reduzindo dessa forma o efeito da água contida nos resultados de VPU .

Deste ensaio deve ser realçado ainda o facto de os valores de VPU indicarem claramente a capacidade deste ensaio em detetar a anisotropia dos granitos, confirmando as direções que tinham sido estabelecidas para os blocos de granito, ou seja foram registados valores mais altos de VPU na direção 1_3 no caso do granito amarelo de Guimarães e na direção 5_6 nos dois granitos azuis, que são as direções correspondentes à direção paralela ao plano de corte.

A partir dos ensaios de porosidade, que se verificou ser muito baixa para todos os tipos de granitos, é verificada a existência de uma boa correlação entre a VPU e n , com as percentagens mais elevadas de n a serem relativas aos granitos amarelos e as mais baixas a serem encontradas nos granitos azuis, acentuando a proporcionalidade inversa existente entre os dois parâmetros. A única exceção que merece particular destaque é personificada pelos granitos de Guimarães, uma vez que no granito amarelo de Guimarães foram medidos valores de VPU superiores ao granito azul e os valores de n indicam uma ligeira superioridade do amarelo em relação ao azul. Uma vez que nos restantes casos a proporcionalidade inversa entre os dois parâmetros em análise foi confirmada, seria expectável um valor de n inferior no granito amarelo comparativamente com o azul. Contudo, os valores elevados de VPU do granito amarelo podem ter sido influenciados por outros parâmetros, aos quais o ensaio de porosidade é menos sensível.

Com a obtenção dos parâmetros mecânicos e posterior relação com a VPU é possível verificar que esta é superior em granitos com maiores valores de f_c e de E . No entanto, devido à baixa fiabilidade dos valores de parâmetros mecânicos verificada em alguns dos provetes, essa relação é sobretudo perceptível na relação entre parâmetros feita em termos de valores médios.

Da relação entre os parâmetros mecânicos e n é obtida uma relação inversa entre eles. Ou seja, os granitos mais porosos são aqueles que apresentam valores mais baixos de f_c e E .

Realce final para o facto de no presente capítulo não constarem ensaios de medição de dureza superficial em provetes, uma vez que na altura o MS se encontrava danificado o que impossibilitou a realização dos mesmos.

Capítulo 5

BASE DE DADOS

5.1 Introdução

Neste capítulo foram criados vários modelos de previsão baseados em técnicas de Data Mining (DM) para três parâmetros mecânicos distintos, designadamente a resistência à compressão (f_c), resistência à tração (f_t) e o módulo de elasticidade (E) dos granitos.

A estimativa rigorosa deste conjunto de variáveis obriga à execução de ensaios de destrutivos (ED) e morosos em laboratório. Uma vez que no caso particular dos granitos usados na construção de edifícios antigos nem sempre é possível executar esses ensaios de aferição, este trabalho pretende construir modelos com o objetivo de desenvolver relações entre os parâmetros acima mencionados e os resultados de ensaios não destrutivos (END), por razão dos últimos serem não evasivos, simples e económicos, tentando com isso diminuir o desconhecimento existente das propriedades mecânicas dos granitos após a sua aplicação em construção.

Assim, ao longo deste processo de aferição das capacidades destas técnicas em granitos, serão verificadas as importâncias relativas que as várias variáveis independentes assumem nos modelos de previsão dos três parâmetros em análise.

Na construção dos modelos serão utilizadas propriedades mecânicas e físicas dos granitos obtidas laboratorialmente e também parâmetros resultantes da aplicação das técnicas não destrutivas económicas e de fácil aplicação, como é o caso das técnicas abordadas no Capítulo 3.

Para isso foram consideradas várias combinações de parâmetros de entrada para cada um dos três conjuntos de dados disponíveis. Em todos os conjuntos foi considerada como primeira combinação aquela que engloba todos os parâmetros existentes nesse conjunto

de dados, e as combinações subsequentes foram construídas a partir de análises de sensibilidade dos parâmetros de entrada. Esta análise permite averiguar acerca da importância de determinado parâmetro na previsão de outro parâmetro. Como um dos objetivos da aplicação destas técnicas de DM é a de conseguir prever de melhor forma possível o valor de determinada variável dependente através do uso do menor número possível de variáveis independentes, reduzindo assim a necessidade de vários ensaios para a obtenção de várias variáveis, através da análise de sensibilidade foi feita a triagem entre os parâmetros com maior e menor relevância no modelo final de modo a reduzir o número de variáveis de combinação para combinação, mantendo uma capacidade de previsão aceitável.

Foram construídas combinações usando parâmetros de entrada independentemente do valor da sua importância, procurando desta forma obter modelos com maior precisão através da relação de determinados conjuntos de parâmetros que, apesar de terem menor capacidade preditiva, vão de encontro ao objetivo principal deste estudo.

Para além disso, foram também consideradas combinações onde constam apenas parâmetros de fácil aferição. Como parâmetros de fácil aferição de ser entendido que são parâmetros que não exigem destruição dos provetes em laboratório.

Contudo este trabalho é uma primeira abordagem da aplicação destas técnicas em granitos e será sempre limitado pelo volume de informação disponível. Serão sempre necessárias mais campanhas de ensaios laboratoriais e in-situ para comprovar o real valor dos modelos de previsão, uma vez que maior e melhor qualidade de informação facilitará e resultará sempre na construção de modelos mais apurados.

5.2 Análise e preparação dos dados

As diferentes bases de dados construídas para o desenvolvimento de modelos de previsão de algumas propriedades mecânicas de granitos tiveram como fonte a informação reunida por Vasconcelos (2005) no âmbito da escrita de uma tese para obtenção do grau de Doutor. Esse trabalho, de cariz sobretudo experimental, teve como objetivos a caracterização mecânica de granitos portugueses, a avaliação do potencial do uso de métodos não destrutivos simples e económicos na previsão das propriedades mecânicas de granitos e a análise do comportamento de paredes de granito sob carregamentos cíclicos.

Para esse fim, e apontando para uma compreensão alargada do material em estudo, oito tipos distintos de granitos originários de diferentes pedreiras, sobretudo localizadas no norte do país, foram analisados. Nestes foram tidos em consideração a respetiva orientação preferencial dos minerais (foliação) e estado de desgaste.

Como resultado da campanha experimental de caracterização, da medição da velocidade de propagação de ultrassons (VPU) e dos valores de ressalto do Martelo de Schmidt (MS) foram obtidos valores relativos a diferentes parâmetros e destes foram construídas relações estatísticas entre E , f_c e f_t .

Com vista ao uso da informação recolhida para a construção de modelos de previsão dos três parâmetros mecânicos mencionados, o conjunto de dados inicial foi analisado e dividido em três conjuntos diferentes. Os conjuntos individuais foram construídos tendo como pretensão facilitar a criação de modelos de previsão para cada um dos três parâmetros em estudo, sendo que para a previsão de f_c foram usadas duas bases de dados distintas. Uma delas engloba vários parâmetros obtidos durante o ensaio à compressão de provetes secos e a outra abrange um número extensivo de parâmetros apresentados sob a forma de valores médios. A terceira base de dados foi construída com base em provetes ensaiados à tração. Os modelos para a previsão de E foram construídos a partir da base de dados com os valores de compressão em amostras secas e da base de dados construída com valores médios. Uma vez que a informação de E presente na base de dados relativa à tração se encontrava algo dispersa, foi decidida a utilização dos valores médios de f_t para a criação de modelos de previsão que relacionem estes dois parâmetros.

Os parâmetros presentes nas diferentes bases de dados são apresentados nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3.

Tabela 5.1: Parâmetros presentes na base de dados de compressão em amostras secas

Símbolo	Grandeza	Unidade
f_c	Resistência à compressão	MPa
E	Módulo de elasticidade	MPa
n	Porosidade	%
f_{ci}	Tensão de compressão correspondente ao início da fendilhação	MPa
f_{cd}	Tensão de compressão correspondente ao início da propagação da fendilhação	MPa
VPU_{54d}	Velocidade dos ultrassons em amostras secas - Transdutores de $54kHz$	m/s
VPU_{150d}	Velocidade dos ultrassons em amostras secas - Transdutores de $150kHz$	m/s

Tabela 5.2: Parâmetros presentes na base de dados de valores médios

Símbolo	Grandeza	Unidade
k_0	Dureza inicial	MPa
δ_{ft}	Deslocamento provocado pelo pico de carregamento	mm
f_t	Resistência à tração	MPa
G_f	Energia de fratura	N/mm
w_c	Espessura da ranhura	mm
d_u	Índice de ductilidade	mm
n	Porosidade	%
ρ_d	Massa específica seca	Kg/m ³
ρ_{sat}	Massa específica saturada	Kg/m ³
E	Módulo de elasticidade	MPa
E^*	Módulo de elasticidade obtido através de medições LVDTs	MPa
ν	Coefficiente de Poisson	-
f_c	Resistência à compressão	MPa
ε_{ci}	Extensão axial correspondente a f_{ci}	mm/m
f_{ci}	Tensão de compressão correspondente ao início da fendilhação	MPa
ε_{cd}	Extensão axial correspondente a f_{cd}	mm/m
f_{cd}	Tensão de compressão correspondente ao início da propagação da fendilhação	MPa
G_{cpre}	Energia de fratura antes de atingir o pico máximo	N/mm
du_{pre}	Índice de ductilidade correspondente a G_{cpre}	mm
G_{cpost}	Energia de fratura após atingir o pico máximo	N/mm
du_{post}	Índice de ductilidade correspondente a G_{cpost}	mm
$VP_{U_{54d}}$	Velocidade dos ultrassons em amostras secas - Transdutores de 54kHz	m/s
$VP_{U_{150d}}$	Velocidade dos ultrassons em amostras secas - Transdutores de 150kHz	m/s
$VP_{U_{54sat}}$	Velocidade dos ultrassons em amostras saturadas - Transdutores de 54kHz	m/s
$VP_{U_{150sat}}$	Velocidade dos ultrassons em amostras saturadas - Transdutores de 150kHz	m/s
N	Valor de ressalto do MS-Tipo N	-

Tabela 5.3: Parâmetros presentes na base de dados de tração

Símbolo	Grandeza	Unidade
k_0	Dureza inicial	MPa
f_t	Resistência à tração	MPa
G_f	Energia de fratura	N/mm
w_c	Espessura da ranhura	mm
d_u	Índice de ductilidade	mm
n	Porosidade	%
ρ	Massa específica	Kg/m^3
$VP_{U_{150d}}$	Velocidade dos ultrassons em amostras secas - Transdutores de $150kHz$	m/s
$VP_{U_{150sat}}$	Velocidade dos ultrassons em amostras saturadas - Transdutores de $150kHz$	m/s

Alguns atributos estatísticos para cada um dos parâmetros que figuram nas respectivas bases de dados são apresentados nas Tabelas 5.4, 5.5 e 5.6. A partir destas é possível verificar a existência de uma espectro relativamente largo no que concerne aos valores dos parâmetros de resistências e rigidez.

Tabela 5.4: Algumas estatística dos dados da base de dados de compressão em amostras secas

Parâmetro	Mínimo	1ºQuartil	Mediana	Média	3ºQuartil	Máximo
f_c	23.77	55.33	85.67	90.36	125.14	161.65
E	9923.00	15450.00	33753.00	33125.00	52167.00	67200.00
n	0.44	1.04	1.74	3.06	5.26	7.55
f_{ci}	5.95	13.71	23.38	27.24	37.55	61.18
f_{cd}	9.57	26.61	39.91	53.91	84.56	131.79
$VP_{U_{54d}}$	2018.00	2328.00	2732.00	3108.00	3970.00	4737.00
$VP_{U_{150d}}$	1942.00	2289.00	2678.00	3054.00	3949.00	4751.00

Tabela 5.5: Algumas estatísticas dos dados da base de dados de valores médios

Parâmetro	Mínimo	1ºQuartil	Mediana	Média	3ºQuartil	Máximo
k_0	620.00	1250.00	3081.00	4039.00	5484.00	13413.00
δ_{ft}	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05
f_t	1.56	2.16	3.04	3.62	4.71	8.08
G_f	0.15	0.18	0.21	0.21	0.25	0.27
w_c	0.09	0.17	0.28	0.34	0.51	0.72
d_u	0.02	0.04	0.07	0.08	0.11	0.15
n	0.47	0.86	1.55	2.85	5.02	7.24
ρ_d	2466.00	2546.00	2579.00	2589.00	2649.00	2663.00
ρ_{sat}	2539.00	2598.00	2614.00	2620.00	2663.00	2671.00
E	11028.00	15817.00	35088.00	34377.00	52991.00	63794.00
E^*	7795.00	11835.00	30461.00	28540.00	44292.00	53043.00
v	0.19	0.23	0.29	0.27	0.31	0.35
f_c	26.00	55.30	88.50	92.00	130.40	159.80
ε_{ci}	0.16	0.37	0.56	0.55	0.66	1.13
f_{ci}	6.80	14.60	21.10	27.95	42.95	58.50
ε_{cd}	0.19	0.50	0.79	0.80	1.00	1.91
f_{cd}	10.70	27.85	43.20	57.25	91.05	123.30
G_{cpre}	3.20	4.85	7.30	6.97	8.15	11.80
du_{pre}	0.03	0.06	0.10	0.11	0.15	0.21
G_{cpost}	11.80	29.15	35.70	34.72	43.85	49.10
du_{post}	0.22	0.32	0.41	0.47	0.57	0.87
VPU_{54d}	1956.00	2414.00	2743.00	3142.00	3902.00	4804.00
VPU_{150d}	1899.00	2364.00	2626.00	3075.00	3790.00	4776.00
VPU_{54sat}	3994.00	4036.00	4598.00	4656.00	5175.00	5527.00
VPU_{150sat}	3805.00	3920.00	4505.00	4531.00	5058.00	5457.00
N	62.50	65.55	68.60	67.95	71.10	71.60

Tabela 5.6: Algumas estatísticas dos dados da base de dados de tração

Parâmetro	Mínimo	1ºQuartil	Mediana	Média	3ºQuartil	Máximo
k_0	401.50	1160.60	2112.40	3413.00	4326.80	15246.00
f_t	1.28	2.07	2.89	3.38	4.46	9.04
G_f	0.10	0.18	0.21	0.21	0.24	0.43
w_c	0.05	0.18	0.30	0.35	0.51	0.95
d_u	0.02	0.04	0.07	0.08	0.11	0.20
n	0.61	1.05	2.78	2.96	4.59	7.40
ρ	2521.00	2576.00	2605.00	2612.00	2653.00	2705.00
VPU_{150d}	1578.00	2201.00	2521.00	2852.00	3470.00	4481.00
VPU_{150sat}	2535.00	3595.00	4054.00	4034.00	4404.00	5446.00

5.3 Modelação e avaliação

A modelação da informação contida nas bases de dados foi feita através da biblioteca *Rminer* integrada no software de utilização livre R, que trabalha sob uma interface do tipo consola (Figura 5.1). R é, por si só, uma linguagem-ambiente usada para análises estatísticas e criação de gráficos, usando vários tipos de bibliotecas para diferentes fins.

Segundo o autor da biblioteca, Cortez (2010), as principais possibilidades que esta proporciona aquando da sua aplicação em ambiente R são as seguintes:

- simplificação do uso de algoritmos de DM em tarefas de classificação e regressão, apresentando um pequeno conjunto de funções;
- seleção automática dos modelos de previsão;
- computação de várias métricas de classificação/regressão e gráficos.

```

RGui - [R Console]
File Edit View Misc Packages Windows Help
Loading required package: nnet
Loading required package: kernlab
Loading required package: e1071
Loading required package: rpart
> dados1<-read.table(file="C:\\compresao\\csecoa\\csecoa_trn.csv",sep=";",header=T)
> dados2<-read.table(file="C:\\compresao\\csecoa\\csecoa_tst.csv",sep=";",header=T)
> summary(dados1)
      X50.KHZ      X150.KHZ      f0      E0      n      f01      f02
Min.   :2025   Min.   :1942   Min.   : 23.77   Min.   : 9923   Min.   :0.1460   Min.   : 5.947   Min.   : 9.57
1st Qu.:2259   1st Qu.:2246   1st Qu.: 37.16   1st Qu.:11942   1st Qu.:0.2337   1st Qu.: 9.157   1st Qu.:119.72
Median :2610   Median :2599   Median : 56.28   Median :17571   Median :0.2473   Median :13.840   Median :129.69
Mean   :2705   Mean   :2454   Mean   : 67.99   Mean   :23796   Mean   :0.2644   Mean   :18.104   Mean   :137.44
3rd Qu.:3269   3rd Qu.:3252   3rd Qu.:109.34   3rd Qu.:39987   3rd Qu.:0.2936   3rd Qu.:27.898   3rd Qu.:197.56
Max.   :3569   Max.   :3513   Max.   :193.78   Max.   :45032   Max.   :0.4042   Max.   :37.990   Max.   :179.21
> summary(dados2)
      X50.KHZ      X150.KHZ      f0      E0      n      f01      f02
Min.   :2025   Min.   :1942   Min.   : 23.77   Min.   : 9923   Min.   :0.1460   Min.   : 5.947   Min.   : 9.57
1st Qu.:2259   1st Qu.:2246   1st Qu.: 37.16   1st Qu.:11942   1st Qu.:0.2337   1st Qu.: 9.157   1st Qu.:119.72
Median :2610   Median :2599   Median : 56.28   Median :17571   Median :0.2473   Median :13.840   Median :129.69
Mean   :2705   Mean   :2454   Mean   : 67.99   Mean   :23796   Mean   :0.2644   Mean   :18.104   Mean   :137.44
3rd Qu.:3269   3rd Qu.:3252   3rd Qu.:109.34   3rd Qu.:39987   3rd Qu.:0.2936   3rd Qu.:27.898   3rd Qu.:197.56
Max.   :3569   Max.   :3513   Max.   :193.78   Max.   :45032   Max.   :0.4042   Max.   :37.990   Max.   :179.21
> MR<-mining(f0~.,data.frame(dados1[,1],dados1[,3],dados1[,4]),model="mr",10,method="kfold",split=5)
> smetric(MR,metric="RMSE")
[1] 11.99237 11.47756 12.35920 11.17636 12.10478 11.09747 11.53084 12.22436 11.70508 11.97557
> smetric(MR,metric="COR")
[1] 14.89352 14.22740 15.12088 14.16993 14.85537 13.76166 14.35915 15.13804 14.43250 14.80016
> smetric(MR,metric="MSE")
[1] 0.9317827 0.9375684 0.9293352 0.9378872 0.9317564 0.9416335 0.9362971 0.9291478 0.9356654 0.9322178
> MRK<-fit(f0~.,data.frame(dados1[,1],dados1[,3],dados1[,4]),model="mr")
> Importance(MR,data.frame(dados1[,1],dados1[,3],dados1[,4]))
f0mp
[1] 0.00320387 0.00000000 0.99679613
$value
[1] 5.220285 0.000000 1566.971509
$responses
$responses[[1]]

```

Figura 5.1: Exemplo da aplicação da biblioteca *Rminer* em ambiente R

Através da computação das várias métricas, usando esta biblioteca, é possível avaliar e comparar o comportamento dos diferentes algoritmos, com base nos erros entre os valores reais e previstos (Martins e Miranda, 2012).

Neste trabalho foram usados algoritmos de DM baseados em três técnicas, nomeadamente a de Regressão Múltipla (RM), Redes Neurais Artificiais (RNA) e Máquina de Vetores de Suporte (MVS).

Para efeitos de avaliação do desempenho dos modelos DM aplicados foram usadas em cada um deles as seguintes métricas globais: DAM, REQM e COR. A sua formulação

matemática foi anteriormente apresentada no Capítulo 2 (equações 2.13, 2.15 e 2.17).

Contudo, a avaliação dos algoritmos de DM baseada unicamente nas métricas globais obtidas em modelos construídos a partir de apenas um conjunto de dados só deve ser feita quando esse conjunto, a partir do qual o modelo é criado, contém um número bastante elevado de valores de entrada.

No presente estudo como o número de entrada de dados para cada parâmetro é reduzido, no âmbito da aplicação de técnicas de DM, inicialmente foi necessário proceder à validação dos modelos através do método *cross-validation*. Quando são criados modelos de previsão a partir de apenas um conjunto restrito de parâmetros o erro entre o valor real e previsto pelo modelo pode ser considerado otimista, uma vez que o modelo está a prever um valor baseando-se nos dados que foram usados na sua própria construção (Witten e Frank, 2005). Ou seja, a capacidade real de previsão do modelo deve ser testada através da inserção de dados de entrada diferentes daqueles em que o modelo em si foi construído. Assim, tanto em bases de dados com informação alargada, mas sobretudo em bases de dados limitadas é frequente fazer-se a divisão do conjunto de dados disponíveis criando dois subconjuntos: subconjunto de treino e subconjunto de teste. O subconjunto de treino contém, normalmente, 2/3 da informação presente na base de dados inicial, ficando os restantes 1/3 dos dados no subconjunto de teste. O primeiro é utilizado na construção do modelo e o segundo tem como objetivo avaliar o comportamento desse modelo perante novos dados (Cortez *et al.*, 2009).

Por esta razão, a informação contida nas três bases de dados consideradas foi dividida de acordo com o seu tamanho. Isto é, a base de dados para a previsão de f_t que continha um total de 240 entradas foi dividida em dois subconjuntos de 159 e 81 entradas, sendo o primeiro o subconjunto de treino e o segundo de teste. Das 51 amostras do conjunto de f_c em amostras secas, 34 foram usadas para criar os modelos e as restantes 17 foram usadas na sua validação. Por último, os modelos criados a partir do conjunto de valores médios foram divididos segundo a técnica *leave-one-out*, onde no total de 19 entradas, 18 são usadas para treino sobrando apenas 1 para testar o modelo. A razão pela qual foi aplicada esta técnica explica-se pelo facto da dimensão bastante reduzida do conjunto total de entradas, mesmo em comparação com as restantes bases de dados abordadas neste trabalho, fazendo com que neste caso tivesse sido valorizada a criação do modelo a partir de um número bastante superior em relação àquele com que iria ser testado.

Para além disso, foi usado um método ainda mais robusto de ajustamento dos modelos. Similar ao *cross-validation* e denominado de *k-fold cross-validation*, este método divide o subconjunto de treino num k número de partes. Essa divisão de dados permite que um k

número de partes seja testada entre si e os restantes dados sirvam para ajustar o modelo. Este processo é repetido sequencialmente até todos os subconjuntos serem testados entre si, assentindo desta forma que todos os valores da base de dados de treino sejam usados para teste e treino (Cortez *et al.*, 2009). No presente trabalho, os subconjuntos foram divididos em cinco partes sendo testados e comparados entre si dez vezes. As métricas globais finais são a média das métricas de validação calculadas após dez interações, sendo o intervalo de confiança das métricas finais calculado pelo método *t-student* com um nível de confiança de 95%.

Os modelos foram também sujeitos a análises de sensibilidade. Esta análise permite identificar a importância das variáveis de entrada em cada um dos modelos. É feita através de constantes mudanças de variáveis de entrada na criação do modelo. Significa isto que, a importância que uma determinada variável tem num determinado modelo varia com o conjunto de variáveis com que esta se relaciona para criar esse modelo (Kewley *et al.*, 2000). A título exemplificativo esta análise pode ser explicada através de um exemplo hipotético. A importância das variáveis x , y e z usadas para prever w pode variar com a eliminação de uma delas na construção do modelo. Ou seja a importância que x tem no modelo de previsão de w pode variar quando relacionada somente com y ou z , para o mesmo propósito. Em suma, um parâmetro com um nível de importância alto, comparativamente com outros parâmetros, exerce maior influência no modelo final, enquanto um parâmetro com pouca importância faz com que a sua influência no modelo seja baixa, podendo ser retirado sem induzir grandes variações no modelo final (Martins e Miranda, 2012).

5.4 Modelos de previsão

5.4.1 Modelos de previsão: f_c

Uma vez que existia informação considerável acerca deste parâmetro em forma de valores médios e também no caso particular de amostras secas, foram criados individualmente modelos de previsão de f_c para esses dois conjuntos separados de dados.

Os parâmetros existentes nas duas bases de dados, assim como a sua descrição, já foram anteriormente apresentados na secção 5.2.

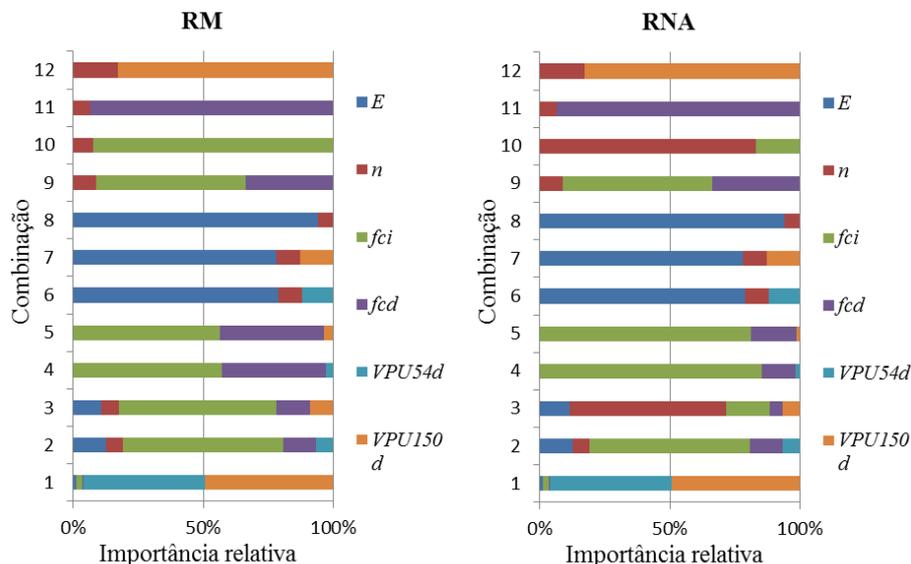
Previsão de f_c : amostras secas

Na construção dos modelos de previsão de f_c foram feitas doze combinações entre os parâmetros presentes na base de dados relativa a amostras secas. Os parâmetros que foram tidos em consideração em cada uma das combinações estão apresentados na Tabela 5.7.

Na Figura 5.2 encontram-se ilustradas as percentagens de importância relativa de cada parâmetro ao longo das várias combinações para os modelos RM, RNA e MVS, respetivamente. Complementarmente à Figura 5.2, os valores percentuais das importâncias podem ser consultados na secção de Anexos (Tabela I, II e II).

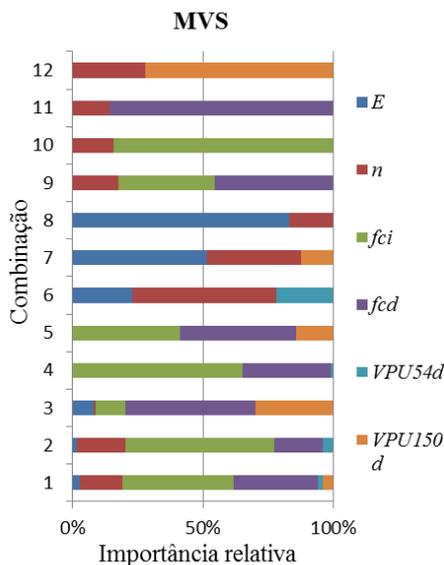
Tabela 5.7: Combinações de parâmetros de entrada para a previsão de f_c (amostras secas)

Combinação	Parâmetros de entrada
1	$VPU_{54d}, VPU_{150d}, E, n, f_{ci}, f_{cd}$
2	$VPU_{54d}, E, n, f_{ci}, f_{cd}$
3	$VPU_{150d}, E, n, f_{ci}, f_{cd}$
4	$VPU_{54d}, f_{ci}, f_{cd}$
5	$VPU_{150d}, f_{ci}, f_{cd}$
6	VPU_{54d}, E, n
7	VPU_{150d}, E, n
8	E, n
9	n, f_{ci}, f_{cd}
10	n, f_{ci}
11	n, f_{cd}
12	VPU_{150d}, n



(a) RM

(b) RNA



(c) MVS

Figura 5.2: Importância relativa (%) das variáveis de previsão para f_c nos modelos de DM (amostras secas)

Da análise de sensibilidade verifica-se que na combinação 1, que engloba todos os parâmetros, as duas variáveis relativas à VPU assumem-se como as mais importantes na construção dos modelos de previsão para f_c , com a exceção do modelo MVS, onde as variáveis com maior importância relativa são f_{ci} e f_{cd} .

Como foi mencionado anteriormente, esta primeira combinação serve apenas para aferir acerca da importância das variáveis na construção dos modelos. Por exemplo, não faz sentido na mesma combinação estarem presentes as variáveis VPU_{54d} e VPU_{150d} , uma vez que foi observado, aquando das suas medições, que a diferença entre elas é quase

inexistente apresentando um correlação linear de $VPU_{150} = 0.98VPU_{54}$, ($R^2 = 1.00$) (Vasconcelos, 2005). Significa isto, que independentemente do peso que estas constituem no modelo, quando relacionadas entre si e com outras variáveis, nas combinações seguintes não fazia sentido manter estes parâmetros dentro da mesma combinação. Aliás, nas combinações onde a única variável que difere da combinação anterior é a VPU com transdutores diferentes devem ser encaradas como apenas representativas de interesse puramente académico, uma vez que em termos práticos os valores obtidos para VPU_{54d} e VPU_{150d} são aproximadamente iguais e a diferença da frequência de transdutores está sobretudo ligada à necessidade de analisar provetes de menor ou maior dimensão, onde pode ser necessária a utilização de transdutores com maior frequência para medições mais precisas nos casos em que o aparelho necessite de ondas com menor comprimento para detetar o sinal.

Nas combinações 2 e 3, onde pela primeira vez as variáveis de VPU são consideradas isoladamente, a sua importância decresce drasticamente nos modelos em que anteriormente se assumiam como sendo as mais relevantes.

Da combinação 1 para a 2 a importância relativa de VPU_{54d} variou de 46.78% para 6.71%, no modelo RM e RNA. Este comportamento de variação acentuada verificou-se de forma igual na combinação 1 e 3 para VPU_{150d} , sendo registada uma ligeira superioridade desta variável para o modelo RM, uma vez que esta se apresentou com uma importância de 8.72% contra 6.42% registada no modelo RNA.

Por sua vez, no modelo MVS nas combinações 2 e 3 registou-se uma variação positiva, dado que na combinação 1 a VPU_{54d} e VPU_{150d} se apresentavam com importâncias bastantes reduzidas de 1.84% e 3.92%, respetivamente. Assim, na combinação 2 a VPU_{54d} assume um peso superior no modelo com uma percentagem de 4.07%, enquanto na combinação 3 a VPU_{150d} aumentou para 29.75%. Porém, esta diferença de importâncias registadas para as duas variáveis em análise, merece alguma reflexão uma vez que seria expectável que os modelos lhe atribuíssem importâncias semelhantes, já que os valores relativos a cada uma delas se aproximam bastante, como pode ser confirmado pelas estatísticas apresentadas na Tabela 5.4.

Sobre a combinação 2 importa salientar que a variável independente que se assume como a mais importante é f_{ci} , com percentagens próximas dos 60% em todos os modelos.

Na combinação 3, cada um dos modelos atribui maior importância a variáveis diferentes com f_{ci} , que anteriormente se apresentava como a variável independente mais preponderante em todos os modelos, a afigurar-se apenas com maior importância na construção do

modelo RM (60.85%). Nos modelos RNA e MVS as variáveis às quais é atribuído maior peso são n (60.31%) e f_{cd} (49.88%), respectivamente.

Da combinação 4 à 12 foram feitas combinações com máximo de três parâmetros de entradas.

Com esta imposição, os modelos RM e RNA passaram a apresentar um comportamento praticamente idêntico atribuindo importâncias relativas semelhantes a todas as variáveis com a exceção das combinações 4, 5 e 10. Nas combinações 4 e 5, apesar de f_{ci} ser considerada a variável mais importante em ambos os modelos, a percentagem que lhe é atribuída difere bastante entre os modelos. Na combinação 4 o modelo RM atribui a f_{ci} uma importância de 57.32%, bastante inferior à atribuída pelo modelo RNA, onde esta se apresenta com uma percentagem de 85.56%. Na combinação 5 regista-se novamente uma percentagem acima dos 80% para f_{ci} no modelo RNA, enquanto que para RM a sua importância é de 56.45%.

Por sua vez, na combinação 10 os dois modelos diferem na atribuição da variável mais importante. No modelo RM a mais importante é f_{ci} (57.27%). No modelo RNA é verificado um maior peso de n (83.18%).

O modelo MVS distingue-se dos modelos anteriores em termos de valor de importância atribuído a cada uma das variáveis presentes nas respetivas combinações e também no que diz respeito à variável mais importante em algumas das combinações. Destaque para a combinação 5 onde f_{cd} é a mais importante, ao contrário dos restantes modelos onde, na mesma combinação, a variável que apresenta maior importância é f_{ci} e a ainda para a combinação 6 onde n se apresenta como a variável com maior peso, quando nos restantes modelos esse lugar é atribuído a E .

Nota ainda para a combinação 12, onde só são consideradas dois parâmetros de fácil aferição, com $VP_{U_{150d}}$ a superiorizar-se a n em todos os modelos com valores percentuais iguais de 82.76% para RM e RNA e de 72.30% para o modelo MVS.

A precisão de cada um dos modelos pode ser avaliada em função das métricas globais obtidas para cada modelo, sendo estas apresentadas nas Tabelas 5.8, 5.9 e 5.10. Destas é observável que foi possível desenvolver modelos de previsão com boa capacidade de extrapolação através de todas as técnicas utilizadas, com os resultados a mostrarem que o desempenho dos modelos desenvolvidos por aplicação dos diferentes algoritmos é semelhante, traduzido pela métricas quase idênticas obtidas.

Tabela 5.8: Métricas globais para todas as combinações no modelo MR (f_c : amostras secas)

Combinação	DAM	REQM	COR
1	8.242 ± 0.660	13.908 ± 0.653	0.925 ± 0.007
2	9.222 ± 1.073	14.379 ± 0.796	0.920 ± 0.008
3	8.796 ± 0.832	14.059 ± 0.861	0.923 ± 0.009
4	7.507 ± 0.543	8.896 ± 0.690	0.976 ± 0.004
5	7.395 ± 0.416	8.738 ± 0.504	0.977 ± 0.003
6	10.386 ± 0.463	15.280 ± 0.460	0.907 ± 0.006
7	10.209 ± 0.497	15.140 ± 0.471	0.909 ± 0.006
8	10.371 ± 0.369	15.168 ± 0.372	0.909 ± 0.005
9	8.919 ± 0.499	13.752 ± 0.434	0.926 ± 0.004
10	9.156 ± 0.508	14.189 ± 0.367	0.920 ± 0.004
11	9.366 ± 0.660	14.643 ± 0.450	0.915 ± 0.005
12	11.026 ± 0.429	16.186 ± 0.581	0.896 ± 0.007

Tabela 5.9: Métricas globais para todas as combinações no modelo RNA (f_c : amostras secas)

Combinação	DAM	REQM	COR
1	8.482 ± 1.503	14.695 ± 4.709	0.916 ± 0.054
2	9.485 ± 3.198	15.435 ± 5.675	0.908 ± 0.063
3	8.656 ± 0.751	13.966 ± 0.676	0.924 ± 0.007
4	8.070 ± 1.676	10.467 ± 3.260	0.967 ± 0.019
5	7.827 ± 1.199	9.469 ± 1.954	0.973 ± 0.012
6	12.094 ± 1.200	15.100 ± 0.837	0.930 ± 0.008
7	10.221 ± 0.689	15.218 ± 0.538	0.908 ± 0.007
8	10.544 ± 1.907	15.505 ± 2.089	0.904 ± 0.027
9	8.955 ± 2.811	14.424 ± 6.619	0.917 ± 0.082
10	9.020 ± 0.708	13.380 ± 1.066	0.930 ± 0.012
11	9.447 ± 1.080	14.554 ± 1.060	0.916 ± 0.013
12	11.571 ± 2.818	16.861 ± 4.054	0.889 ± 0.041

Tabela 5.10: Métricas globais para todas as combinações no modelo MVS (f_c : amostras secas)

Combinação	DAM	REQM	COR
1	8.620 ± 1.091	13.462 ± 1.215	0.930 ± 0.013
2	8.684 ± 1.557	13.109 ± 1.109	0.933 ± 0.012
3	9.228 ± 2.282	14.322 ± 3.582	0.919 ± 0.043
4	7.281 ± 1.309	9.431 ± 1.565	0.973 ± 0.009
5	7.281 ± 1.309	9.431 ± 1.565	0.973 ± 0.009
6	10.633 ± 2.284	15.461 ± 3.166	0.905 ± 0.040
7	10.911 ± 2.194	15.724 ± 2.869	0.903 ± 0.033
8	10.906 ± 0.845	15.539 ± 1.003	0.905 ± 0.013
9	8.210 ± 0.317	13.345 ± 0.806	0.931 ± 0.008
10	8.080 ± 0.811	13.145 ± 1.100	0.933 ± 0.011
11	11.149 ± 2.895	16.113 ± 4.259	0.897 ± 0.054
12	12.988 ± 3.034	17.993 ± 4.302	0.870 ± 0.073

O modelo RM apresenta-se como sendo o melhor modelo nas combinações 4, 5, 6, 7, 8 e 12 com valores de DAM e REQM inferiores e com COR superior aos restantes modelos. Este modelo comparativamente com os outros dois, apresenta também boas performances na combinação 1 e 11. Na combinação 1 é apenas superado pelo modelo MVS em termos de COR, enquanto na combinação 11 é superado na avaliação da mesma métrica pelo modelo RNA. Este último modelo só se apresentou como o melhor modelo na combinação 3. Por outro lado, o modelo MVS surge como o melhor modelo em três das combinações, nomeadamente 2, 9 e 10.

Assim é possível concluir que o melhor modelo foi o RM, com melhor desempenho em termos de métricas globais ao longo de seis combinações em comparação com os restantes. O modelo MVS apresenta melhor comportamento em três combinações e o RNA em apenas uma. No entanto, em termos globais não são detetadas diferenças acentuadas entre os três modelos em análise. Assim, aliado ao bom desempenho que o modelo RM apresenta este produz uma expressão que é facilmente utilizável, representando isso uma vantagem em relação aos restantes dois modelos.

Analisando o desempenho dos modelos com base na inclinação da linha de tendência (a), o valor da ordenada na origem (b) e no valor do coeficiente de determinação (R^2) entre os valores medidos em laboratório e os estimados pelos modelos, o modelo RM é o que apresenta valores mais elevados de R^2 aquando da aplicação dos modelos na base de dados de teste nas combinações 1, 6, 7, 8, 9, 10 e 11 (Tabela 5.11), sendo apenas superado e/ou igualado pelo modelo RNA nas restantes combinações.

Tabela 5.11: Declive da linha de tendência (a), valor da ordenada na origem (b) e R^2 entre os valores medidos e estimados de f_c (amostras secas)

Combinação	RM						RNA						MVS					
	Todos			Teste			Todos			Teste			Todos			Teste		
	a	b	R^2															
1	0.87	12.43	0.94	0.83	14.45	0.99	0.87	12.44	0.94	0.83	14.45	0.99	0.91	6.69	0.94	0.87	9.98	0.94
2	0.86	13.67	0.93	0.80	16.44	0.99	0.86	13.67	0.93	0.80	16.44	0.99	0.70	27.31	0.74	0.61	37.06	0.78
3	0.86	13.76	0.93	0.80	16.44	0.98	0.92	6.37	0.97	0.81	12.39	0.94	0.84	14.12	0.92	0.74	21.69	0.91
4	0.88	11.27	0.95	0.65	25.76	0.97	0.95	4.01	0.98	0.83	10.79	0.98	0.91	7.89	0.97	0.79	16.00	0.96
5	0.88	11.27	0.95	0.65	25.83	0.97	0.95	4.93	0.98	0.86	10.65	0.98	0.94	4.63	0.97	0.73	4.63	0.97
6	0.82	16.21	0.90	0.75	18.39	0.97	0.82	16.21	0.90	0.75	18.39	0.97	0.70	30.16	0.79	0.47	49.05	0.65
7	0.82	16.19	0.90	0.75	18.40	0.97	0.82	18.19	0.90	0.75	18.40	0.97	0.74	24.63	0.84	0.58	37.81	0.77
8	0.84	14.72	0.91	0.79	15.32	0.98	0.84	14.72	0.91	0.79	15.32	0.98	0.83	7.63	0.94	0.88	6.21	0.99
9	0.88	11.07	0.93	0.87	10.74	0.99	0.88	11.07	0.93	0.87	10.74	0.99	0.89	7.63	0.94	0.88	6.21	0.99
10	0.88	10.04	0.93	0.85	8.82	0.99	0.91	8.10	0.96	0.79	13.84	0.95	0.80	19.39	0.85	0.68	30.73	0.78
11	0.88	11.97	0.93	0.90	10.46	0.99	0.88	11.97	0.93	0.90	10.46	0.99	0.87	9.55	0.93	0.86	8.64	0.98
12	0.80	17.70	0.87	0.71	19.55	0.93	0.80	17.70	0.87	0.71	19.55	0.93	0.75	25.39	0.82	0.60	36.69	0.79

No entanto, é com alguma surpresa que se verifica nos modelos, em grande parte das combinações, uma melhoria de R^2 quando são introduzidos os valores de teste, uma vez que seria expectável que os valores mais altos fossem verificados na fase de treino dado que os modelos se ajustam aos valores na sua construção, enquanto na fase de teste os modelos estão a prever valores que não foram considerados na sua construção.

Contudo, analisando os valores de b é notório um crescimento do seu valor entre a fase em que são considerados todos os dados para aquela em que são considerados apenas os valores de teste. Uma vez que num modelo ideal, os valores de a , b e R^2 seriam de 1, 0 e 1, respetivamente, é notória a queda de desempenho entre as duas fases, pela análise dos valores de a e de b .

Nas combinações 6 e 7 o modelo MVS apresenta valores relativamente baixos de R^2 na relação de valores medidos e estimados no conjunto de teste, o que indica dificuldades do modelo em estimar o valor de f_c a partir da relação da VPU com E e n . Importa realçar que o modelo MVS distinguia-se dos restantes nestas duas combinações ao atribuir maior importância a n , quando o modelo RM e RNA na combinação 6 consideravam E como a variável mais importante. Por sua vez na combinação 7, embora atribuindo maior importância a E como os restantes modelos, o valor percentual da variável mais importante era de apenas 51.39% no modelo MVS, contrastando com o peso de 78.24% atribuído pelos modelos RM e RNA a essa mesma variável.

Entre as combinações onde são consideradas apenas duas variáveis independentes (combinações 8, 10, 11 e 12) na previsão de f_c , os modelos RM e RNA estimam valores praticamente iguais, com a variação a ser verificada apenas a partir da quarta casa decimal, com a exceção da combinação 10, onde o modelo RM se destaca pela positiva em relação a RNA.

Destas deve ser dado especial destaque à combinação 12, onde só são consideradas parâmetros de fácil aferição na construção dos modelos, com valores elevados de R^2 a serem verificados nos modelos RM e RNA ($R^2 = 0.93$) para o conjunto de teste, que no entanto são contrariados pelo valor baixo de a (0.71) e elevado de b (19.55) (Figura 5.3), sendo inclusive os piores ao longo das 12 combinações para RNA, sendo que no caso de RM só são registados piores valores nas combinações 4 e 5.

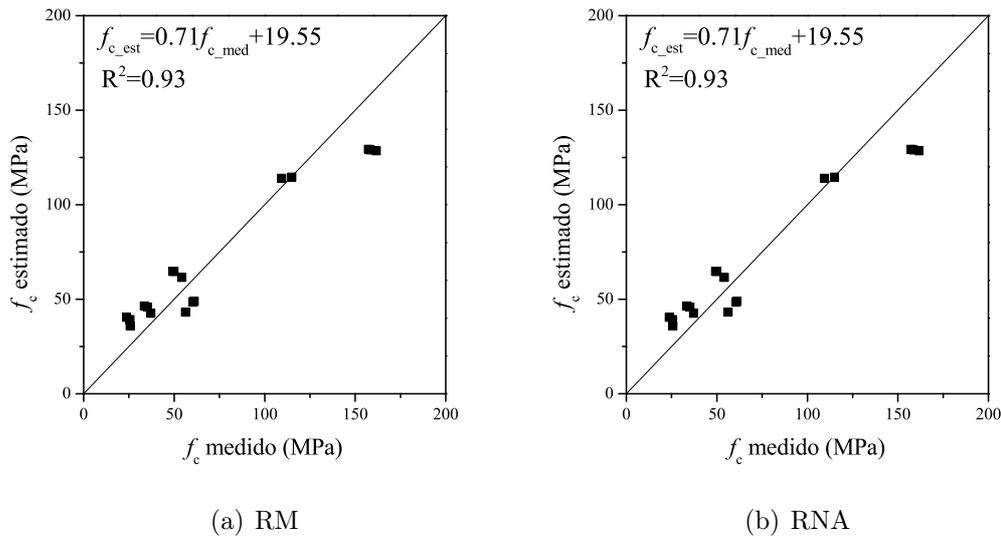


Figura 5.3: Relação entre os valores de teste f_c medidos e estimados para a combinação 12 (amostras secas)

Nas combinações onde são consideradas três variáveis independentes (combinação 4, 5, 6, 7 e 9), volta-se a verificar a similaridade entre os modelos RM e RNA nas combinações 6, 7 e 9, sendo que na última ambos os modelos são superiorizados pelo modelo MVS com um R^2 de 0.99 e com os valores de a e b superiores e inferiores, respectivamente, para o conjunto de teste (Figura 5.4).

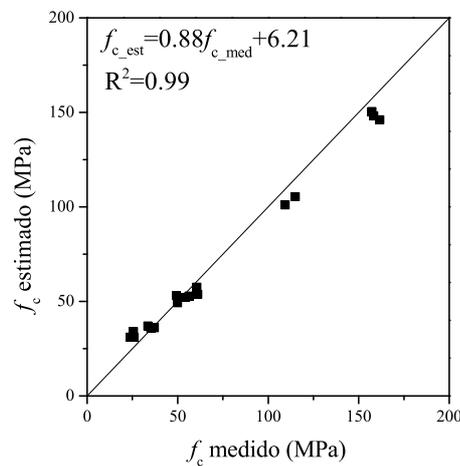


Figura 5.4: Relação entre os valores de teste f_c medidos e estimados pelo modelo MVS para a combinação 9 (amostras secas)

Do conjunto de teste, como se pode observar nas Figuras 5.3 e 5.4 não existem valores de f_c entre, aproximadamente, os 60 MPa e os 100 MPa o que representa uma limitação, uma vez que esta ausência de valores impossibilita aferir acerca do comportamento dos modelos para valores dentro desse intervalo.

Dado que foram obtidos bons resultados para as combinações com três ou menos parâmetros de entrada, apresentam-se as suas respectivas equações de regressão:

$$f_{c(comb6)} = -0.002VPU_{54d} + 0.002E - 5.483n + 59.374 \quad (5.1)$$

$$f_{c(comb7)} = -9.392 \times 10^{-4}VPU_{150d} + 0.002E - 5.524n + 57.712 \quad (5.2)$$

$$f_{c(comb8)} = 0.002E - 5.554n + 56.428 \quad (5.3)$$

$$f_{c(comb9)} = -5.603n + 0.931f_{ci} + 0.399f_{cd} + 60.593 \quad (5.4)$$

$$f_{c(comb10)} = -5.674n + 1.772f_{ci} + 59.448 \quad (5.5)$$

$$f_{c(comb11)} = -6.572n + 0.759f_{cd} + 69.491 \quad (5.6)$$

$$f_{c(comb12)} = -8.970n + 0.024VPU_{150d} + 43.916 \quad (5.7)$$

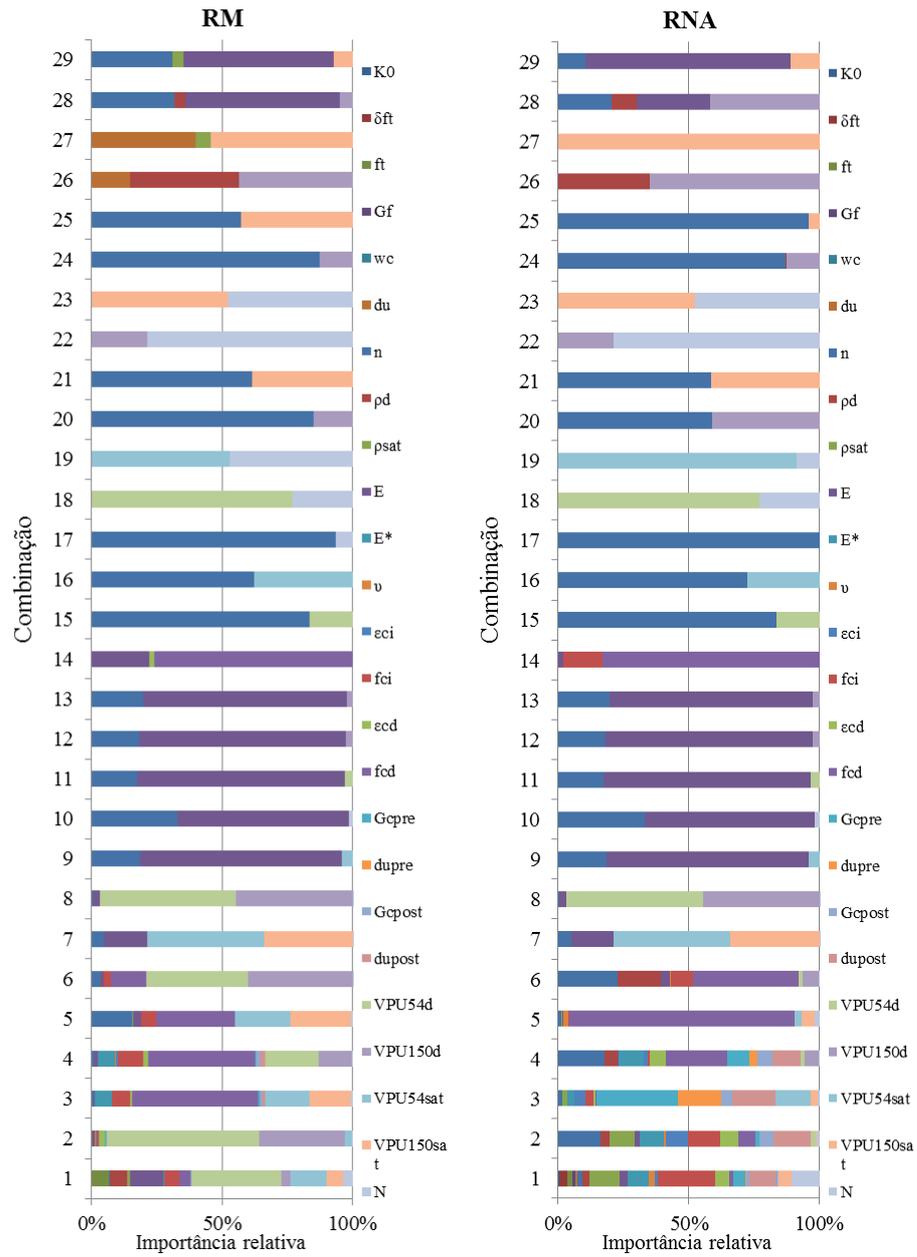
Previsão de f_c : valores médios

Usando a base de dados de valores médios foram construídas vinte e nove combinações de diferentes parâmetros (Tabela 5.12). Este elevado número de combinações deve-se à quantidade de parâmetros distintos que constituem esta base de dados, vinte e seis no total. Apesar de nesta figurarem vários parâmetros, o número de valores de entrada para cada um deles é bastante reduzido.

As combinações foram construídas com base nos valores de importância relativa de cada parâmetro para cada um dos modelos (Figura 5.5, Tabelas IV, V e VI (Anexos)), sendo que foram também construídas combinações usando apenas variáveis independentes de fácil aferição.

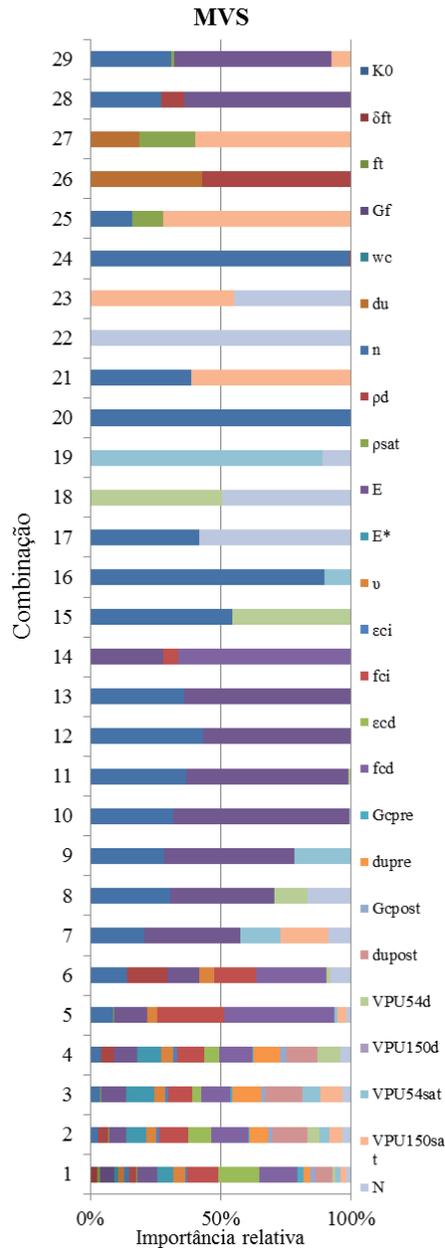
Tabela 5.12: Combinações de parâmetros de entrada para a previsão de f_c (valores médios)

Combinação	Parâmetros de entrada
1	$k_0, \delta_{ft}, f_t, G_f, w_c, d_u, n, \rho_d, \rho_{sat}, E, E^*, v, f_c, \varepsilon_{ci}, f_{ci}, \varepsilon_{cd}, f_{cd}, G_{cpre}, du_{pre}, G_{cpost}, du_{post}, VPU_{54d}, VPU_{150d}, VPU_{54sat}, N$
2	$E, \varepsilon_{cd}, f_{cd}, f_{ci}, du_{post}, E^*, v, G_{cpre}, du_{pre}, G_{cpost}, \varepsilon_{ci}, \rho_d, \rho_{sat}, n, VPU_{54d}, VPU_{150d}, VPU_{54sat}, N$
3	$n, \rho_{sat}, E, E^*, v, \varepsilon_{ci}, \varepsilon_{cd}, f_{cd}, G_{cpre}, du_{pre}, G_{cpost}, du_{post}, VPU_{54sat}, VPU_{150sat}, N$
4	$n, \rho_d, E, E^*, v, \varepsilon_{ci}, \varepsilon_{cd}, f_{cd}, G_{cpre}, du_{pre}, G_{cpost}, du_{post}, VPU_{54d}, VPU_{150d}, N$
5	$n, \rho_{sat}, E, v, f_{cd}, f_{ci}, VPU_{54sat}, VPU_{150sat}, N$
6	$n, \rho_d, E, v, f_{cd}, f_{ci}, VPU_{54d}, VPU_{150d}, N$
7	$n, E, VPU_{54sat}, VPU_{150sat}, N$
8	$n, E, VPU_{54d}, VPU_{150d}, N$
9	n, E, VPU_{54sat}
10	n, E, N
11	n, E, VPU_{54d}
12	n, E, VPU_{150d}
13	n, E, VPU_{150sat}
14	E, f_{ci}, f_{cd}
15	n, VPU_{54d}
16	n, VPU_{54sat}
17	n, N
18	N, VPU_{54d}
19	N, VPU_{54sat}
20	n, VPU_{150d}
21	n, VPU_{150sat}
22	N, VPU_{150d}
23	N, VPU_{150sat}
24	ρ_d, n, VPU_{150d}
25	$\rho_{sat}, n, VPU_{150sat}$
26	ρ_d, d_u, VPU_{150d}
27	$\rho_{sat}, d_u, VPU_{150sat}$
28	ρ_d, n, E, VPU_{150d}
29	$\rho_{sat}, n, E, VPU_{150sat}$



(a) RM

(b) RNA



(c) MVS

Figura 5.5: Importância relativa (%) das variáveis de previsão para f_c nos modelos de DM (valores médios)

Na fase inicial da análise de sensibilidade é possível observar que todos os modelos diferem bastante no valor de importância que atribuem a cada uma das variáveis. Nesta fase inicial os diferentes modelos atribuíram valores de importância mais alta a variáveis distintas. Para efeitos de melhor percepção da importância que cada modelo atribuí à variável independente com mais peso em cada uma das combinações é apresentada a Tabela 5.13.

Tabela 5.13: Variáveis mais importantes ao longo das combinações para os modelos de DM na previsão de f_c (valores médios)

Combinação	RM		RNA		MVS	
	+ importante	%	+ importante	%	+ importante	%
1	VPU_{54d}	34.26	f_{ci}	21.92	ε_{cd}	15.88
2	VPU_{54d}	58.05	n	16.08	du_{post}	13.08
3	f_{cd}	48.29	Gcpre	31.21	du_{post}	14.18
4	f_{cd}	40.81	f_{cd}	23.81	f_{cd}	12.08
5	f_{cd}	29.93	f_{cd}	86.36	f_{cd}	42.56
6	VPU_{150d}	40.18	f_{cd}	40.61	f_{cd}	29.78
7	VPU_{54sat}	44.78	VPU_{54sat}	44.78	E	36.85
8	VPU_{54d}	52.08	VPU_{54d}	52.08	E	35.51
9	E	77.25	E	77.26	E	49.80
10	E	65.39	E	65.32	E	67.41
11	E	79.41	E	79.41	E	62.04
12	E	79.20	E	79.20	E	54.26
13	E	77.74	E	77.74	E	60.75
14	f_{cd}	75.86	f_{cd}	82.96	f_{cd}	66.04
15	n	83.67	n	83.67	n	54.46
16	n	62.22	n	72.35	n	90.12
17	n	93.37	n	99.99	n	41.74
18	VPU_{54d}	77.04	VPU_{54d}	77.04	VPU_{54d}	50.73
19	VPU_{54sat}	52.87	VPU_{54sat}	91.40	VPU_{54sat}	89.12
20	n	85.05	n	58.78	n	58.97
21	n	61.31	n	58.52	VPU_{150sat}	61.135
22	N	78.67	N	78.64	N	50.52
23	VPU_{150sat}	52.39	VPU_{150sat}	52.40	VPU_{150sat}	55.20
24	n	87.18	n	87.23	n	51.00
25	n	57.11	n	69.90	VPU_{150sat}	71.95
26	VPU_{150d}	43.52	VPU_{150d}	61.11	VPU_{150d}	39.36
27	VPU_{150sat}	54.43	VPU_{150sat}	76.58	VPU_{150sat}	59.58
28	E	58.93	UPV150d	42.01	E	67.50
29	E	57.55	E	68.63	E	60.16

A partir da combinação 4 os modelos RM e RNA classificam quase sempre a mesma variável como a mais importante. A exceção é verificada na combinação 6, com RM a considerar VPU_{150d} como a mais importante, quando no modelo RNA é atribuída maior importância a f_{cd} .

No modelo MVS é verificada uma tendência semelhante à observada nos outros dois mo-

delos, existindo, contudo, exceções como é o caso da maior importância de E e VPU_{150sat} nas combinações 7, 8 e 25.

No entanto, os modelos atribuem valores de importâncias relativas distintas entre si. Esta situação é verificada sobretudo na comparação do modelo MVS com os restantes dois modelos.

Na avaliação dos modelos por análise das métricas globais (Tabela 5.14, 5.15 e 5.16), contrariamente ao que sucedeu nos modelos construídos a partir da base de dados de amostras secas, é possível identificar claramente os modelos com melhor e pior comportamento. O modelo que apresenta melhor comportamento é claramente o RM, com a sua superioridade em relação aos restantes a ser verificada em dezassete combinações contra as oito do modelo MVS e três do RNA.

Na avaliação dos modelos com pior comportamento o destaque vai para as RNA com vinte combinações onde são verificados valores de DAM e REQM superiores aos restantes modelos e valores de COR inferiores. No modelo RM essa situação é verificada em apenas cinco das combinações, enquanto o modelo MVS apresenta-se como pior modelo apenas na combinação 8.

Tabela 5.14: Métricas globais para todas as combinações no modelo RM (f_c : valores médios)

Combinação	DAM	REQM	COR
1	18.181 ± 17.630	25.026 ± 28.174	0.859 ± 0.270
2	75.080 ± 55.517	171.060 ± 177.267	0.207 ± 0.608
3	8.779 ± 7.681	11.034 ± 9.994	0.965 ± 0.059
4	12.326 ± 5.582	15.932 ± 7.066	0.944 ± 0.035
5	8.952 ± 5.203	11.783 ± 8.556	0.962 ± 0.055
6	11.668 ± 13.486	17.121 ± 23.212	0.943 ± 0.097
7	9.918 ± 5.470	12.872 ± 6.491	0.960 ± 0.033
8	9.043 ± 3.741	11.657 ± 6.627	0.968 ± 0.031
9	7.561 ± 2.245	9.554 ± 3.054	0.975 ± 0.016
10	7.748 ± 1.698	9.875 ± 2.487	0.974 ± 0.013
11	8.578 ± 7.766	11.205 ± 12.210	0.965 ± 0.076
12	7.848 ± 2.825	9.724 ± 4.001	0.976 ± 0.011
13	7.604 ± 2.183	9.498 ± 2.710	0.976 ± 0.012
14	9.006 ± 3.402	10.743 ± 3.880	0.970 ± 0.022
15	12.831 ± 7.411	17.074 ± 4.372	0.920 ± 0.039
16	11.716 ± 2.116	15.009 ± 1.931	0.940 ± 0.013
17	15.323 ± 2.754	18.026 ± 3.045	0.913 ± 0.018
18	15.130 ± 2.701	18.006 ± 2.671	0.910 ± 0.026
19	14.143 ± 2.871	17.844 ± 4.441	0.911 ± 0.046
20	14.010 ± 4.045	17.310 ± 4.045	0.918 ± 0.043
21	14.145 ± 4.875	18.562 ± 7.449	0.910 ± 0.064
22	16.247 ± 5.060	19.296 ± 5.054	0.898 ± 0.050
23	14.396 ± 3.438	17.636 ± 4.050	0.915 ± 0.035
24	16.856 ± 6.122	21.457 ± 9.107	0.887 ± 0.076
25	12.527 ± 4.115	15.817 ± 4.482	0.934 ± 0.033
26	17.967 ± 5.927	22.808 ± 7.299	0.861 ± 0.087
27	14.721 ± 6.448	18.950 ± 7.870	0.900 ± 0.086
28	8.506 ± 2.585	10.695 ± 3.538	0.971 ± 0.015
29	8.453 ± 1.977	10.190 ± 2.160	0.972 ± 0.012

Tabela 5.15: Métricas globais para todas as combinações no modelo RNA (f_c : valores médios)

Combinação	DAM	REQM	COR
1	11.007 ± 4.006	14.504 ± 6.433	0.949 ± 0.037
2	10.442 ± 6.538	13.353 ± 9.790	0.955 ± 0.065
3	9.133 ± 4.176	11.672 ± 6.195	0.964 ± 0.044
4	8.953 ± 2.568	11.320 ± 3.183	0.968 ± 0.017
5	7.824 ± 3.983	9.692 ± 4.899	0.975 ± 0.028
6	7.958 ± 2.946	10.1575 ± 4.322	0.974 ± 0.020
7	10.637 ± 8.177	14.876 ± 13.471	0.947 ± 0.080
8	8.854 ± 4.078	11.377 ± 4.818	0.968 ± 0.025
9	10.539 ± 6.795	14.276 ± 13.332	0.949 ± 0.083
10	13.120 ± 13.351	18.913 ± 23.283	0.909 ± 0.179
11	12.237 ± 12.575	17.834 ± 21.965	0.927 ± 0.153
12	15.693 ± 29.937	26.748 ± 71.263	0.890 ± 0.359
13	9.012 ± 5.504	11.496 ± 8.240	0.966 ± 0.040
14	16.638 ± 28.738	25.373 ± 55.986	0.867 ± 0.466
15	14.187 ± 4.663	17.603 ± 5.299	0.918 ± 0.040
16	18.927 ± 14.163	27.047 ± 26.411	0.821 ± 0.305
17	26.837 ± 24.710	39.376 ± 39.413	0.777 ± 0.255
18	28.143 ± 36.898	42.892 ± 82.034	0.717 ± 0.494
19	23.211 ± 15.875	39.282 ± 52.188	0.699 ± 0.536
20	18.345 ± 14.362	26.311 ± 23.952	0.836 ± 0.268
21	14.145 ± 4.875	18.562 ± 7.449	0.910 ± 0.064
22	24.446 ± 32.920	24.828 ± 27.656	0.735 ± 0.675
23	17.646 ± 12.065	22.635 ± 19.220	0.848 ± 0.252
24	22.059 ± 11.123	29.851 ± 18.495	0.789 ± 0.220
25	13.997 ± 3.759	18.329 ± 4.130	0.914 ± 0.034
26	25.414 ± 12.810	34.031 ± 18.135	0.785 ± 0.138
27	18.138 ± 8.226	25.877 ± 15.642	0.835 ± 0.167
28	12.113 ± 4.688	16.164 ± 6.424	0.939 ± 0.060
29	10.570 ± 5.741	13.148 ± 8.958	0.955 ± 0.068

Tabela 5.16: Métricas globais para todas as combinações no modelo MVS (f_c : valores médios)

Combinação	DAM	REQM	COR
1	8.400 ± 2.761	11.400 ± 4.145	0.969 ± 0.022
2	8.367 ± 2.390	11.333 ± 4.040	0.971 ± 0.019
3	8.935 ± 7.733	12.383 ± 11.966	0.959 ± 0.087
4	7.674 ± 2.691	10.397 ± 3.301	0.9771 ± 0.011
5	8.818 ± 3.431	10.744 ± 4.407	0.974 ± 0.016
6	9.157 ± 2.846	11.194 ± 3.169	0.970 ± 0.017
7	9.712 ± 2.587	12.467 ± 2.664	0.960 ± 0.015
8	10.064 ± 3.435	13.236 ± 3.721	0.955 ± 0.026
9	8.477 ± 1.647	11.250 ± 2.079	0.969 ± 0.012
10	10.445 ± 10.314	14.008 ± 16.590	0.938 ± 0.150
11	8.971 ± 3.082	11.898 ± 3.548	0.965 ± 0.017
12	9.550 ± 1.966	12.369 ± 2.271	0.962 ± 0.013
13	8.556 ± 2.345	11.257 ± 2.580	0.968 ± 0.015
14	8.189 ± 4.146	10.293 ± 6.478	0.975 ± 0.030
15	14.516 ± 3.501	18.179 ± 4.781	0.912 ± 0.057
16	13.636 ± 6.241	17.479 ± 8.854	0.926 ± 0.053
17	17.193 ± 4.368	20.103 ± 5.076	0.886 ± 0.067
18	15.765 ± 3.061	19.445 ± 3.402	0.901 ± 0.037
19	15.346 ± 4.281	18.682 ± 5.126	0.906 ± 0.0689
20	13.952 ± 4.314	18.375 ± 3.988	0.908 ± 0.047
21	12.942 ± 1.623	16.207 ± 2.047	0.933 ± 0.022
22	17.221 ± 4.119	20.984 ± 3.809	0.882 ± 0.056
23	17.849 ± 4.406	21.237 ± 4.788	0.884 ± 0.057
24	14.114 ± 2.455	19.559 ± 3.817	0.900 ± 0.050
25	13.316 ± 3.357	16.919 ± 4.785	0.924 ± 0.042
26	14.904 ± 3.034	19.337 ± 4.819	0.900 ± 0.053
27	12.915 ± 3.808	16.349 ± 4.547	0.931 ± 0.031
28	10.827 ± 3.028	14.043 ± 4.180	0.951 ± 0.030
29	10.258 ± 5.290	13.251 ± 7.287	0.953 ± 0.053

No que concerne ao desempenho dos modelos mediante os valores de a , b e R^2 , considerando todos os valores de treino e teste, uma vez que para este conjunto de dados só foi usado um valor de teste, os resultados indicam valores de R^2 bastante elevados (Tabela 5.17). O valor de R^2 mais baixo ao longo das combinações é de 0.71 relativo ao modelo RNA na combinação 3, onde inclusive o valor de b é negativo.

Tabela 5.17: Declive da linha de tendência (a), ordenada na origem (b) e R^2 entre o valores medidos e estimados de f_c (valores médios)

Combinação	RM Todos			RNA Todos			MVS Todos		
	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
1	0.99	1.85	0.99	1.00	0.44	1.00	0.98	2.44	1.00
2	0.96	7.83	0.83	0.99	1.23	1.00	0.99	1.69	0.99
3	1.00	0.71	1.00	1.05	-11.87	0.71	0.99	2.40	0.99
4	1.00	0.85	1.00	0.83	10.11	0.73	0.98	2.57	0.99
5	0.99	2.42	0.98	0.99	1.39	0.99	0.97	3.23	0.99
6	0.99	1.80	0.99	0.99	1.78	0.99	0.92	5.61	0.97
7	0.96	5.11	0.95	0.96	5.11	0.95	0.87	11.34	0.91
8	0.97	4.01	0.97	0.97	4.01	0.97	0.84	13.51	0.90
9	0.96	5.67	0.94	0.96	5.67	0.94	0.87	11.93	0.91
10	0.95	6.23	0.93	0.95	6.23	0.93	0.95	6.71	0.93
11	0.96	5.58	0.94	0.96	5.58	0.94	0.94	7.59	0.93
12	0.96	5.68	0.94	0.96	5.68	0.94	0.91	9.09	0.92
13	0.96	5.86	0.94	0.96	5.86	0.94	0.93	8.55	0.92
14	0.96	3.77	0.97	1.00	0.16	1.00	0.98	2.36	0.99
15	0.89	12.52	0.86	0.89	12.52	0.86	0.71	23.86	0.84
16	0.91	10.79	0.88	0.92	9.85	0.89	0.93	7.20	0.96
17	0.86	14.72	0.84	0.96	4.00	0.96	0.83	14.13	0.87
18	0.87	13.07	0.86	0.87	13.07	0.86	0.80	16.50	0.85
19	0.89	11.96	0.87	0.95	9.84	0.75	0.90	9.40	0.85
20	0.89	12.58	0.86	0.96	5.27	0.94	0.80	15.47	0.85
21	0.91	10.46	0.88	0.97	3.34	0.97	0.89	11.19	0.87
22	0.87	13.05	0.86	0.87	13.06	0.86	0.78	18.54	0.85
23	0.89	11.63	0.88	0.89	11.63	0.88	0.95	6.77	0.94
24	0.89	12.54	0.86	0.89	12.50	0.86	0.84	14.35	0.86
25	0.91	10.51	0.88	1.01	-2.52	0.98	0.91	10.03	0.89
26	0.85	16.16	0.81	0.97	5.99	0.89	0.73	20.78	0.83
27	0.88	13.43	0.85	0.89	12.47	0.85	0.93	7.42	0.91
28	0.96	4.87	0.95	0.99	2.34	0.98	0.92	9.59	0.92
29	0.97	4.79	0.95	0.99	2.50	0.98	0.96	6.26	0.93

A explicação para o facto de se obterem valores tão altos de R^2 reside no número de entradas que foram considerados para cada variável neste conjunto de dados. Os modelos foram construídos a partir de um número muito limitado de entradas o que dificultou a aplicação do método *k-fold cross-validation* obrigando a utilização do método *leave-one-out*. Aliás é observável nas tabelas relativas às métricas globais casos em que o modelo se apresentou bastante instável, com os valores de intervalo das métricas globais a superarem o próprio valor da métrica global. Essa instabilidade foi observada em treze das vinte e nove combinações para cada modelo, com o modelo RNA a destacar-se com oito combinações onde foram encontrados valores de intervalo superior ao valor da métrica global.

Em suma os resultados apresentados devem ser considerados como otimistas, sendo necessário submeter os modelos desenvolvidos a mais valores de teste para melhor aferição do seu potencial, uma vez que no presente estudo os modelos só foram testados por um valor. Por exemplo, na combinação 29 observando o valor estimado de f_c pelos três modelos para o valor medido que não foi englobado na criação do modelo são estimados valores bastante superiores ao valor real (Figura 5.6).

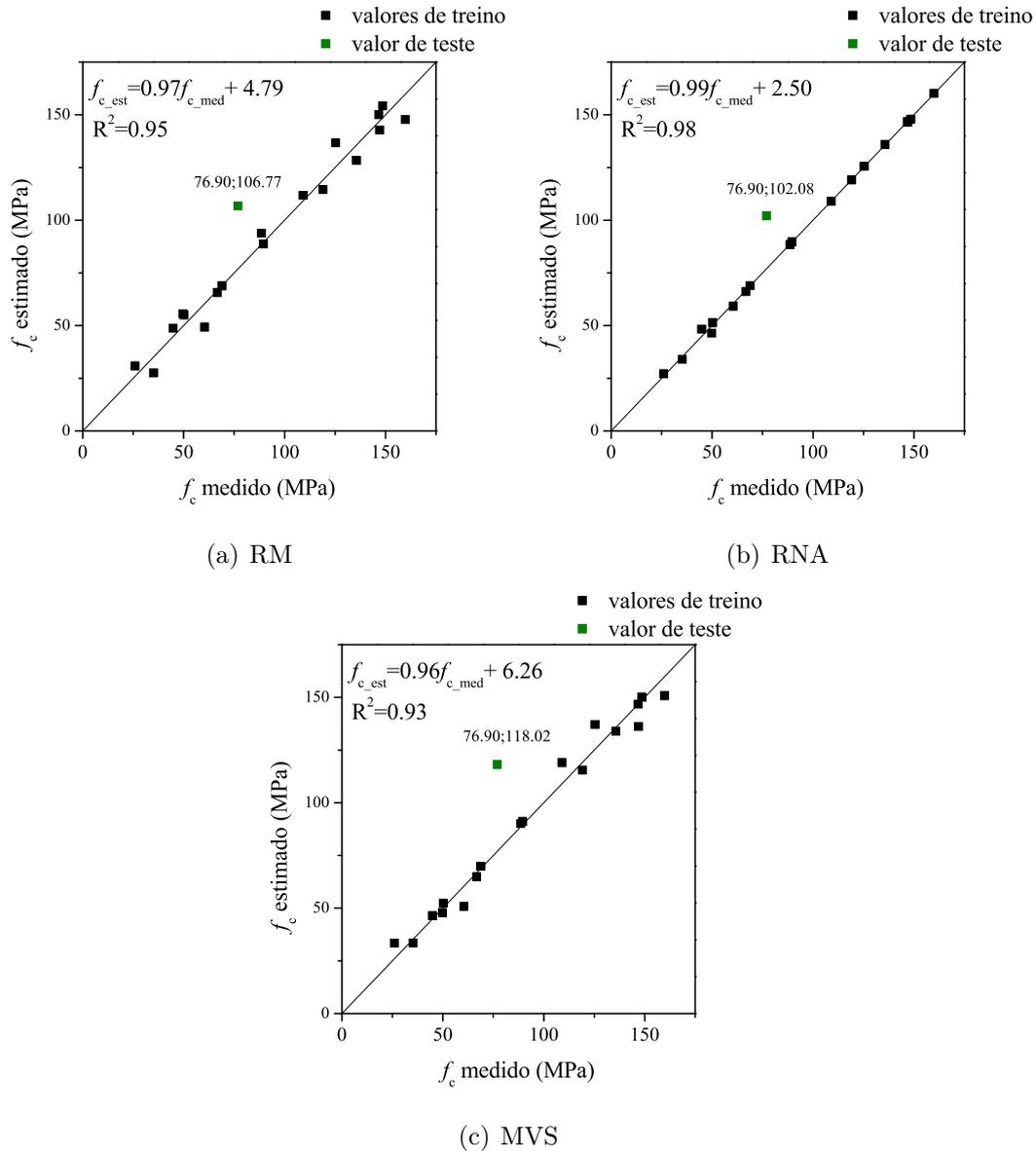


Figura 5.6: Diferença entre o valor de f_c medido e estimado pelos modelos na combinação 29 (valores médios)

Contudo, estes valores não devem ser desprezados. Se em alguns casos a diferença entre o valor estimado e medido é bastante elevada, noutros o valor de teste foi previsto com proximidade razoável. Por exemplo, na combinação 14 o modelo RNA previu o valor de f_c com uma exatidão bastante aceitável com uma diferença inferior a 1 MPa em relação ao valor medido (Figura 5.7).

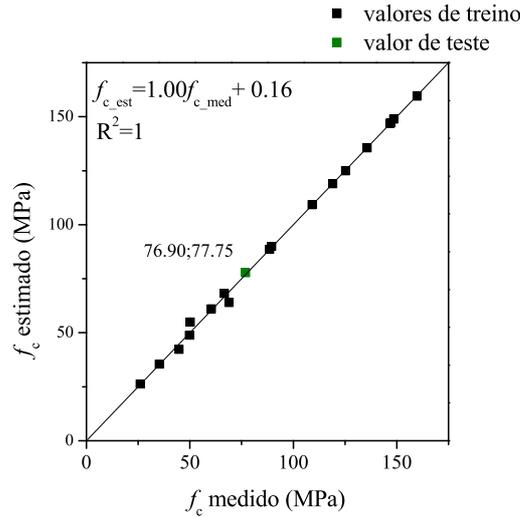


Figura 5.7: Valor estimado pelo modelo RNA na combinação 14 (valores médios)

Deixando de parte as combinações em que a variável de VPU relativa a transdutores de 54 kHz é considerada, por razões explicadas anteriormente, as equações de regressão construídas a partir de valores médios para as combinações que consideram quatro ou menos variáveis são as seguintes:

$$f_{c(comb10)} = -2.331n + 0.001E + 2.887N - 148.216 \quad (5.8)$$

$$f_{c(comb11)} = -5.506n + 0.002E - 0.009VPU_{150d} + 68.312 \quad (5.9)$$

$$f_{c(comb12)} = -5.506n + 0.002E - 0.009VPU_{150d} + 68.312 \quad (5.10)$$

$$f_{c(comb13)} = -6.120n + 0.002E - 0.0161VPU_{150d} + 114.852 \quad (5.11)$$

$$f_{c(comb14)} = 6.746 \times 10^{-4}E - 0.157f_{ci} + 0.846f_{cd+} + 24.764 \quad (5.12)$$

$$f_{c(comb17)} = -8.695n + 6.674N - 338.377 \quad (5.13)$$

$$f_{c(comb20)} = -13.440n + 0.013VPU_{150d} + 91.737 \quad (5.14)$$

$$f_{c(comb21)} = -9.908n + 0.033VPU_{150sat} - 27.904 \quad (5.15)$$

$$f_{c(comb22)} = 0.013VPU_{150d} + 9.504N - 596.604 \quad (5.16)$$

$$f_{c(comb23)} = 0.032VPU_{150sat} + 7.198N - 540.835 \quad (5.17)$$

$$f_{c(comb24)} = -17.746n - 0.132\rho_d + 0.010VPU_{150d} + 455.505 \quad (5.18)$$

$$f_{c(comb25)} = -12.877n - 0.127\rho_{sat} + 0.029VPU_{150sat} + 329.897 \quad (5.19)$$

$$f_{c(comb26)} = 0.195\rho_d - 426.860du + 0.014VPU_{150d} - 424.021 \quad (5.20)$$

$$f_{c(comb27)} = 0.214\rho_{sat} - 4237.193du + 0.040VPU_{150sat} - 632.021, \quad (5.21)$$

$$f_{c(comb28)} = -0.214\rho_d - 13.017n + 0.002E - 0.030VPU_{150d} + 745.572, \quad (5.22)$$

$$f_{c(comb29)} = -0.364\rho_{sat} - 13.863n + 0.002E - 0.035VPU_{150sat} + 1165.945 \quad (5.23)$$

5.4.2 Modelos de previsão: f_t

Na presente secção será realizado o teste à capacidade dos algoritmos de DM na previsão de f_t de granitos usando diferentes combinações de parâmetros. Da campanha experimental em laboratório de Vasconcelos (2005) resultou um número considerável de valores acerca da f_t em granitos. De todas as bases de dados analisadas esta é aquela que reúne uma maior quantidade de informação. Ao todo, a base de dados que foi submetida à aplicação de técnicas de DM para a previsão de f_t , possui 240 valores de entrada para cada um dos parâmetros presentes nesta (Tabela 5.3).

As quinze combinações que foram consideradas na construção dos modelos de DM são apresentadas na Tabela 5.18. A importância de cada variável ao longo das combinações consideradas na construção dos três modelos de DM é ilustrada na Figura 5.8 e os seus valores percentuais são apresentados nas Tabelas VII, VIII e IX da secção de Anexos.

Tabela 5.18: Combinações de parâmetros de entrada para a previsão de f_t (tração)

Combinação	Parâmetros de entrada
1	$k_0, G_f, w_c, d_u, n, \rho, VPU_{150d}, VPU_{150sat}$
2	$k_0, G_f, w_c, d_u, n, \rho, VPU_{150d}$
3	$k_0, G_f, w_c, d_u, n, \rho, VPU_{150sat}$
4	k_0, n, ρ, VPU_{150d}
5	$k_0, n, \rho, VPU_{150sat}$
6	k_0, n, VPU_{150d}
7	k_0, n, VPU_{150sat}
8	d_u, n, ρ, VPU_{150d}
9	$d_u, n, \rho, VPU_{150sat}$
10	d_u, ρ, VPU_{150d}
11	d_u, ρ, VPU_{150sat}
12	d_u, n, VPU_{150d}
13	d_u, n, VPU_{150sat}
14	n, ρ, VPU_{150d}
15	n, ρ, VPU_{150sat}

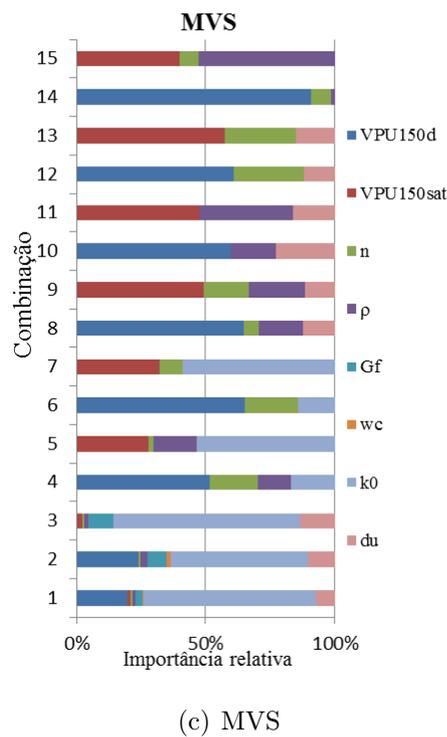
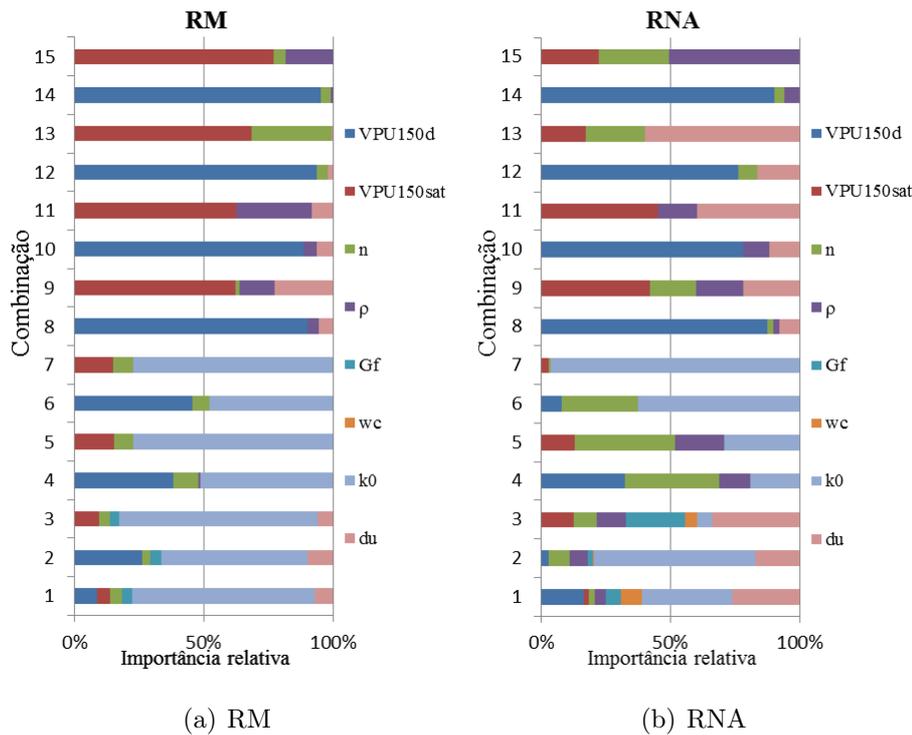


Figura 5.8: Importância relativa (%) das variáveis na previsão para f_t nos modelos de DM (tração)

Os valores de importância relativa indicam que o parâmetro com mais peso na construção dos modelos de previsão é k_0 . No modelo RM este parâmetro apresenta-se como o mais importante ao longo das sete combinações onde é considerado. O valor mais alto de importância é-lhe atribuído na combinação 5 com 77.15% e o mais baixo, com 47.70%, na combinação 6. No modelo RNA, nas sete primeiras combinações, o parâmetro k_0 tem

maior peso em quatro, com n a figurar nas combinações 4 e 5 como o parâmetro mais importante, sendo que na combinação 3 a maior importância é atribuída a d_u . Por sua vez, no modelo MVS k_0 afigura-se como o parâmetro mais importante em cinco combinações, a ser suplantado apenas por VPU_{150d} nas combinações 4 e 6.

Porém, como k_0 é um parâmetro de difícil obtenção a partir da combinação 7 deixou de ser considerado, em prol do objetivo principal deste estudo que pretende construir os melhores modelos de previsão possíveis baseados, sobretudo, em parâmetros de fácil obtenção. Da combinação 7 para a frente os parâmetros com mais importância na construção dos modelos são relativos à VPU .

Nas combinações 14 e 15, onde só são considerados a n , ρ e os valores de VPU , os parâmetros mais importantes são as VPU , com a exceção da combinação 15 nos modelos RNA e MVS em que a variável mais importante é o ρ .

Da análise do comportamento dos modelos através das métricas globais (Tabela 5.19, 5.20 e 5.21) é possível identificar o modelo MVS como o melhor, com valores de DAM e REQM inferiores e valores de COR superiores aos restantes modelos, em treze das combinações. Por outro lado, o modelo RM apresenta-se como o pior em outras treze combinações.

Tabela 5.19: Métricas globais para todas as combinação no modelo MR (f_t : tração)

Combinação	DAM	REQM	COR
1	0.208 ± 0.005	0.270 ± 0.009	0.978 ± 0.001
2	0.217 ± 0.003	0.279 ± 0.005	0.976 ± 0.001
3	0.215 ± 0.004	0.277 ± 0.007	0.976 ± 0.001
4	0.228 ± 0.004	0.301 ± 0.006	0.972 ± 0.001
5	0.221 ± 0.002	0.290 ± 0.003	0.974 ± 0.001
6	0.228 ± 0.005	0.301 ± 0.007	0.972 ± 0.001
7	0.220 ± 0.003	0.290 ± 0.003	0.974 ± 0.001
8	0.248 ± 0.003	0.343 ± 0.007	0.964 ± 0.001
9	0.331 ± 0.003	0.426 ± 0.005	0.943 ± 0.001
10	0.245 ± 0.004	0.338 ± 0.007	0.965 ± 0.002
11	0.329 ± 0.004	0.423 ± 0.005	0.944 ± 0.001
12	0.241 ± 0.003	0.347 ± 0.004	0.963 ± 0.001
13	0.331 ± 0.003	0.464 ± 0.006	0.932 ± 0.002
14	0.252 ± 0.002	0.353 ± 0.004	0.962 ± 0.001
15	0.328 ± 0.004	0.436 ± 0.007	0.940 ± 0.002

Tabela 5.20: Métricas globais para todas as combinações no modelo RNA (f_t : tração)

Combinação	DAM	REQM	COR
1	0.193 ± 0.016	0.265 ± 0.019	0.979 ± 0.003
2	0.186 ± 0.009	0.269 ± 0.014	0.978 ± 0.002
3	0.207 ± 0.019	0.291 ± 0.019	0.974 ± 0.003
4	0.183 ± 0.023	0.269 ± 0.042	0.978 ± 0.007
5	0.195 ± 0.019	0.273 ± 0.026	0.978 ± 0.004
6	0.181 ± 0.010	0.271 ± 0.021	0.978 ± 0.003
7	0.191 ± 0.015	0.271 ± 0.024	0.978 ± 0.004
8	0.220 ± 0.024	0.321 ± 0.030	0.968 ± 0.006
9	0.262 ± 0.024	0.375 ± 0.038	0.957 ± 0.009
10	0.220 ± 0.018	0.332 ± 0.036	0.966 ± 0.007
11	0.258 ± 0.016	0.371 ± 0.035	0.958 ± 0.008
12	0.251 ± 0.014	0.382 ± 0.075	0.955 ± 0.017
13	0.273 ± 0.025	0.383 ± 0.033	0.955 ± 0.008
14	0.228 ± 0.022	0.342 ± 0.040	0.964 ± 0.009
15	0.269 ± 0.028	0.394 ± 0.049	0.953 ± 0.011

Tabela 5.21: Métricas globais para todas as combinações no modelo MVS (f_t : tração)

Combinação	DAM	REQM	COR
1	0.166 ± 0.012	0.253 ± 0.026	0.981 ± 0.004
2	0.165 ± 0.007	0.256 ± 0.017	0.980 ± 0.003
3	0.170 ± 0.012	0.256 ± 0.035	0.980 ± 0.006
4	0.172 ± 0.015	0.263 ± 0.026	0.979 ± 0.004
5	0.179 ± 0.007	0.251 ± 0.013	0.981 ± 0.002
6	0.164 ± 0.018	0.258 ± 0.047	0.980 ± 0.007
7	0.171 ± 0.009	0.245 ± 0.020	0.982 ± 0.003
8	0.200 ± 0.013	0.312 ± 0.023	0.970 ± 0.005
9	0.243 ± 0.016	0.349 ± 0.032	0.962 ± 0.007
10	0.201 ± 0.014	0.311 ± 0.025	0.970 ± 0.005
11	0.236 ± 0.010	0.340 ± 0.015	0.964 ± 0.003
12	0.240 ± 0.015	0.374 ± 0.035	0.956 ± 0.009
13	0.268 ± 0.010	0.385 ± 0.015	0.954 ± 0.004
14	0.203 ± 0.014	0.320 ± 0.023	0.969 ± 0.005
15	0.267 ± 0.020	0.384 ± 0.028	0.954 ± 0.007

Na tabela 5.22 são apresentados os valores de a , b e R^2 obtidos após os modelos estarem construídos. São apresentados para cada modelo e combinação, dois valores de R^2 resultando da comparação de todos os valores de entrada medidos e estimados e da comparação entre os valores medidos e estimados para a fase de teste.

Numa análise global, grande parte dos modelos apresenta uma boa capacidade de extrapolação para dados não presentes na base de dados utilizada no seu desenvolvimento, traduzida pelos elevados valores de R^2 do conjunto de teste.

Os piores valores de R^2 são observados no modelo MVS. Na combinação 15, este modelo, apresenta um R^2 bastante baixo ($R^2=0.15$) entre os valores medidos e estimados presentes na base de dados de teste. O mesmo acontece no modelo RNA com um valor de R^2 de apenas 0.48.

Curiosamente, o modelo RM, que pela análise das métricas globais era o mais fraco, é aquele que apresenta o valor mais elevado de R^2 para a combinação 15, para o conjunto de teste. Neste modelo foram obtidos valores de R^2 relativamente elevados na combinação 14 e 15, onde só são considerados parâmetros de fácil obtenção.

Por sua vez, o modelo RNA e MVS apresentam igualmente valores elevados de R^2 na combinação 14, nomeadamente de 0.86 e 0.84, respetivamente.

As Figuras 5.9 e 5.10 ilustram a comparação entre os valores estimados e medidos pelos três modelos durante a fase de teste para as combinações 14 e 15, respetivamente.

Tabela 5.22: Declive da linha de tendência (a), ordenada na origem (b) e R^2 os entre os valores medidos e estimados de f_t (tração)

Combinação	RM						RNA						MVS					
	Todos			Teste			Todos			Teste			Todos			Teste		
	a	b	R^2															
1	0.76	0.73	0.90	0.53	1.72	0.91	0.86	0.42	0.95	0.72	1.08	0.91	0.75	0.70	0.90	0.55	1.52	0.90
2	0.77	0.70	0.91	0.55	1.64	0.93	0.81	0.67	0.90	0.54	2.06	0.92	0.76	0.72	0.89	0.54	1.69	0.88
3	0.75	0.74	0.89	0.53	1.70	0.89	0.79	0.66	0.88	0.55	1.79	0.76	0.75	0.67	0.89	0.56	1.37	0.89
4	0.73	0.79	0.88	0.51	1.79	0.92	0.8	0.56	0.83	0.64	1.17	0.64	0.59	1.17	0.69	0.23	2.64	0.43
5	0.72	0.82	0.86	0.48	1.88	0.84	0.57	1.13	0.67	0.25	2.56	0.48	0.61	1.07	0.75	0.30	2.27	0.64
6	0.74	0.78	0.89	0.51	1.85	0.92	0.74	0.63	0.86	0.61	0.97	0.78	0.70	0.88	0.84	0.42	2.10	0.78
7	0.72	0.82	0.86	0.48	1.87	0.84	0.72	0.73	0.87	0.54	1.40	0.87	0.73	0.76	0.88	0.52	1.59	0.87
8	0.74	0.86	0.85	0.45	2.31	0.89	0.74	0.85	0.83	0.43	2.39	0.74	0.62	1.09	0.69	0.29	2.42	0.38
9	0.66	1.14	0.75	0.30	2.93	0.73	0.97	0.37	0.83	0.74	1.89	0.71	0.57	1.13	0.64	0.30	2.05	0.36
10	0.74	0.86	0.85	0.46	2.31	0.90	0.74	0.82	0.83	0.46	2.16	0.70	0.78	0.77	0.87	0.50	2.10	0.87
11	0.69	1.09	0.75	0.32	3.02	0.73	0.84	0.57	0.88	0.65	1.63	0.80	0.58	1.15	0.66	0.28	2.31	0.37
12	0.71	0.91	0.84	0.43	2.27	0.87	0.76	0.78	0.84	0.49	2.11	0.73	0.72	0.82	0.85	0.50	1.74	0.81
13	0.60	1.26	0.70	0.24	3.01	0.61	0.71	0.52	0.59	0.74	0.27	0.50	0.51	1.47	0.71	0.21	2.89	0.68
14	0.72	0.90	0.84	0.43	2.36	0.87	0.90	0.50	0.88	0.67	1.95	0.86	0.77	0.89	0.83	0.43	2.70	0.84
15	0.66	1.15	0.73	0.29	3.11	0.66	0.70	0.94	0.76	0.38	2.47	0.48	0.47	1.33	0.49	0.16	2.32	0.15

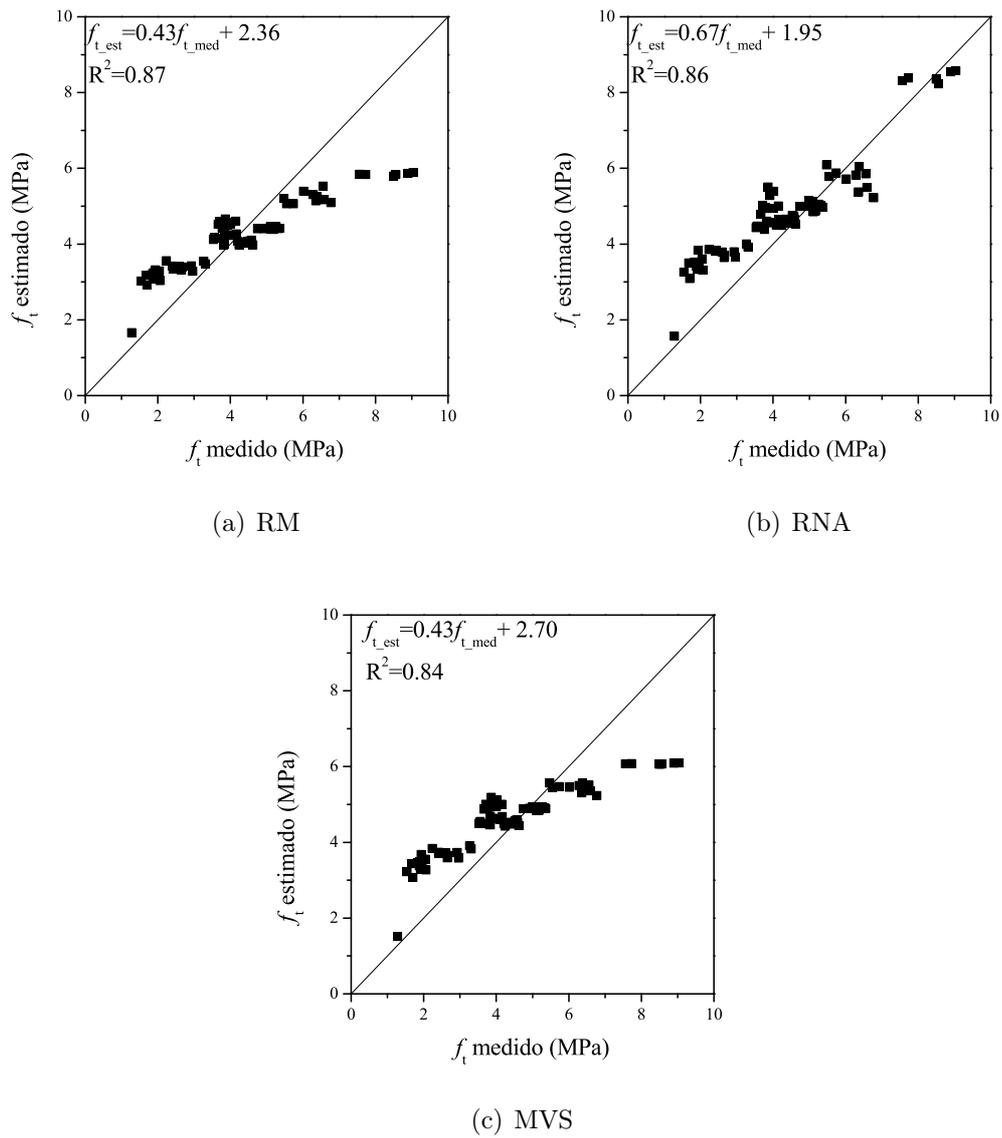


Figura 5.9: Relação entre os valores de teste f_t medidos e estimados para a combinação 14 (tração)

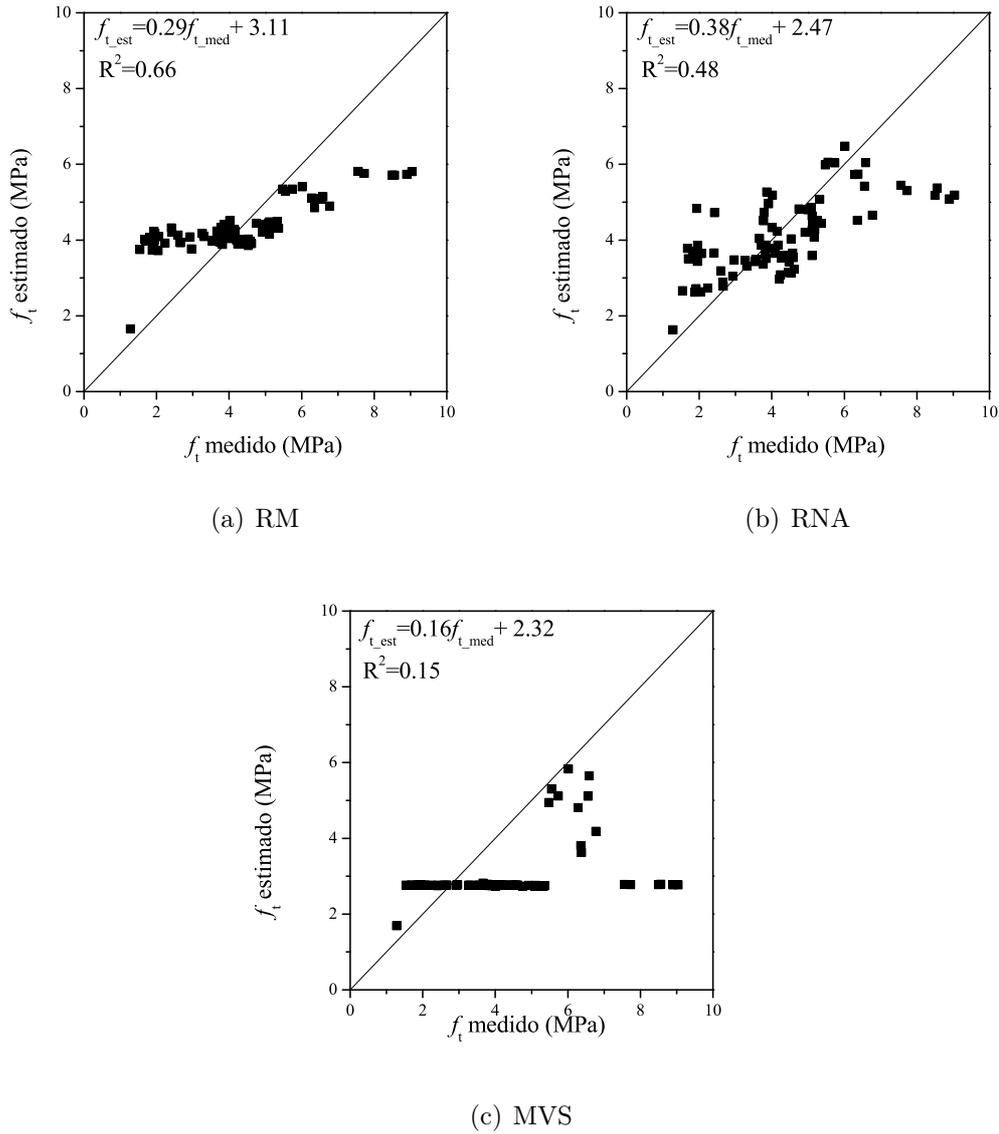


Figura 5.10: Relação entre os valores de teste f_t medidos e estimados para a combinação 15 (tração)

Para as combinações com quatro ou menos parâmetros de entrada foram obtidas as seguintes equações de regressão:

$$f_{t(comb4)} = 9.141 \times 10^{-4}VP U_{150d} + 0.063n + 0.006\rho + 2.372 \times 10^{-4}k_0 - 14.731 \quad (5.24)$$

$$f_{t(comb5)} = 3.482 \times 10^{-4}VP U_{150sat} + 0.010n + 0.006\rho + 3.498 \times 10^{-4}k_0 - 15.560 \quad (5.25)$$

$$f_{t(comb6)} = 8.561 \times 10^{-4}VP U_{150d} - 0.045n + 2.545 \times 10^{-4}k_0 + 0.200 \quad (5.26)$$

$$f_{t(comb7)} = 2.402 \times 10^{-4}VP U_{150sat} - 0.113n + 3.743 \times 10^{-4}k_0 + 1.462 \quad (5.27)$$

$$f_{t(comb8)} = 0.002VP U_{150d} + 0.337n + 0.014\rho - 10.495d_u - 36.717 \quad (5.28)$$

$$f_{t(comb9)} = 0.001VP U_{150sat} + 0.433n + 0.023\rho - 16.550d_u - 62.215 \quad (5.29)$$

$$f_{t(comb10)} = 0.002VP U_{150d} + 0.003\rho - 3.618d_u - 9.770 \quad (5.30)$$

$$f_{t(comb11)} = 0.001VP U_{150sat} + 0.010\rho - 8.458d_u - 27.754 \quad (5.31)$$

$$f_{t(comb12)} = 0.002VP U_{150d} + 0.025n - 5.741d_u - 1.0135 \quad (5.32)$$

$$f_{t(comb13)} = 0.001VP U_{150sat} - 0.129n - 10.953d_u + 0.463 \quad (5.33)$$

$$f_{t(comb14)} = 0.002VP U_{150d} + 0.146n + 0.009\rho - 26.382 \quad (5.34)$$

$$f_{t(comb15)} = 0.001VP U_{150sat} + 0.147n + 0.020\rho - 52.163 \quad (5.35)$$

5.4.3 Modelos de previsão: E

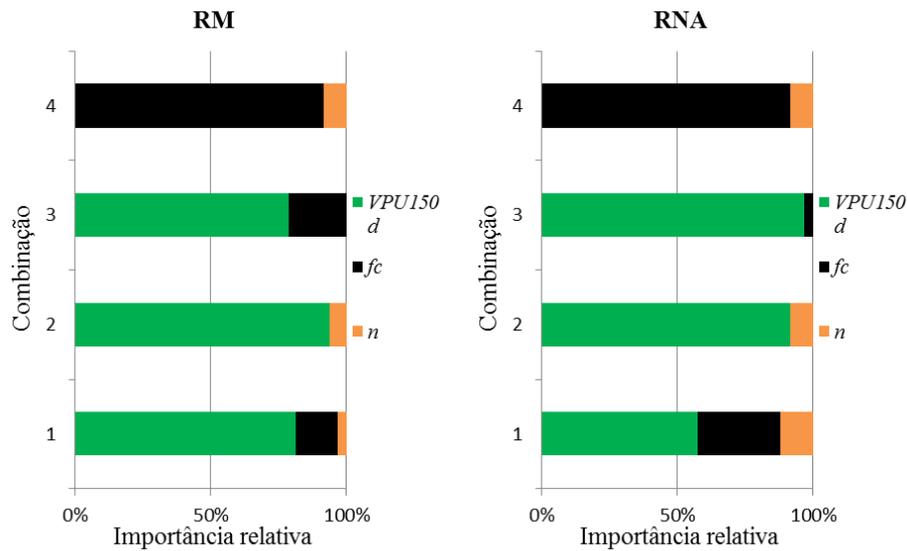
Previsão de E : amostras secas

As combinações estabelecidas para a construção dos modelos de previsão de DM, a partir da base de dados de amostras secas, encontram-se apresentadas na Tabela 5.23. A construção das diferentes combinações resultou da consideração da forte relação que E tem com f_c e $VP U$, sendo também considerada, ao longo das combinações, n por razão de ser um parâmetro de fácil aferição. Uma vez que já foi comprovado anteriormente que a $VP U$ relativa a transdutores de 150 kHz e 54 kHz é praticamente a mesma, nestes modelos só foi considerada a $VP U$ relativa a transdutores de 150 kHz.

A importância relativa de cada variável dependente na construção dos modelos é ilustrada na Figura 5.11, e os seus valores percentuais podem ser consultados nas Tabelas X, XI e XII presentes na secção de Anexos.

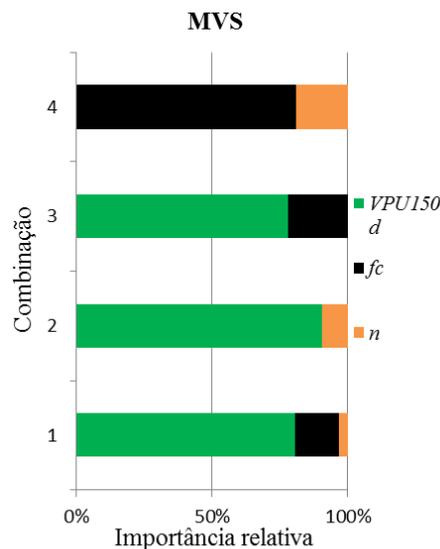
Tabela 5.23: Combinações de parâmetros de entrada para a previsão de E (amostras secas)

Combinação	Parâmetros de entrada
1	VPU_{150d}, f_c, n
2	VPU_{150d}, n
3	VPU_{150d}, f_c
4	f_c, n



(a) RM

(b) RNA



(c) MVS

Figura 5.11: Importância relativa (%) das variáveis de previsão para E nos modelos de DM (amostras de secas)

A variável n , quando combinada com f_c e/ou VPU_{150d} , assume um peso bastante reduzido

na construção dos modelos de DM. O valor mais alto de importância relativa que lhe foi atribuída é de apenas 19.25%, na combinação 4 referente ao modelo MVS.

Ao longo das três combinações onde a VPU_{150d} é considerada (combinações 1, 2 e 3) assume-se como o parâmetro mais importante na construção dos três modelos, sendo que o valor percentual mais baixo que lhe foi atribuído é de 57.27%, verificado na combinação 1 relativa ao modelo RNA.

Por outro lado, f_c surpreende pelas baixas importâncias que lhe são atribuídas pelos três modelos, apresentando-se apenas como a variável mais importante na combinação 4, onde é combinada com n . Para esta combinação os modelos que lhe atribuem maior importância são o modelo RM e RNA com uma percentagem igual de 91.56%.

Da análise de desempenho dos modelos com base nas métricas globais (Tabela 5.24, 5.25 e 5.26) o modelo MVS apresentou-se como sendo o melhor em duas das combinações, nomeadamente na combinação 1 e 3, sendo registado nas restantes combinações melhor desempenho no modelo RM.

Tabela 5.24: Métricas globais para todas as combinações no modelo RM (E : amostras secas)

Combinação	DAM	REQM	COR
1	4393.128 ± 308.149	5610.241 ± 387.636	0.951 ± 0.007
2	4354.127 ± 170.184	5742.206 ± 276.317	0.949 ± 0.005
3	4429.782 ± 283.759	5678.974 ± 365.847	0.950 ± 0.006
4	6325.953 ± 271.195	8014.331 ± 274.764	0.898 ± 0.007

Tabela 5.25: Métricas globais para todas as combinações no modelo RNA (E : amostras secas)

Combinação	DAM	REQM	COR
1	4993.554 ± 1966.472	7035.805 ± 3992.364	0.927 ± 0.077
2	4476.140 ± 1596.997	6638.559 ± 3824.029	0.934 ± 0.079
3	4098.409 ± 1199.798	6297.544 ± 3638.317	0.941 ± 0.065
4	7078.676 ± 1232.156	9809.448 ± 2314.153	0.849 ± 0.069

Tabela 5.26: Métricas globais para todas as combinações no modelo MVS (E : amostras secas)

Combinação	DAM	REQM	COR
1	3786.227 ± 951.125	5466.133 ± 1105.800	0.954 ± 0.018
2	4968.005 ± 607.048	6632.707 ± 961.233	0.931 ± 0.022
3	2677.615 ± 302.266	3401.162 ± 428.316	0.983 ± 0.003
4	6757.163 ± 1129.571	9795.104 ± 1362.355	0.845 ± 0.043

Na tabela 5.27 encontram-se os valores de a , b e de R^2 obtidos por comparação entre os valores medidos e estimados de E , englobando todos os dados e apenas os valores da base de dados de teste. Nesta volta-se a verificar uma tendência generalizada dos valores de R^2 crescerem entre a fase em que são considerados os valores de treino e de teste e a fase que em são considerados apenas valores de teste.

Tabela 5.27: Declive da linha de tendência (a), ordenada na origem (b) e R^2 entre os valores medidos e estimados de E (amostras secas)

Combinação	RM						RNA						MVS					
	Todos			Teste			Todos			Teste			Todos			Teste		
	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
1	0.97	565.97	0.95	1.01	-1564.30	0.98	0.99	-672.42	0.97	0.93	-836.89	0.93	0.92	3016.10	0.96	0.91	3714.20	0.96
2	0.93	1676.70	0.93	0.91	668.37	0.96	0.99	102.02	0.98	1.02	-967.54	0.99	0.88	3906.30	0.95	0.87	3895.10	0.94
3	0.93	2453.70	0.95	0.94	2088.90	0.99	.96	2040.90	0.97	0.97	3333.10	0.96	0.91	3472.20	0.96	0.79	7597.40	0.91
4	1.01	1530.40	0.90	1.25	-9773.10	0.98	1.01	-1530.40	0.90	1.25	-9773.10	0.98	0.90	2403.60	0.91	1.02	-519.58	0.98

No modelo RM esse aumento é observável em todas as combinações, enquanto no modelo RNA o aumento é verificado em duas combinações, nomeadamente na 2 e 4. No modelo MVS apenas se verifica na combinação 4.

Contudo, os valores de a e b sofrem alterações consideráveis, o que faz com que a análise destes dois indicadores resulte numa melhor aferição acerca do desempenho do modelo.

Pela leitura dos valores dos três indicadores presentes na Tabela 5.27 é possível estabelecer para cada uma das quatro combinações quais os modelos que apresentam melhor desempenho para o conjunto de teste.

Assim, na combinação 1 o melhor desempenho é verificado pelo modelos RM e RNA. O modelo RM apresenta um valor superior de R^2 comparativamente a RNA, sendo que em termos de valor absoluto de b , o modelo RNA devolve um valor consideravelmente mais baixo (Figura 5.12).

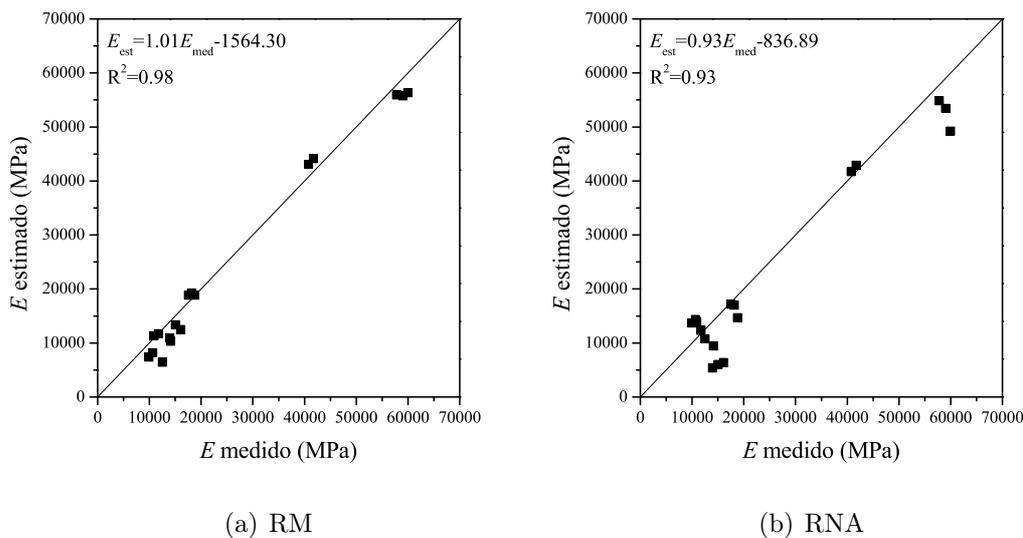


Figura 5.12: Relação entre os valores de teste E medidos e estimados pelos modelos para a combinação 1 (amostras secas)

Na combinação 2 o destaque vai para o modelo RNA, que apesar de em termos absolutos apresentar um valor de b superior ao modelo RM, em termos de a e R^2 apresenta-se como o melhor modelo para esta combinação (Figura 5.13).

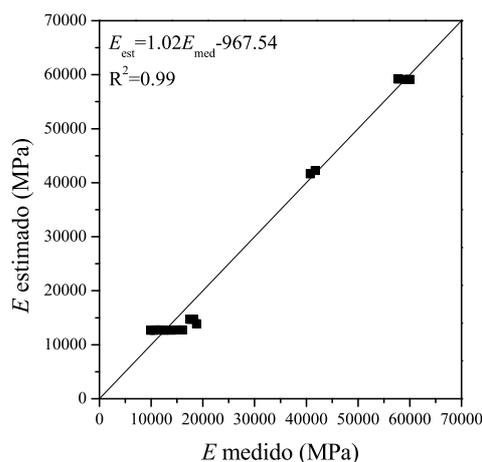


Figura 5.13: Relação entre os valores de teste E medidos e estimados pelo modelo RNA para a combinação 2 (amostras secas)

Na combinação 3 o modelo RM apresenta-se como aquele onde se verifica uma melhor relação entre valores medidos e estimados (Figura 5.14). No entanto, deve ser realçado o valor elevado de b verificado em todos os modelos para esta combinação.

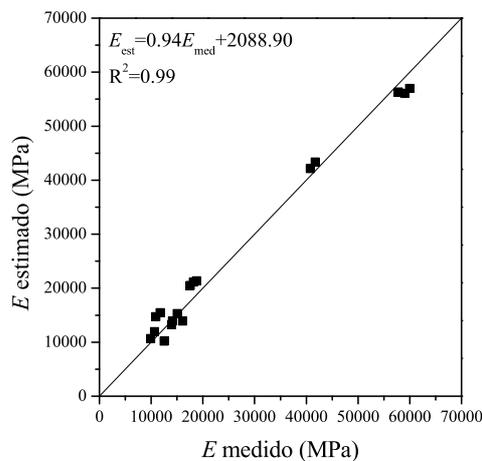


Figura 5.14: Relação entre os valores de teste E medidos e estimados pelo modelo RM para a combinação 3 (amostras secas)

Por último, na combinação 4 o modelo MVS apresenta-se pela primeira vez como o modelo com melhor capacidade de extrapolação ao apresentar um valor de R^2 de 0.98, que é também verificado nos restantes modelos, mas que no entanto apresenta o valor de a mais próximo de 1 e menor valor absoluto de b (Figura 5.15).

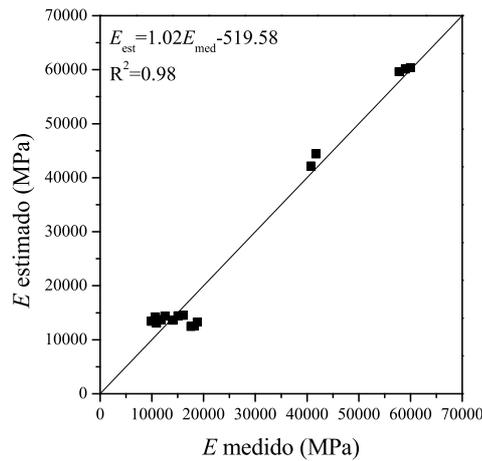


Figura 5.15: Relação entre os valores de teste E medidos e estimados pelo modelo MVS para a combinação 4 (amostras secas)

Nota ainda para o facto de, como é possível observar nas figuras apresentadas acima, no conjunto de teste não existirem valores de E entre os 25 000 e os 40 000 MPa, o que se traduz numa limitação, uma vez que assim não é possível aferir acerca do comportamento dos modelos na previsão de valores dentro de desse intervalo.

As equações de regressão para cada uma das combinações construídas para a previsão de E com base nos valores que fazem parte da base de dados de amostras secas são as seguintes:

$$E_{(comb1)} = 11.818VPU_{150d} + 168.028f_c + 671.588n - 16102.109 \quad (5.36)$$

$$E_{(comb2)} = 15.880VPU_{150d} - 2178.769n - 2178.769 \quad (5.37)$$

$$E_{(comb3)} = 11.847VPU_{150d} + 199.749f_c - 21110.685, \quad (5.38)$$

$$E_{(comb4)} = 382.638f_c - 745.715n + 828.187 \quad (5.39)$$

Previsão de E : valores médios

Similarmente ao realizado na previsão de E em função das variáveis independentes presentes na base de dados de amostras secas, na construção das combinações presentes nesta secção (Tabela 5.28) foram consideradas sobretudo variáveis de fácil aferição, com a exceção de f_c e f_t . Destaque para a inclusão dos valores de ressalto do martelo de Schmidt (N) e das densidades, que anteriormente não faziam parte dos modelos de previsão de E .

Tabela 5.28: Combinações de parâmetros de entrada para a previsão de E (valores médios)

Combinação	Parâmetros de entrada
1	n, ρ_d, VPU_{150d}
2	$n, \rho_{sat}, VPU_{150sat}$
3	n, VPU_{150d}
4	n, VPU_{150sat}
5	n, N
6	$\rho_{sat}, VPU_{150d}, f_c$
7	$\rho_{sat}, VPU_{150sat}, f_c$
8	ρ_d, VPU_{150d}, f_t
9	$\rho_{sat}, VPU_{150sat}, f_t$
10	ρ_{sat}, VPU_{150d}
11	ρ_{sat}, VPU_{150sat}
12	VPU_{150sat}, f_c
13	VPU_{150d}, f_c
14	VPU_{150d}, f_t
15	VPU_{150sat}, f_t

Da análise de sensibilidade ilustrada na Figura 5.16 e apresentada nas Tabelas XIII, XIV e XV da secção de Anexos, são observados alguns valores de importância relativa no mínimo curiosos ao longo das combinações.

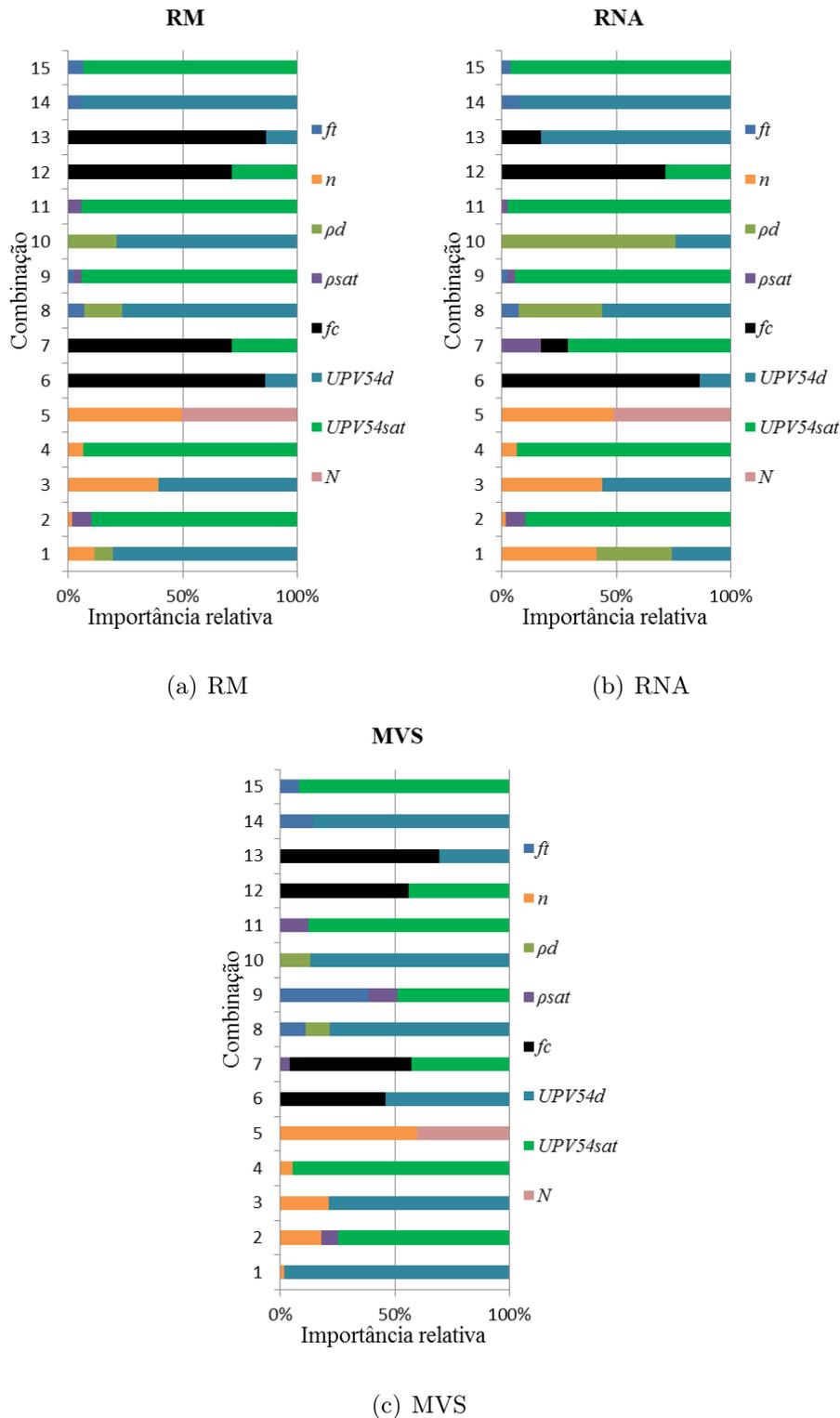


Figura 5.16: Importância relativa (%) das variáveis para previsão para previsão de E nos modelos de DM (valores médios)

Na combinação 1, o modelo RNA marca a diferença ao atribuir maior importância relativa a n (41.33%), quando na mesma combinação os modelos RM e MVS atribuem maior importância a VPV_{150d} com percentagem de 80.64% e 98.18%, respetivamente. Observando a importância atribuída a n na secção anterior a percentagem que esta apresenta

na combinação 1 do modelo RNA é ainda mais inusitada.

Na combinação 2, com um conjunto de variáveis semelhantes mas em amostras saturadas, VPU é considerada a variável de maior peso na construção dos três modelos, com a importância relativa mais baixa de 75.03% a ser verificada no modelo MVS.

Nas combinações 3 e 4, com a eliminação da variável ρ , os valores de VPU voltam a assumir-se como os mais importantes na construção dos modelos, com a particularidade de na combinação 3 a variável n alcançar nos modelos RM e RNA percentagens de 39.43% e 43.99%, respetivamente. Na combinação 4 a importância de n cai para um valor máximo de apenas 6.68%, observado no modelo RM e RNA.

Nas combinações onde é considerada f_c , esta assume-se como a variável independente mais importante, com a exceção da combinação 13 relativa ao modelo RNA.

Nota ainda para o facto de f_t não ser considerada como o parâmetro com mais peso em nenhuma das combinações onde está integrada. O valor mais elevado de importância relativa que lhe é atribuído ao longo das combinações é verificado na combinação 9 do modelo MVS com 38.57%

Dos três modelos de DM o que apresenta pior desempenho, em termos de métricas globais (Tabela 5.29, 5.30 e 5.31) é o RNA, com valores mais elevados de DAM e REQM e mais baixos de COR em todas as combinações. No sentido contrário, o modelo RM surge como o melhor modelo em 9 das combinações, contra apenas 6 do modelo MVS.

Tabela 5.29: Métricas globais para todas as combinações no modelo RM (E : valores médios)

Combinação	DAM	REQM	COR
1	7347.513 \pm 2831.480	9533.390 \pm 3285.156	0.879 \pm 0.076
2	5186.425 \pm 1381.412	6862.520 \pm 1919.223	0.936 \pm 0.037
3	6557.695 \pm 1579.499	8315.868 \pm 1546.248	0.909 \pm 0.021
4	4773.470 \pm 1540.158	6555.030 \pm 1522.428	0.944 \pm 0.017
5	9916.772 \pm 2836.028	11756.911 \pm 3470.754	0.828 \pm 0.069
6	4030.427 \pm 847.138	5095.486 \pm 1290.524	0.966 \pm 0.012
7	4094.293 \pm 606.303	5010.844 \pm 513.384	0.967 \pm 0.005
8	8143.513 \pm 3507.276	10863.787 \pm 4733.097	0.840 \pm 0.144
9	4653.410 \pm 1177.036	6370.333 \pm 1731.298	0.944 \pm 0.033
10	5860.736 \pm 1067.855	7995.830 \pm 930.602	0.913 \pm 0.015
11	4826.030 \pm 2003.463	6341.038 \pm 1745.428	0.947 \pm 0.021
12	3774.630 \pm 715.576	4699.288 \pm 981.222	0.971 \pm 0.010
13	3634.437 \pm 748.303	4589.399 \pm 761.831	0.972 \pm 0.009
14	7627.963 \pm 1333.075	10173.695 \pm 1244.310	0.857 \pm 0.031
15	4928.085 \pm 2217.335	6712.934 \pm 2586.050	0.937 \pm 0.051

Tabela 5.30: Métricas globais para todas as combinações no modelo RNA (E : valores médios)

Combinação	DAM	REQM	COR
1	8826.661 \pm 4993.659	12589.637 \pm 11684.896	0.836 \pm 0.190
2	7219.889 \pm 4278.058	10114.841 \pm 7893.100	0.891 \pm 0.096
3	8111.366 \pm 7779.836	10678.561 \pm 10009.290	0.850 \pm 0.214
4	7001.829 \pm 2985.871	10762.507 \pm 7446.163	0.872 \pm 0.151
5	12297.228 \pm 10314.932	16451.739 \pm 16232.722	0.733 \pm 0.353
6	6448.692 \pm 3292.030	9542.057 \pm 8020.943	0.887 \pm 0.177
7	5869.241 \pm 3331.090	7773.532 \pm 5847.329	0.928 \pm 0.083
8	10062.119 \pm 4394.695	14079.674 \pm 6427.317	0.7849 \pm 0.125
9	6581.716 \pm 3688.590	8775.470 \pm 5524.772	0.888 \pm 0.136
10	7917.520 \pm 8307.271	10450.353 \pm 10639.038	0.869 \pm 0.152
11	5941.304 \pm 5515.426	8267.535 \pm 8460.542	0.914 \pm 0.134
12	5116.221 \pm 4286.767	7170.173 \pm 10498.732	0.943 \pm 0.113
13	5215.888 \pm 5136.472	8890.361 \pm 15189.951	0.916 \pm 0.181
14	12765.774 \pm 13031.123	19312.360 \pm 28212.156	0.734 \pm 0.192
15	8028.656 \pm 6404.488	13015.808 \pm 16568.528	0.781 \pm 0.447

Tabela 5.31: Métricas globais para todas as combinações no modelo MVS (E : valores médios)

Combinação	DAM	REQM	COR
1	6869.515 \pm 1723.105	9295.253 \pm 2307.622	0.880 \pm 0.07
2	5854.606 \pm 1832.605	7259.467 \pm 2227.737	0.929 \pm 0.046
3	6886.679 \pm 3305.196	8976.780 \pm 3653.020	0.884 \pm 0.113
4	5516.210 \pm 1743.827	7055.226 \pm 1770.635	0.931 \pm 0.036
5	6661.051 \pm 2017.866	8630.455 \pm 2093.939	0.895 \pm 0.051
6	4761.617 \pm 1830.933	6140.044 \pm 2321.976	0.950 \pm 0.046
7	4096.603 \pm 1223.862	4851.010 \pm 1220.288	0.970 \pm 0.017
8	6267.042 \pm 1097.722	8870.454 \pm 1661.219	0.900 \pm 0.050
9	5772.233 \pm 1911.414	7548.038 \pm 2335.545	0.928 \pm 0.062
10	6381.905 \pm 2451.473	9206.458 \pm 2451.473	0.883 \pm 0.086
11	4931.047 \pm 683.393	6203.480 \pm 897.654	0.949 \pm 0.014
12	3487.141 \pm 683.513	4195.951 \pm 812.212	0.977 \pm 0.010
13	3981.773 \pm 1148.209	5188.617 \pm 1437.340	0.965 \pm 0.019
14	7653.242 \pm 1685.504	10665.258 \pm 1557.385	0.842 \pm 0.052
15	5852.690 \pm 2212.768	7585.009 \pm 3070.993	0.921 \pm 0.071

Da avaliação dos modelos considerando todos os dados presentes na base de dados de valores médios (Tabela 5.32) são obtidos valores de R^2 bastante elevados, em vários casos próximos de 1.

Tabela 5.32: Declive da linha de tendência (a), ordenada na origem (b) e R^2 entre o valores medidos e estimados de E (valores médios)

Combinação	RM			RNA			MVS		
	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
1	0.91	3601.50	0.89	1.02	330.77	0.94	0.94	1841.70	0.94
2	0.94	2228.70	0.93	0.94	2228.90	0.93	0.82	6120.50	0.92
3	0.90	3743.00	0.89	0.98	397.80	0.98	0.94	1629.90	0.95
4	0.93	2486.70	0.93	0.93	2486.70	0.93	0.95	1307.30	0.95
5	0.79	7184.50	0.79	1.00	370.03	0.99	0.92	2348.30	0.94
6	0.96	1022.90	0.95	0.92	563.60	0.78	0.93	1417.20	0.98
7	0.96	967.38	0.96	1.00	-1.31	1.00	0.97	113.39	0.97
8	0.90	3771.30	0.88	1.06	815.82	0.71	0.92	2155.10	0.90
9	0.95	2188.20	0.93	0.95	2188.00	0.93	0.82	5485.50	0.91
10	0.90	3772.90	0.89	1.01	124.03	0.99	0.91	2518.40	0.90
11	0.94	2245.00	0.93	0.97	1132.20	0.97	0.92	2679.40	0.94
12	0.96	966.68	0.96	0.96	966.68	0.96	0.93	1422.40	0.97
13	0.96	1021.10	0.95	0.99	-49.61	1.00	0.9	2236.40	0.96
14	0.82	6687.50	0.80	1.06	808.15	0.75	0.88	2825.80	0.82
15	0.93	2517.50	0.93	1.00	365.85	0.98	0.91	3701.90	0.92

De forma similar aos resultados apresentados na previsão de f_c em termos de valores médios, os resultados apresentados devem ser considerados como otimistas por parte dos modelos, uma vez que nesta base de dados só foi deixado um valor para testar a desempenho final dos modelos. A título exemplificativo, na combinação 14 para o modelo RNA foi estabelecido um de valor de R^2 elevado de 0.75, mas analisando o resultado para o valor de teste estimado conclui-se que é bastante diferente do valor medido (Figura 5.17).

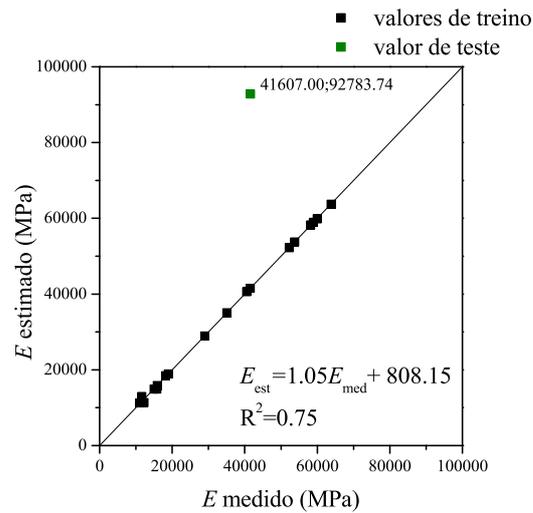
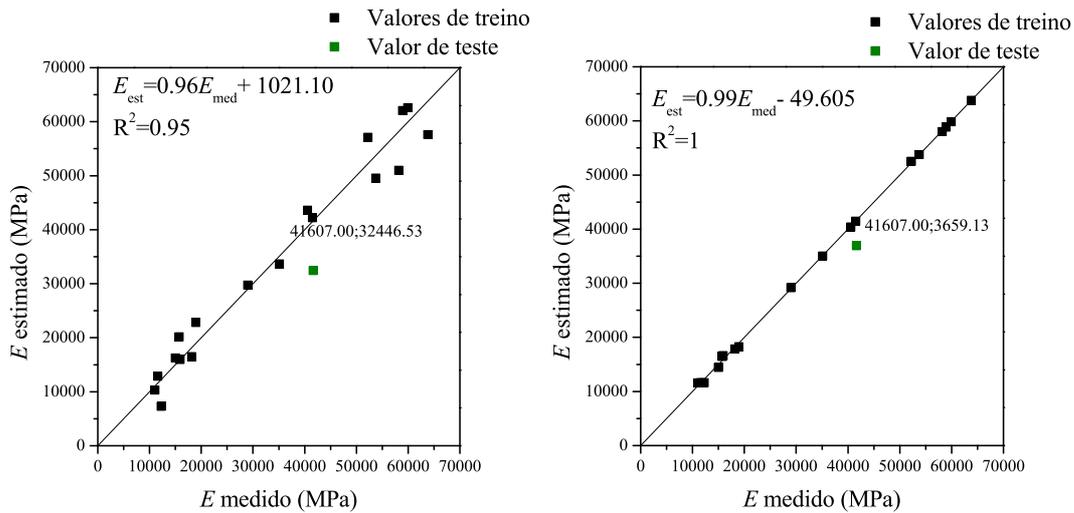


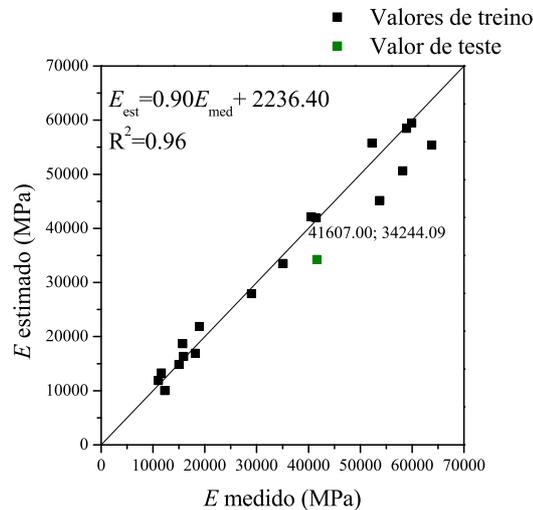
Figura 5.17: Relação entre todos os valores de E medidos e estimados pelo modelo RNA para a combinação 14 (valores médios)

Na Figura 5.18 são apresentados outros exemplos onde o valor estimado, que embora não se distancie da tendência dos valores de treino, apresenta diferenças consideráveis para o valor medido em laboratório.



(a) RM

(b) RNA



(c) MVS

Figura 5.18: Relação entre todos os valores E medidos e estimados pelos modelos para a combinação 13 (valores médios)

No entanto, existem casos em que a diferença entre o valor estimado e medido é bastante baixo. Um exemplo desses casos pode ser observado na combinação 7, onde o modelo RNA conseguiu estimar com bastante proximidade o valor de E (Figura 5.19).

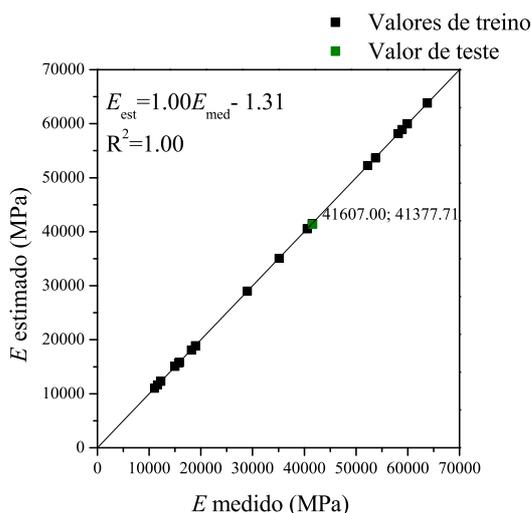


Figura 5.19: Relação entre todos os valores de E medidos e estimados pelo modelo RNA para a combinação 7 (valores médios)

No mesmo sentido do exemplo anterior destaca-se a previsão feita pelos modelos RM e RNA na combinação 5, onde considerando apenas duas variáveis independentes de fácil obtenção estimaram um valor bastante próximo do medido (Figura 5.20).

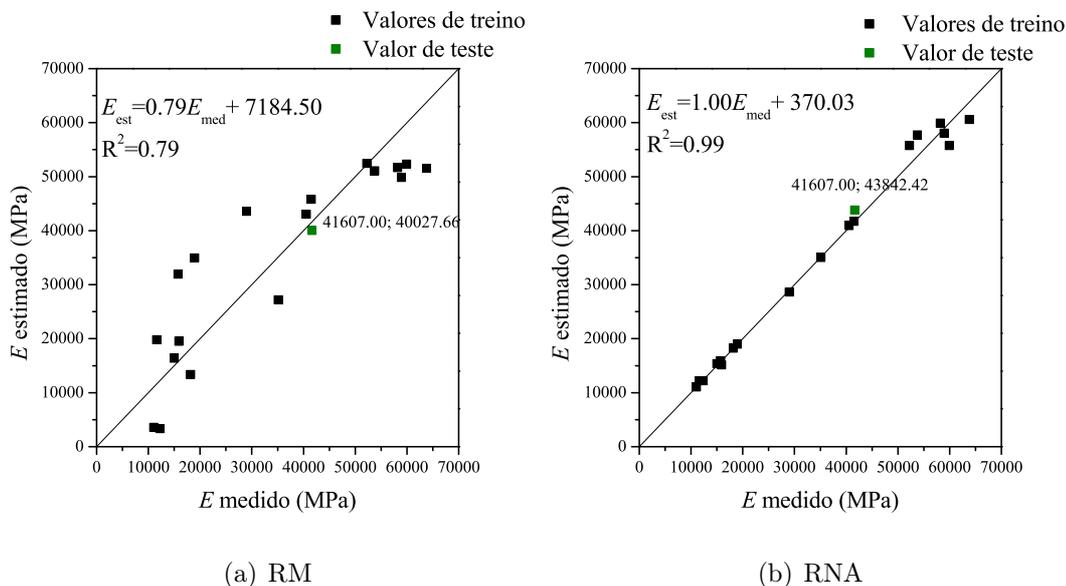


Figura 5.20: Relação entre todos os valores E medidos e estimados pelos modelos para a combinação 5 (valores médios)

Contudo, apesar dos valores de R^2 consideravelmente elevados obtidos praticamente para todos os modelos ao longo das quinze combinações e apesar de terem sido apresentados exemplos em que o valor estimado se aproxima bastante do medido (Figura 5.19 e 5.20), os modelos devem ser usados com cautela porque em alguns casos podem estimar valores muito diferentes dos reais.

As equações de regressão para cada uma das combinações relativas à previsão de E , construídas através da base de dados de valores médios são as seguintes:

$$E_{(comb1)} = -2574.392n + 42.427\rho_d + 12.395VPU_{150d} - 107082.031 \quad (5.40)$$

$$E_{(comb2)} = 388.757n + 85.320\rho_{sat} + 28.909VPU_{150sat} - 324884.581 \quad (5.41)$$

$$E_{(comb3)} = -3952.520n + 11.534VPU_{150d} + 9414.413 \quad (5.42)$$

$$E_{(comb4)} = -1591.880n + 26.619VPU_{150sat} - 85017.242 \quad (5.43)$$

$$E_{(comb5)} = -3909.711n + 2568.424N - 128981.637 \quad (5.44)$$

$$E_{(comb6)} = 265.740f_c + 25.459\rho_d + 7.823VPU_{150d} - 80581.430 \quad (5.45)$$

$$E_{(comb7)} = 201.819f_c + 23.580\rho_{sat} + 17.197VPU_{150sat} - 126042.645 \quad (5.46)$$

$$E_{(comb8)} = 620.268f_t + 107.729\rho_d + 13.414VPU_{150d} - 288967.493 \quad (5.47)$$

$$E_{(comb9)} = -932.143f_t + 63.809\rho_{sat} + 31.410VPU_{150sat} - 275684.076 \quad (5.48)$$

$$E_{(comb10)} = 106.234\rho_d + 14.697VPU_{150d} - 286887.668, \quad (5.49)$$

$$E_{(comb11)} = 73.666\rho_{sat} + 28.183VP U_{150sat} - 289858.050 \quad (5.50)$$

$$E_{(comb12)} = 218.114f_c + 17.371VP U_{150sat} - 66568.355 \quad (5.51)$$

$$E_{(comb13)} = 299.111f_c + 7.651VP U_{150d} - 17182.921 \quad (5.52)$$

$$E_{(comb14)} = -1655.494f_t + 22.723VP U_{150d} - 31042.642 \quad (5.53)$$

$$E_{(comb15)} = -2061.988f_t + 38.138VP U_{150sat} - 134735 \quad (5.54)$$

5.5 Validação dos Modelos

Na presente secção serão testadas as capacidades dos modelos construídos ao longo do presente capítulo, através da avaliação da sua capacidade na previsão dos valores de f_c e E que foram obtidos no Capítulo 4. Para além dos parâmetros estimados ao longo deste trabalho serão introduzidos na bases de dados de teste de amostras secas valores obtidos por Luzio (2010) no âmbito de uma tese para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Uma vez que no presente trabalho não foram obtidos parâmetros suficientes para testar todos os modelos e respetivas combinações, foram selecionadas um total de sete combinações relativas à base de dados de amostras secas, sendo que três destas são para a previsão de f_c e as restantes para a previsão de E .

Dos modelos construídos a partir da base de dados de valores médios foram selecionadas nove combinações, das quais quatro são relativas aos modelos construídos para a previsão de f_c e cinco para a previsão de E .

5.5.1 Validação: amostras secas

Ao conjunto de teste inicial foram adicionadas 85 novas entradas, sendo que 59 são relativas a parâmetros estimados neste trabalho para os granitos amarelos de Guimarães e Gonça e azuis de Guimarães e de Gondomar. As restantes entradas foram obtidas por Luzio (2010), sendo que estas são relativas a dois tipos de granitos diferentes, nomeadamente o granito azul de Gonça e amarelo de Mondim de Basto. Os dados obtidos por Luzio (2010) são apresentados nas Tabelas XVI e XVII da secção de Anexos.

Na Tabela 5.33 são apresentadas algumas estatísticas relativas aos dados que foram adicionados ao anterior conjunto de teste.

Tabela 5.33: Algumas estatísticas dos dados adicionados à base de dados de teste (amostras secas: validação)

Parâmetro	Mínimo	1ºQuartil	Mediana	Média	3ºQuartil	Máximo
f_c	35.67	60.78	82.85	87.53	99.96	197.09
E	6761.00	18730.00	31194.00	33887.00	39355.00	86124.00
n	0.28	0.86	1.01	1.17	1.34	2.47
VP_{150d}	2712.00	3797.00	4178.00	4200.00	4518.00	5762.00

Validação dos modelos de previsão para f_c : amostras secas

Os valores de a , b e R^2 relativos a cada um dos modelos e respetivas combinações testadas são apresentadas na Tabela 5.34.

Tabela 5.34: Valor da linha de tendência (a), valor da ordenada na origem (b) e R^2 entre os valores medidos e estimados de f_c para o conjunto de teste (amostras secas: validação)

Combinação	RM			RNA			MVS		
	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
7	0.61	51.49	0.58	0.61	51.49	0.58	0.27	67.54	0.41
8	0.46	56.00	0.32	0.48	56.02	0.35	0.35	63.29	0.42
12	0.66	66.36	0.49	2.22	23.73	0.55	0.07	99.04	0.01

Numa primeira leitura dos valores de a , b e R^2 apresentados na Tabela 5.34 é notória a perda de capacidade preditiva dos modelos para as três combinações aquando da introdução de novos valores na base de dados de teste. Uma vez que no Capítulo 4 são relatadas algumas imprecisões na obtenção de f_c seria expectável uma quebra da capacidade de extrapolação dos modelos. Aliada a essa baixa fiabilidade dos resultados apresentados no Capítulo 4, nos resultados obtidos por Luzio (2010) são também verificados valores

elevados de CV.

Porém, em sentido inverso à análise da capacidade de extrapolação dos modelos construídos a partir da base de dados de valores médios onde os resultados foram considerados otimistas, uma vez que os modelos foram avaliados pela capacidade de estimar apenas um valor de teste, agora na avaliação da capacidade dos modelos em extrapolar dados que inicialmente não faziam parte da sua construção deve ser tido em consideração:

1. A baixa fiabilidade de alguns valores;
2. O elevado número de entrada que foram adicionadas.

Com isto pretende-se realçar que os baixos valores de R^2 apresentados na Tabela 5.34 são influenciados por alguns casos pontuais, sendo que existem vários valores de f_c que foram estimados com uma proximidade bastante aceitável.

Na combinação 7 os modelos RM e RNA apresentam-se como os modelos com melhor capacidade de extrapolação, estimando valores de f_c bastante próximos entre si. Essa situação é verificada pelos valores apresentados na Tabela 5.34 com os valores de a , b e R^2 a serem praticamente iguais, com a diferença a ser só encontrada, na maioria dos casos, a partir da quarta casa decimal (Figura 5.21).

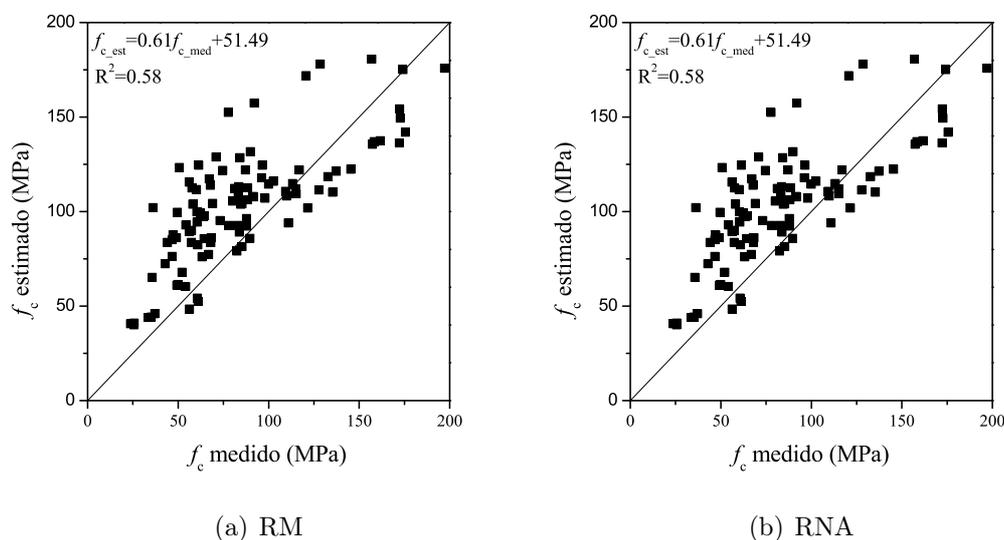


Figura 5.21: Relação entre os valores de teste f_c medidos e estimados pelos modelos para a combinação 7 (amostras secas: validação)

Pela análise da Figura 5.21 verifica-se uma tendência de sobrestimação dos valores de f_c por parte modelos. Contudo, deve ser considerada a hipótese de os valores determinados pelos ensaios serem mais baixos do que deveriam ser.

Se na combinação 7 foi verificada uma redução acentuada da capacidade de extrapolação por parte dos algoritmos de DM, esta volta a reduzir para a combinação 8 com a exceção do modelo MVS, onde se assistiu uma ligeira melhoria, assumindo-se, inclusive, como a melhor solução para esta combinação (Figura 5.22).

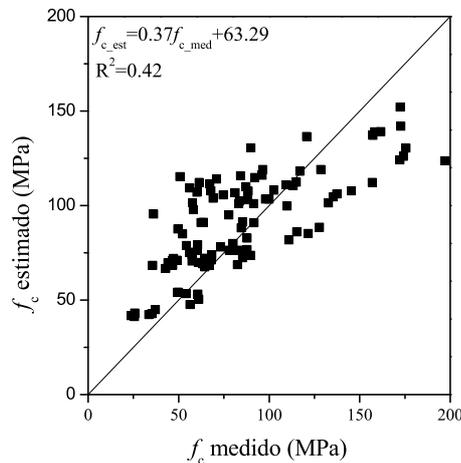


Figura 5.22: Relação entre os valores de teste f_c medidos e estimados pelo modelo MVS na combinação 8 (amostras secas: validação)

Para a combinação 12 o modelo que apresenta o valor mais alto de R^2 é o modelo RNA com um valor de 0.55 em oposição a 0.49 verificado no modelo RM. Contudo, para esta combinação, o valor de a , relativo ao modelo RNA, é bastante elevado. Este valor traduz a dificuldade do modelo em estimar valores acima dos 156.80 MPa, que foi o valor máximo usado na construção dos modelos com base nos valores presentes na base de dados de amostras secas. A Figura 5.23 ilustra essa dificuldade com os valores acima dos 156.80 MPa a serem extrapolados para valores superiores a 400 MPa.

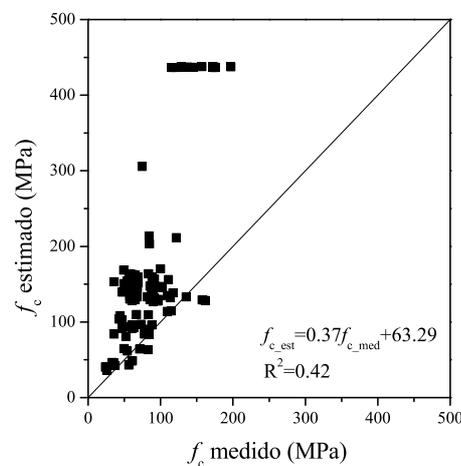


Figura 5.23: Relação entre os valores de teste f_c medidos e estimados pelo modelo RNA para a combinação 12 (amostras secas: validação)

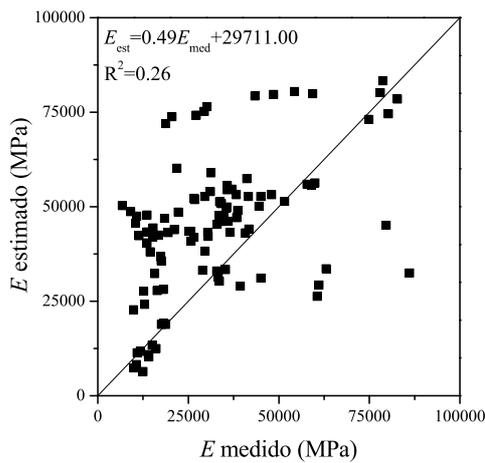
Validação dos modelos de previsão para E : amostras secas

Na Tabela 5.35 apresenta-se a resposta dos modelos na previsão de E . Se a estimativa de f_c por parte dos modelos se esperava baixa, o mesmo se podia esperar da resposta dos modelos em estimar E , uma vez que os valores de E apresentados no Capítulo 4 e os estimados por Luzio (2010) eram de baixa fiabilidade.

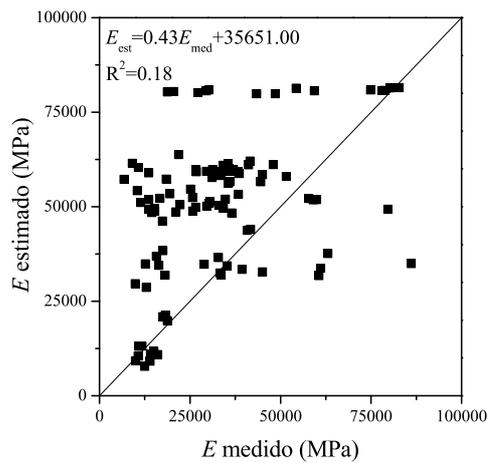
Tabela 5.35: Valor da linha de tendência (a), valor da ordenada na origem (b) e R^2 entre os valores medidos e estimados de E para o conjunto de teste (amostras secas: validação)

Combinação	RM			RNA			MVS		
	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
1	0.49	28711.00	0.26	0.30	29817.00	0.13	0.30	32268.00	0.19
2	0.43	35651.00	0.18	0.26	40926.00	0.10	0.29	37351.00	0.14
3	0.50	27795.00	0.27	0.20	18156.00	0.09	0.16	32245.00	0.01
4	0.55	15174.00	0.38	0.55	15174.00	0.38	0.46	17104.00	0.35

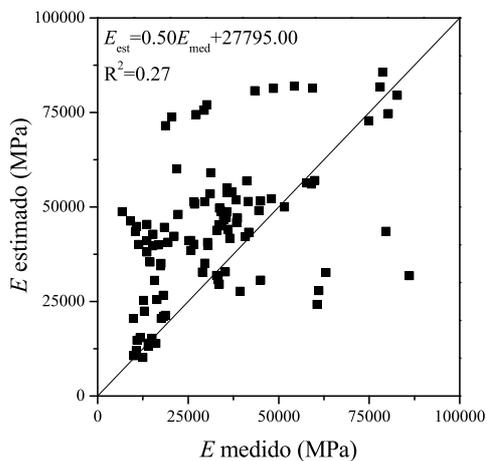
O modelo RM é aquele que apresenta melhor capacidade de extrapolação, mas mesmo para este modelo o valor mais alto de R^2 é de apenas 0.38. Na Figura 5.24 são ilustradas as relações entre os valores de E medidos e estimados pelo modelo RM para as quatro combinações.



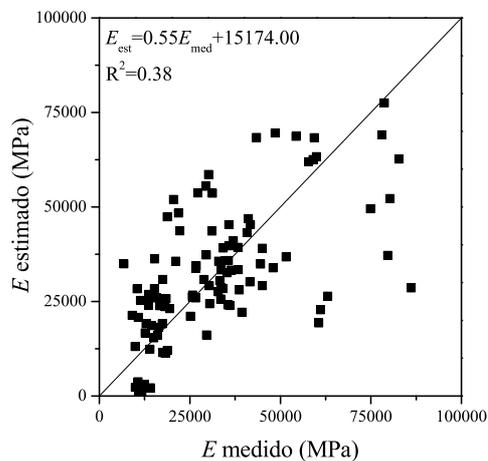
(a) Combinação 1



(b) Combinação 2



(c) Combinação 3



(d) Combinação 4

Figura 5.24: Relação entre os valores de teste E medidos e estimados pelo modelo RM (amostras secas: validação)

Na Figura 5.24 volta-se a observar que os modelos apresentam uma tendência para sobrestimar, agora, os valores de E .

5.5.2 Validação: valores médios

Ao anterior conjunto de teste para valores médios onde só constava 1 entrada foram adicionadas 4 entradas, todas relativas aos quatro tipos de granito analisados nos capítulos anteriores. Uma vez que nos dados de Luzio (2010) não constavam alguns parâmetros necessários à validação de algumas combinações nenhum dado para além daqueles apresentados no Capítulo 4 foram inseridos.

Validação dos modelos de previsão para f_c : valores médios

Analisando os valores apresentados na Tabela 5.36 é possível concluir que os três modelos no conjunto das quatro combinações testadas devolveram uma boa resposta. Porém, na análise dos valores apresentados devem ser ponderados dois aspetos. O primeiro está relacionado com o pequeno número de entradas que foram introduzidas para testar o desempenho dos modelos. O segundo sobre o qual se deve refletir é o facto de os valores das entradas serem valores médios, o que mitiga o efeito de algumas imprecisões na obtenção de alguns parâmetros relatadas no Capítulo 4.

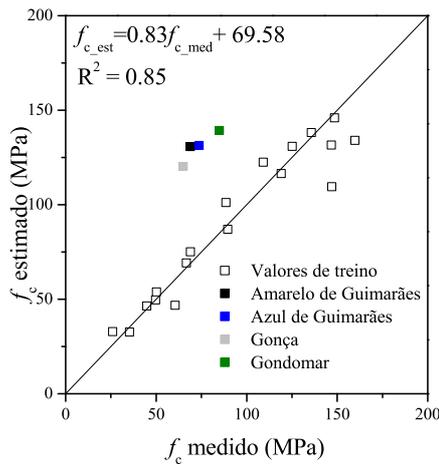
Tabela 5.36: Valor da linha de tendência (a), valor da ordenada na origem (b) e R^2 entre os valores medidos e estimados de f_c para o conjunto de teste (validação: valores médios)

Combinação	RM			RNA			MVS		
	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
12	0.46	52.92	0.69	0.21	57.36	0.34	0.8	31.72	0.91
20	0.85	69.29	0.77	0.85	69.29	0.77	0.89	64.01	0.28
24	0.88	67.07	0.83	1.06	53.12	0.13	0.83	69.58	0.85
28	0.57	40.65	0.66	0.57	40.65	0.66	1.17	14.27	0.99

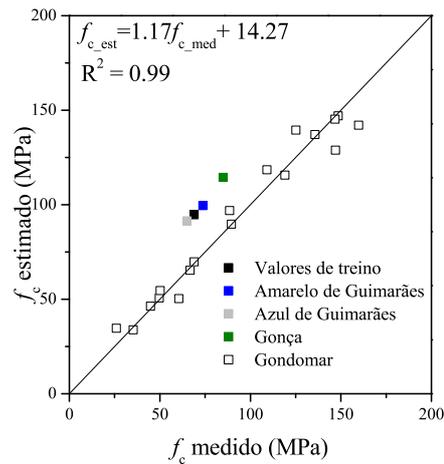
Para as combinações apresentadas o modelo que se destaca é o MVS apresentando melhor desempenho em 3 combinações, mais precisamente na 12, 24 e 28.

Entre elas, a combinação 24 merece particular atenção uma vez que nesta só constam variáveis independentes de fácil aferição, nomeadamente ρ_d , n e $VP\bar{U}_{150d}$. Porém, como é ilustrado na Figura 5.25 (a), os valores de teste foram ligeiramente sobrestimados, distanciando-se da tendência observada para os valores de treino estimados.

Por sua vez, na combinação 28 (Figura 5.25 (b)), onde o modelo MVS apresentou a melhor performance, também é verificada uma ligeira sobrestimação dos valores de teste. Contudo, estes aproximam-se bastante da tendência verificada no conjunto de treino. No entanto, como contraponto à combinação 24, nesta o modelo usou quatro variáveis independentes, sendo que uma delas é E , cuja obtenção exige ensaios destrutivos.



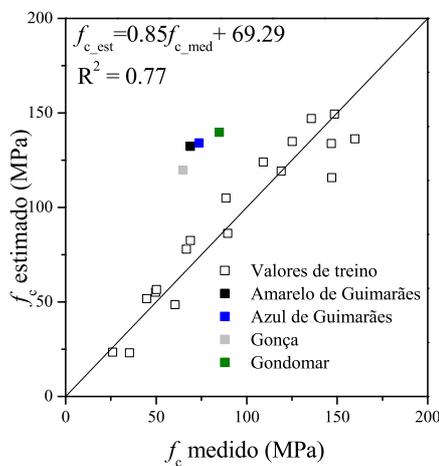
(a) Combinação 24



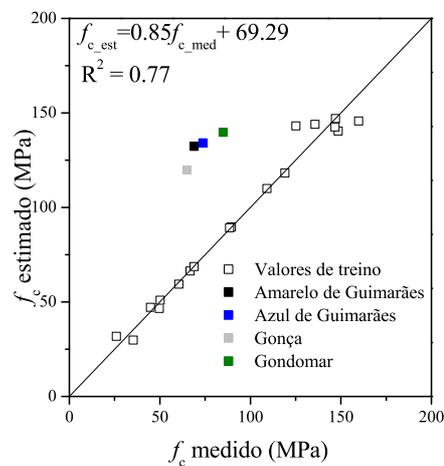
(b) Combinação 28

Figura 5.25: Valores de f_c de teste estimados pelo modelo MVS (valores médios: validação)

Destaque ainda para os modelos RM e RNA na combinação 20, onde só constam n e VP_{150d} , com um desempenho superior ao modelo MVS e praticamente igual entre si (Figura 5.26).



(a) RM



(b) RNA

Figura 5.26: Valores de f_c de teste estimados para a combinação 20 (valores médios: validação)

No cômputo geral é observado que os modelos voltam a sobrestimar os valores de f_c .

Validação dos modelos de previsão para E : valores médios

No que concerne à previsão de E para aquando da inserção de novas entradas na base de dados de teste de valores médios, regista-se um desempenho inferior ao verificado na

previsão de f_c (Tabela 5.37).

Tabela 5.37: Valor da linha de tendência (a), valor da ordenada na origem (b) e R^2 entre os valores medidos e estimados de E para o conjunto de teste (valores médios: validação)

Combinação	RM			RNA			MVS		
	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
1	1.49	13326.00	0.50	-2.61	12941.00	0.56	1.48	16561.00	0.62
3	1.58	10485.00	0.67	3.46	-4878.00	0.66	1.23	13929	0.66
6	1.63	-10602.00	0.78	7.90	192451.00	0.61	0.66	20979	0.70
10	1.44	15181.00	0.34	1.44	15181.00	0.34	1.49	17251.00	0.65
12	1.63	-10883.00	0.77	0.82	15297.00	0.71	1.55	-4348.00	0.72

Neste caso, o modelo MVS continua a apresentar uma boa capacidade de previsão, mas no entanto é superado pelo modelo RM em 3 das combinações.

Na combinação 10 onde são consideradas apenas dois parâmetros de fácil aferição, ρ_d e $VP_{U_{150d}}$, a melhor resposta é verificada pelo modelo MVS (Figura 5.27).

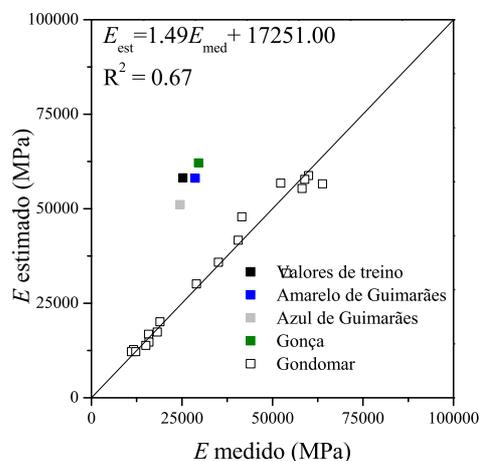


Figura 5.27: Relação entre os valores de teste E medidos e estimados pelo modelo MVS na combinação 10 (valores médios: validação)

Em condições iguais de apenas dois parâmetros de fácil aferição como é o caso da combinação 3, onde constam n e $VP_{U_{150d}}$, o melhor desempenho é verificado no modelo RM (Figura 5.28 (a)). Porém, com a adição de f_c à combinação anterior, ou seja na combinação 6 é observado um melhoramento de desempenho do mesmo modelo (Figura 5.28 (b)).

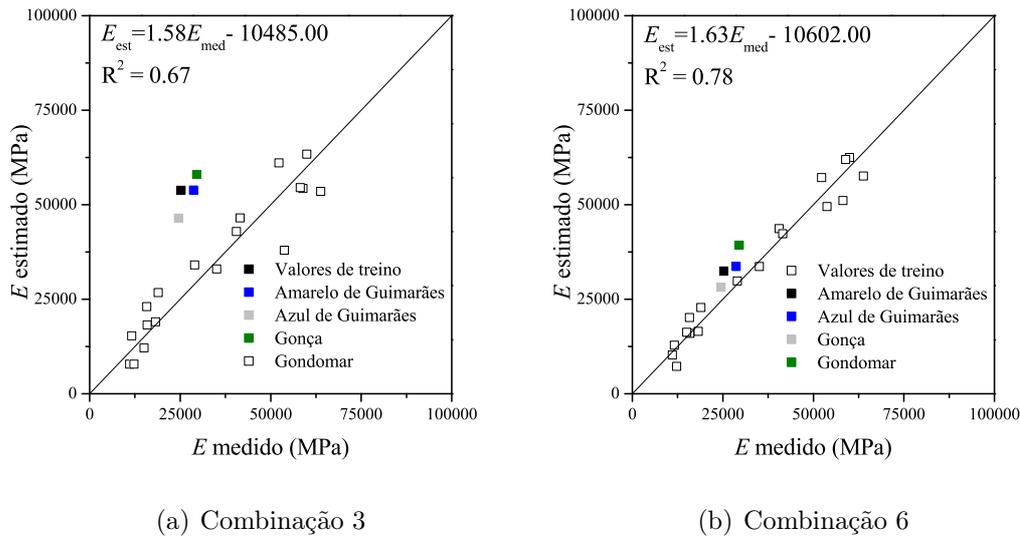


Figura 5.28: Valores de f_c de teste estimados pelo modelo RM (valores médios: validação)

5.6 Conclusões

Ao longo do presente capítulo foi feita a previsão de três parâmetros mecânicos referentes a granitos, nomeadamente f_c , f_t e E com base na informação reunida por Vasconcelos (2005). Para tal, a informação foi dividida em três bases de dados distintas, e nestas foram aplicadas técnicas de DM. Os algoritmos de DM usados neste trabalho foram o RM, RNA e MVS.

Para a previsão de f_c a partir da base de dados de amostras secas foram construídas doze combinações de variáveis independentes. Destas aquelas que globalmente se assumiram como as mais preponderantes foram f_{ci} e f_{cd} nas combinações onde foram consideradas, sendo que nas restantes E , onde era combinado com n ou com as VPV , foi considerada várias vezes como o parâmetro mais importante.

O melhor desempenho na previsão de f_c usando os valores presentes na base de dados de amostras secas é protagonizado pelo modelo RM. No entanto os modelos RNA e MVS apresentarem também uma boa capacidade de previsão. Como o modelo RM produz uma expressão que é facilmente utilizável tem esta vantagem adicional sobre os restantes modelos.

Devidos às boas relações encontradas, no total foram apresentadas sete equações de regressão para combinações com três ou menos parâmetros.

Na previsão de f_c com base em valores médios foram analisadas vinte e nove combinações.

Nestas a variável que se assumiu como a mais importante na construção dos modelos na maioria das combinações foi E . Entre as combinações construídas a partir de parâmetros de fácil aferição a VPU e a n assumiram-se como as mais importantes.

Na avaliação do desempenho com base nos valores das métricas globais foram identificados casos em que os modelos se apresentaram bastante instáveis. Essa instabilidade foi sobretudo verificada no modelo RNA. Nos restantes modelos foram verificadas volubilidades sobretudo nas combinações iniciais, onde constavam um largo número de variáveis independentes.

Relativamente à capacidade preditiva dos modelos foram obtidos valores bastante elevados de R^2 para todas as combinações. Contudo, os resultados devem ser considerados como otimistas uma vez que os modelos só foram inicialmente testados por uma entrada. Para melhor aferição do seu potencial estes devem ser submetidos a mais valores de teste.

Contrariando a instabilidade apresentada em termos de métricas globais, o modelo RNA apresentou uma boa resposta na previsão do valor de teste. Tal como na previsão de f_c com base em amostras secas, neste caso todos os modelos apresentaram uma boa capacidade de previsão.

Posteriormente foram apresentadas quinze equações de regressão construídas a partir das combinações onde foram consideradas quatro ou menos variáveis.

A partir da base de dados explorada para prever f_t as suas variáveis foram agrupadas ao longo de quinze combinações. Nas sete primeiras combinações a maior importância foi atribuída a k_0 . Com a sua retirada a variável à qual foi atribuída maior importância é a VPU .

Os modelos RM e RNA construídos apresentaram uma boa capacidade de extrapolação para dados não presentes na base de dados de treino. No modelo MVS foram verificadas boas performances na maioria das combinações, no entanto em outras este apresentou-se claramente inferior aos restantes modelos.

Uma vez que foram obtidos valores elevados de R^2 para combinações construídas com quatro ou menos parâmetros de entradas, foram apresentadas onze equações de regressão.

Na estimativa de E , de forma similar ao realizado na previsão de f_c , foram construídos modelos a partir de duas bases de dados distintas, nomeadamente a base de dados de amostras secas e a de valores médios.

Para a base de dados de amostras secas foram apresentadas quatro combinações de variáveis independentes. Estas englobam apenas três parâmetros, sendo que apenas na combinação 2 foram consideradas unicamente variáveis de obtenção fácil e não destrutiva. A variável que os modelos atribuíram maior importância na sua construção é a *VPU*.

Os três modelos apresentaram boa capacidade de extrapolação para as quatro combinações, com o modelo RM a destacar-se ligeiramente pela positiva comparativamente com RNA e MVS.

Para cada uma das combinações foram apresentadas as suas respetivas equações de regressão.

Relativamente às combinações construídas para a previsão de E a partir das variáveis independentes presentes na base de dados de valores médios foram apresentadas um total de quinze.

Destas f_c destacou-se como a mais importante, seguindo-se a *VPU* e n .

Pela análise dos valores extrapolados pelos modelos, neste caso voltou-se a observar um comportamento semelhante ao verificado nos modelos construídos a partir da mesma base de dados mas na previsão de f_c . Todos os modelos apresentaram valores elevados de R^2 aquando da relação entre os valores estimados e medidos, mas carecem de um maior número de casos de valores de teste para se aferir acerca da sua real capacidade de previsão.

Para cada uma das quinze combinações foram apresentadas as respetivas equações de regressão.

Posteriormente, tendo em vista a validação dos modelos, foram introduzidas novas entradas em algumas combinações construídas anteriormente e analisado o comportamento dos modelos.

Em termos globais assistiu-se a uma redução acentuada da qualidade dos valores extrapolados. Essa situação foi verificada sobretudo nas combinações construídas a partir de amostras secas. Contudo, este novo comportamento permitiu detetar uma limitação por parte dos modelos que até então não tinha sido explorada. Isto é, a incapacidade de alguns modelos em estimar valores que estão fora da gama de valores que foi usada na sua construção. Essa situação foi notada especialmente na estimativa de f_c a partir dos modelos construídos a partir de amostras secas.

Com a introdução de novas entradas no conjunto de teste da base de dados de valores médios, foi obtida uma resposta aceitável dos modelos, particularmente na previsão de f_c . Esse acréscimo de qualidade de previsão reforça a ideia da limitação descrita no parágrafo anterior, uma vez que apesar de na base de dados de valores médios constarem poucas entradas, esta abrange a gama de valores à qual foi solicitada previsão por parte dos modelos nesta fase.

Deve ser concluído relativamente à secção de validação dos modelos que esta foi pouco sucedida pela baixa fiabilidade dos valores que foram adicionados às bases de dados de teste de valores médios e, particularmente, à base de dados de teste relativa a amostras secas

Contudo, com este capítulo foram encontrados resultados prometedores que atestam a boa capacidade das técnicas de DM na previsão de parâmetros mecânicos dos granitos. No entanto, os resultados apresentados devem ser considerados como reveladores das boas capacidades destas técnicas, mas devido à vasta variabilidade de tipos de granito, sendo que inclusive dentro do mesmo tipo de granito são verificadas características bastante distintas, o estudo apresentado deve ser continuado com vista na obtenção de mais parâmetros para reforçar a capacidade de previsão dos modelos. Ou seja, maior quantidade e qualidade de informação resultará em modelos mais robustos e capazes de prever determinado parâmetro a partir de informação inicialmente estranha ao modelo. No entanto, as limitações apresentadas neste capítulo devem ser tidas em consideração aquando do uso destas técnicas.

Em casos em que a informação acerca de determinado parâmetro é dispersa e/ou não é necessário prever um valor com um rigor extremo os modelos construídos a partir de valores médios apresentam-se como uma boa solução.

Nota ainda para a boa capacidade dos algoritmos de DM em fazer a previsão dos parâmetros mecânicos a partir de variáveis independentes de fácil aferição, onde se destaca claramente a *VP*.

Capítulo 6

CONCLUSÕES

6.1 Sumário e principais contribuições

Este trabalho focou-se essencialmente na abordagem da problemática da reabilitação e reparação de edifícios antigos em pedra, nomeadamente em granito. Os edifícios de alvenaria de pedra, não raras vezes, estão ligados a um valor cultural e patrimonial que resultam em dificuldades na sua inspeção e diagnóstico na perspetiva de proceder à sua conservação/reabilitação. Neste processo, a identificação de zonas danificadas, fendilhação e defeitos assim como a caracterização mecânica dos materiais são por vezes dificultadas dado que a extração de provetes, que permitiriam uma análise cuidada em laboratório, na maioria dos casos não é uma opção. Nestes casos é fundamental a utilização de técnicas não destrutivas de diagnóstico na caracterização do estado de dano e na caracterização dos materiais.

Assim neste trabalho, para além de um estudo acerca da construção em pedra e da importância e problemas que a sua conservação e reabilitação levantam, foram exploradas duas técnicas não destrutivas, nomeadamente a técnica de velocidade de propagação de ultrassons (*VPU*) e Martelo de Schmidt (*MS*) com o objetivo de avaliar o seu desempenho na:

1. Estimativa das propriedades mecânicas dos granitos constituintes de alvenaria;
2. Detecção da anisotropia dos granitos;
3. Avaliação da relação entre a configuração de medição direta e indireta da *VPU*.

Para o efeito, foram efetuadas um conjunto de três campanhas laboratoriais. Estas tiveram como objetivo de aferição da relação entre propriedades físicas, mecânicas e índices não destrutivos (*IND*), assim como o de alimentar as bases de dados cujo objetivo principal é prever as propriedades mecânicas com base em parâmetros que facilmente possam ser

obtidos in-situ. A base de dados foi construída a partir de propriedades físicas e mecânicas existentes de diversos tipos de granito, sobretudo do norte de Portugal, com o desígnio de avaliar, numa primeira fase, as potencialidades de três técnicas de Data Mining (DM) na previsão de três parâmetros mecânicos distintos, nomeadamente a resistência à compressão (f_c), resistência à tração (f_t) e módulo de elasticidade (E) do material alvo de estudo neste trabalho.

De seguida é feito um sumário das principais conclusões e contribuições que foram apresentadas ao longo dos capítulos que constituem a presente dissertação.

Relativamente ao Capítulo 3, onde foram feitas duas campanhas de ensaio usando duas técnicas não destrutivas, económicas e de fácil aplicação, as principais conclusões são divididas em duas fases, nomeadamente as conclusões relativas à campanha de ensaios num caso real e as relativas à campanha em blocos de granito.

Da aplicação das duas técnicas não destrutivas num caso real as principais conclusões são as seguintes:

1. Numa primeira fase foram imediatamente detetadas dificuldades à aplicação do ensaio de ultrassons por imposição da localização e posicionamento das pedras de granito, que impossibilitaram a utilização da configuração direta dos ultrassons. Esta dificuldade encontrada representa o maior desafio da aplicação das técnicas ultrassónica in-situ, uma vez que a configuração indireta conduz a leituras consideravelmente mais fracas que as registadas pelo método de medição direta. Esta limitação identificada é a premissa que levou à realização de ensaios de medição da *VPU* em blocos de granito, procurando com isso fazer a avaliação da aplicabilidade da medição indireta;
2. Entre as duas técnicas exploradas a de ultrassons é aquela que pode ser descrita como totalmente não destrutiva, dado que durante a utilização do MS foram detetadas pequenas fragmentações após os primeiros contatos. De resto, este comportamento já tinha sido detetado em trabalhos anteriores (Luzio, 2010). Recomenda-se, então, que na aplicação destas técnicas em casos reais se inicie pela medição da *VPU*;
3. As condições superficiais das faces de granito ensaiadas influenciaram as leituras de ambos os instrumentos, uma vez que na presença de pedras de granito do mesmo tipo foram registados valores distintos entre eles. Isto permitiu a partir da análise dos resultados distinguir claramente dois grupos: faces de granito interiores e faces de granito exteriores ;
4. Pela análise dos resultados do ensaio de dureza superficial calculados a partir de

duas normas foram obtidos valores distintos, com a norma ASTM D5873 (1995) a apresentar valores ligeiramente inferiores à ISRM (1981). A utilização da norma ISRM conduz a valores de dureza superficial ligeiramente superiores aos valores obtidos pela norma ASTM devido ao procedimento distinto sugerido por cada uma das normas.

Da aplicação das mesmas técnicas não destrutivas em granitos sob a forma de blocos conclui-se que:

1. O estado de degradação verificado em alguns blocos dificultou a leitura das *VPU*. A este respeito pode dizer-se que os blocos que se conseguiram para os ensaios apresentavam superfícies muito irregulares e claramente mais degradadas do que as superfícies encontradas, de um modo geral, nas construções antigas;
2. Ambos os métodos de ensaios mostraram-se sensíveis às diferentes condições superficiais apresentadas pelos blocos. A rugosidade e a degradação superficial são particularmente importantes nos valores que se obtêm da dureza superficial dado que podem conduzir a valores consideravelmente inferiores aos valores que se obtêm com a superfície lisa. Esta técnica poderá ser utilizada para avaliação da degradação superficial;
3. A medição da dureza superficial pode ser um indicador do estado de alteração da pedra, particularmente no caso de se analisar granitos mediantemente a muito alterados;
4. O ensaio de ultrassons revelou-se eficaz na deteção da anisotropia dos granitos, sobretudo em faces retificadas. Das duas configurações de medição exploradas neste trabalho a direta apresentou-se com melhor desempenho nesta tarefa;
5. Foi estabelecida a relação entre os valores de *VPU* obtidos através da configuração direta e indireta quer em blocos de face irregular quer em blocos retificados traduzida nas seguintes equações:

$$\text{Blocos não retificados : } V_{NR(D)} = 1.14V_{NR(I)} + 486.01 \quad R^2 = 0.90 \quad (6.1)$$

$$\text{Blocos retificados : } V_{R(D)} = 1.10V_{R(I)} + 185.40 \quad R^2 = 0.88 \quad (6.2)$$

Estas relações indicam que se obtêm valores inferiores de *VPU* no caso de medições indiretas. No entanto admite-se que, na impossibilidade de se efetuarem medições diretas, o valor da *VPU* em medição indireta pode conduzir a leituras aceitáveis;

6. O ensaio de medição de dureza superficial demonstrou ser ineficaz na detecção da anisotropia, nas duas fases consideradas;
7. Ambas as técnicas mostraram-se eficazes na rápida e fácil avaliação do estado de desgaste dos granitos.

Da campanha de ensaios laboratoriais apresentada no Capítulo 4 foi possível concluir que:

1. A aplicação da técnica de ultrassons em provetes sob condições controladas indicam que a humidade contida influencia a VPU medida, com as leituras em amostras secas a resultarem em valores inferiores aos medidos nos blocos de granito em condições menos rigorosas de controlo de humidade;
2. Foi possível concluir acerca da proporcionalidade inversa entre a VPU e a porosidade (n), ou seja os valores mais elevados de VPU a serem medidos nos granitos menos porosos;
3. Os granitos de elevada resistência apresentaram um comportamento frágil aquando da aplicação do ensaio de compressão uniaxial;
4. Os resultados do ensaio de compressão uniaxial apresentam valores elevados de coeficientes de variação (CV) para f_c e E , o que indica a baixa fiabilidade dos valores apresentados;
5. Pela análise dos valores das propriedades mecânicas obtidas em provetes, apesar dos elevados CV , foi possível identificar uma tendência que indica que os valores mais elevados de VPU são obtidos em granitos mais resistentes;
6. Da comparação dos valores de n com os valores das propriedades mecânicas medidas em provetes foi identificada a proporcionalidade inversa entre os parâmetros físicos e mecânicos;
7. Repetindo a análise feita com base nas propriedades físicas, mecânicas e a VPU em termos médios, a tendência verificada na análise por provetes foi confirmada.

Da análise ao Capítulo 5 conclui-se que:

1. A aplicação de três técnicas de DM, nomeadamente a técnica de Regressão Múltipla (RM), Redes Neurais Artificiais (RNA) e Máquinas de Vetores de Suporte (MVS), na previsão de f_c , f_t e E apresentaram resultados bastante prometedores acerca da sua aplicabilidade em granitos, com os modelos, na maioria das combinações de parâmetros consideradas, a revelarem boa capacidade de extrapolação;

2. A seleção da técnica a utilizar deve ser particularizada e avaliada em função da combinação dos parâmetros com que se pretende prever cada um dos três parâmetros explorados neste trabalho. No entanto, dada a boa capacidade de extrapolação apresentada globalmente pelas três técnicas, deve ser feita a ressalva à vantagem intrínseca do modelo RM, uma vez que este modelo produz uma expressão que é facilmente utilizável;
3. Pela avaliação das métricas globais foram identificados casos em que os modelos apresentarem bastante instabilidade. Esta foi sobretudo observada nas combinações construídas com base nos valores presentes na base de dados de valores médios. A causa dessa instabilidade está relacionada com o número reduzido de valores de treino com que os modelos são construídos em contraste com elevado número de parâmetros que foram considerados em determinadas combinações;
4. Entre as variáveis independentes consideradas aquelas que são obtidas por via de ensaios destrutivos (ED) e de difícil aferição apresentaram-se em várias combinações relativas às três bases de dados, na previsão de f_c , f_t e E , como as mais importantes;
5. Independentemente das importâncias que os modelos atribuíam a cada variável de entrada foram construídos modelos com base em combinações de parâmetros de fácil aferição e foi verificada uma boa capacidade de extrapolação por parte dos modelos;
6. A VPU destacou-se em várias combinações como a variável mais importante, quer em combinações onde foram consideradas apenas parâmetros de fácil obtenção quer quando esse critério não foi imposto;
7. Com a introdução de novas entradas às bases de dados de teste os modelos apresentaram uma fraca resposta. Contudo, esta quebra de capacidade de previsão era expectável devido aos valores de baixa fiabilidade que foram introduzidos, sendo que a avaliação dos modelos deve ser feita com base em valores mais fiáveis;
8. Na validação dos modelos aquando da introdução de novas entradas foram também verificadas limitações destes ao extrapolar valores para gamas de valores diferentes daquelas com que estes tinham sido construídos.

6.2 Trabalhos Futuros

O presente trabalho teve como base três fases distintas mas que se interligaram em vista de um principal objetivo que dá nome à presente dissertação, ou seja, a construção de base de dados para a previsão de propriedades mecânicas. Para isso foi necessário uma primeira fase de avaliação das técnicas não destrutivas na estimativa das propriedades mecânicas dos granitos. Uma segunda fase onde foram feitos ensaios laboratoriais com

vista na obtenção de várias propriedades. Por fim, para a execução da terceira fase, ou seja, a construção de bases de dados, onde se aplicaram técnicas de DM com vista à previsão das propriedades mecânicas dos granitos, foi necessário ter conhecimento acerca da aplicabilidade das técnicas não destrutivas e o que significam os índices que estas devolvem (1ª Fase) e posterior obtenção de propriedades físicas e mecânicas (2ª Fase) para alimentar e validar os modelos construídos a partir das bases de dados apresentadas.

Assim, a proposta de trabalhos futuros deve ser dividida de acordo com as três fases mencionadas.

Para a primeira fase apresentam-se as seguintes sugestões:

1. Novas campanhas de ensaios não destrutivos (END) em edifícios e em blocos de granito com vista no alargamento do conhecimento acerca do material estudado;
2. Caracterização mecânica dos granitos presentes do edifício de habitação estudado neste trabalho, com base na extração de provetes das pedras analisadas. Esta sugestão faz sentido na medida que o edifício estudado vai ser demolido;
3. Campanhas de END no estudo de outras pedras habitualmente usadas na construção de edifícios, como é o exemplo do xisto, arenito, calcário, etc.;
4. Aplicação de novas técnicas não destrutivas na avaliação e estimativa das propriedades mecânicas dos granitos utilizados em alvenaria, nomeadamente a técnica dos Bender Elements. Esta técnica apresenta-se como inovadora e a sua utilização atualmente restringe-se praticamente a materiais poucos rígidos.

Relativamente à segunda fase, a de ensaio laboratoriais, indicam-se algumas tarefas que não foram possíveis realizar a tempo de ser incluídas nesta dissertação:

1. Nova campanha de ensaios de caracterização mecânica utilizando os provetes que foram extraídos dos blocos estudados no presente trabalho, nomeadamente:
 - (a) Ensaios de caracterização ao comportamento à flexão dos granitos;
 - (b) Ensaios de caracterização da energia de fratura dos granitos;
 - (c) Repetição dos ensaios de compressão uniaxial com vista a comparação com os resultados obtidos no presente trabalho.
2. Alargamento dos ensaios laboratoriais feitos neste trabalho, assim como aqueles que são sugeridos no ponto anterior, a outros tipos de granito e a outros tipos de pedra, nomeadamente o xisto, arenito, calcário, etc.

Relativamente à terceira fase, a de construção de base dados para a previsão das propriedades mecânicas de granitos, recomendam-se as seguintes tarefas:

1. Introdução de novas entradas às bases de dados apresentadas neste trabalho e reconstrução dos modelos. Esta tarefa está envolta de especial importância uma vez que maior e melhor qualidade de informação resultará em modelos mais robustos e capazes de responder a mais situações;
2. Comparação entre a capacidade de previsão dos modelos apresentados com equações empíricas propostas por outros autores, de forma a aferir acerca das vantagens dos modelos construídos neste trabalho;
3. Construção de modelos a partir de outras técnicas de DM como por exemplo as técnicas de Árvores de Regressão e K-Vizinhos Próximos;
4. Alargamento da base de dados a outros tipos de pedra.

Capítulo 7

Bibliografia

Altindag R. (2012), “Correlation between P-wave velocity and some mechanical properties for sedimentary rocks”, *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 112:229-237.

Arede A. e Costa A. (2002), “Inspeção e Diagnóstico Estrutural de Construções Históricas”, *Atas do Seminário: “A Intervenção no Património. Práticas de Conservação e Reabilitação”*, FEUP, 2-4 de Outubro, Porto.

ASTM C805-85 (1985), *Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete*, American Society for Testing Materials.

ASTM D5873 (1995), *Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method*, American Society for Testing Materials.

Aydin A. (2008), “ISRM Suggested method for determination of the Schmidt rebound hardness: Revised version”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, doi:10.1016/j.ijrmms.2008.01.020.

Aydin A. e Basu A. (2005), “The Schmidt hammer in rock material characterization”, *Engineering Geology* 81:1-14.

Binda L. e Saisi A. (2001), “Non destructivetesting applied to historic buildings. The case of some Sicilian Churches. *Historical Constructions*”, P.B. Lourenço, P. Roca (Eds.), Guimarães, 29-46.

Cortez P. (2010), “Data Mining with Neural Networks and Support Vector Machines Using the rminer Tool”, *10th Industrial Conference on Data Mining (ICDM 2010)*, Lecture Notes in Artificial Intelligence 6171, Berlin, Germany, July 2010.

Cortez P., Cerdeira A. e Almeida F. (2009), “Modeling wine preferences by data mining from physicochemical properties”, Departamento de Sistemas de Informação da Universidade do Minho, *Decision Support Systems* 47:547-533.

Costa J.F.A. (2011), “Um Ambiente Gráfico para Facilitar Tarefas de Data Mining via Ferramenta R”, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho.

Cruz A. (2007), “Data Mining via Redes Neurais Artificiais e Máquinas de Vectores de Suporte”, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho.

EN-12504-4 (2004), *Testing concrete - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity*, August 2004.

Ferreira A. (2011), “Aplicação da técnica dos “bender elements” a provetes de rocha”, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho.

Fort R., Varas M.J., Buergo M.A. e Martin-Freire D. (2011), “Determination of anisotropy to enhance the durability of natural stone”, *Journal of Geophysics and Engineering* 8:S132-S144.

Galvão J. (2009), “Técnicas de ensaio in-situ para avaliação do comportamento mecânico de rebocos em fachadas: Esclerómetro e ultra-sons”, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico.

Gouveia J.P., Lourenço P.B. e Vasconcelos G. (2007), “Soluções construtivas em alvenaria”, 3º Congresso nacional de Construção, Coimbra, 17-19 de Dezembro.

ISRM (1981), *Rock Characterization, Testing and Monitoring - Suggested Methods for Determining the Hardness and Abrasiveness of Rocks*, International Society for Rock Mechanics, [95-103].

ISRM (1981), *Rock Characterization, Testing and Monitoring - Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials*, International Society for Rock Mechanics, [113-114].

ISRM (1981), *Rock Characterization, Testing and Monitoring - Suggested Methods for Determining the Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties*, International Society for Rock Mechanics, [81-88].

Jinbo B. e Bennett K.P. (2003), “Regression Error Characteristic Curves”, Proceeding of the Twentieth International Conference on Machine Learnign, Washingtgon DC.

Kahraman S. (2001), “Estimating the direct P-wave velocity value of intact rock from indirect laboratory measurements”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 39:101-104.

Kahraman S. (2007), “The correlations between the saturated and dry P-wave velocity of rocks”, Ultrasonics 46:341-348.

Kahraman S., Fener M. e Gunaydin O. (2002), “Predicting the Schmidt hammer values of in situ intact rock from core sample values”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 39:395-399.

Kecman V. (2001), “Learning and Soft Computing: Support Vector Machines, Neural Network and Fuzzy Logic Models”, Massachusetts Institute of Technology: The MIT Press, ISBN 0-262-11255-8.

Kewley R.H., Embrechts M.J. e Breneman C. (2000), “Data Strip Mining for the Virtual Design of Pharmaceuticals with Neural Networks”, IEEE Transactions on neural networks 11(3):668-679.

Lednická M. e Kaláb Z. (2012), “Evaluation of Granite Weathering in the Jeroným Mine Using Non-Destructive Methods”, Acta Geodyn. Geomater. 9(2):211-220.

Lorena A.C. e Carvalho A.C.L.F (2003), “Introdução às Maquinas de Vetores Suporte (Support Vector Machines)”, Relatórios técnicos do ICMC, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, São Carlos, ISSN - 0103-2569.

Lorena A.C. e Carvalho A.C.L.F (2007), “Uma Introdução às Support Vector Machines”, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, São Carlos, 14:43-67.

Lourenço P.B. (2005), “Aplicações das recomendações ICOMOS sobre conservação de estruturas antigas”, 2º Seminário: A Intervenção no Património - Práticas de Conservação e REAB, 12-13-14 de Outubro.

Luzio B. (2010), “Avaliação não destrutiva da pedra de construção”, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho.

Malhotra V.M., Carino N.J. (1991), “CRC handbook on nondestructive testing of concrete”, editors V.M. Malhotra and N.J. Carino, Boca Raton: CRC Press, ISBN 0-8493-2984-1.

Martins F.F. e Marques R.F.P. (2010), “Previsão de assentamentos de fundações superficiais através de técnicas de Data Mining”, 12º Congresso Nacional de Geotecnia, Sociedade Portuguesa de Geotecnia - Universidade do Minho, 26-27-28-29 de Abril.

Martins F.F. e Miranda T.F.S. (2012), “Estimation of the Rock Deformation Modulus and RMR Based on Data Mining Techniques”, *Geotechnical and Geological Engineering Journal*, Springer Science+Business Média B.V 30(4):787-801.

Miranda T. (2003), “Contribuição para a obtenção de parâmetros geomecânicos para a modelação de obras subterrâneas em maciços graníticos” Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho.

Miranda T. (2007), “Geomechanical parameters evaluation in underground structures. Artificial intelligence, Bayesian probabilities and inverse methods”, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho.

Nepomuceno M. (1999), “Ensaio não destrutivo em Betão”, Prova de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, Universidade da Beira Interior.

Oliveira R. (2003), “Análise de Práticas de Conservação e Reabilitação de Edifícios com Valor Patrimonial”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Pereira V.C. (2006), “Tendência na reabilitação de fachadas”, Workshop: “O Habitat do Futuro inserido no património construído desafios e oportunidades para o Sector da Reabilitação”, AveiroDomus, 27 de Janeiro.

Pimentel A. F. e Martins J.G. (2005), “Reabilitação de edifícios tradicionais”, www.ufp.pt, consultado em 12 de Dezembro de 2011.

Prikryl R. (2001), “Some microstructural aspects of strength variation in rocks”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 38:671-682.

Santos M. e Azevedo C. (2005), “Data Mining: Descoberta de conhecimento em bases de

dados”, Lisboa: FCA.

Sassi R.J. (2010), “Aplicação dos conceitos da Teoria dos Conjuntos Aproximados no tratamento da indiscernibilidade”, *Exacta*, São Paulo, 8:89-98.

Sharma P.K., Khandelwal M. e Singh T. N. (2010), “A correlation between Schmidt hammer rebound numbers with impact strength index, slake durability index and P-wave velocity”, *Int. J Earth Sci (Geol Rundsch)* 100:189-195.

Teixeira J. (2006), “Geomorfologia e morfotectónica de relevos quartzíticos: implicações na gestão de georrecursos”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro.

Vasconcelos G. (2005), “Experimental investigations on the mechanics of stone masonry: characterization of granites and behaviour of ancient masonry walls”, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho.

Vasconcelos G., Alves C.A.S e Miranda T. (2012), “Nondestructive evaluation of granite building stones and relation with key mechanical parameters”, *Harmonising Rock Engineering and the Environment: Qian and Zhou (eds)*, London, ISBN 978-0-415-80444:861-866.

Vasconcelos G., Lourenço P.B., Alves C.A.S e Pamplona J. (2008), “Ultrasonic evaluation of physical and mechanical properties of granites”, *Ultrasonics* 48:453-466.

Vishnu C.S., Mamtani M.A. e Basu A. (2010), “AMS, ultrasonic P-wave velocity and rock strength analysis in quartzites devoid of mesoscopic foliations - implications for rock mechanics studies”, *Elsevier B.V., Tectonophysics* 494:191-200.

Witten I.H. e Frank E. (2005), “Data mining : practical machine learning tools and techniques”, *Elsevier Inc.*, ISBN 0-12-0884107-0.

ANEXOS

IMPORTÂNCIAS RELATIVAS DAS VARIÁVEIS DE PREVISÃO

Tabela I: Importância relativa (%) das variáveis de previsão no modelo RM (f_c : amostras secas)

Comb.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>E</i>	1.14	12.57	10.82	-	-	78.84	78.24	94.16	-	-	-	-
<i>n</i>	0.17	6.67	6.60	-	-	9.30	9.11	5.84	8.92	7.79	6.50	17.24
<i>f_{ci}</i>	2.10	61.66	60.85	57.32	56.45	-	-	-	57.27	92.21	-	-
<i>f_{cd}</i>	0.53	12.39	13.00	39.74	39.93	-	-	-	33.81	-	93.50	-
<i>VPU_{54d}</i>	46.78	6.71	-	2.93	-	11.86	-	-	-	-	-	-
<i>VPU_{150d}</i>	49.29	-	8.72	-	3.62	-	12.65	-	-	-	-	82.76

Tabela II: Importância relativa (%) das variáveis de previsão no modelo RNA (f_c : amostras secas)

Comb.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>E</i>	1.14	12.57	11.52	-	-	78.84	78.24	94.16	-	-	-	-
<i>n</i>	0.17	6.67	60.31	-	-	9.30	9.11	5.84	8.92	83.18	6.50	17.24
<i>f_{ci}</i>	2.10	61.66	16.76	85.56	81.25	-	-	-	57.27	16.82	-	-
<i>f_{cd}</i>	0.53	12.39	4.99	12.75	17.44	-	-	-	33.81	-	93.50	-
<i>VPU_{54d}</i>	46.78	6.71	-	1.69	-	11.86	-	-	-	-	-	-
<i>VPU_{150d}</i>	49.29	-	6.42	-	1.31	-	12.65	-	-	-	-	82.76

Tabela III: Importância relativa (%) das variáveis de previsão no modelo MVS (f_c : amostras secas)

Comb.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>E</i>	2.64	1.38	8.14	-	-	22.89	51.39	83.02	-	-	-	-
<i>n</i>	16.57	18.97	0.6	-	-	55.29	36.22	16.98	17.65	15.49	13.97	27.70
<i>f_{ci}</i>	42.69	57.02	11.64	65.39	41.25	-	-	-	36.73	84.51	-	-
<i>f_{cd}</i>	32.34	18.56	49.88	33.80	44.40	-	-	-	45.62	-	86.03	-
<i>VPU_{54d}</i>	1.84	4.07	-	0.81	-	21.82	-	-	-	-	-	-
<i>VPU_{150d}</i>	3.92	-	29.75	-	14.34	-	12.40	-	-	-	-	72.30

Tabela IV: Importância relativa (%) das variáveis de previsão no modelo RM (f_c : valores médios)

Comb.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
k_0	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
δ_{ft}	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
f_t	6.70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
G_f	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
w_c	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
d_u	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
n	0.15	0.47	0.97	0.80	15.51	3.70	4.89	0.41	18.56	33.04	17.43	18.15	19.85	-	83.67	62.22	93.37	-	-	85.05	61.31	-	-	87.18	57.11	-	-	-	-	
p_d	6.87	0.42	0.00	0.22	-	0.17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.25	-	41.87	-	4.48	-	
ρ_{sat}	1.19	0.16	0.02	-	0.49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.17	-	5.63	-	4.45	
E	12.63	0.36	0.43	1.59	3.08	0.70	16.34	2.84	77.25	65.39	79.41	79.20	77.74	22.22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
E^*	0.18	-	6.27	6.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
v	0.00	0.23	0.12	0.15	0.13	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
ϵ_{ci}	0.29	0.42	0.12	0.83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
f_{ci}	5.46	0.74	6.87	9.54	5.76	2.91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
ϵ_{cat}	0.08	2.16	0.82	2.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
f_{cat}	4.21	0.21	48.29	40.81	29.93	13.51	-	-	-	-	-	-	-	1.92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
G_{cpre}	0.05	0.27	0.69	0.45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	75.86	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
$d_{u_{pre}}$	0.00	0.06	0.02	0.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
G_{cpost}	0.43	0.51	0.86	1.66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
$d_{u_{post}}$	0.06	0.05	1.13	1.87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
VPU_{54d}	34.26	58.05	-	20.42	-	38.76	-	52.08	-	-	3.16	-	-	-	16.33	-	77.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VPU_{150d}	3.37	32.77	-	12.88	-	40.18	-	44.66	-	-	2.64	2.41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
VPU_{54sat}	14.11	2.99	16.95	-	21.37	-	44.78	-	4.19	-	-	-	-	-	37.78	-	52.87	-	-	14.95	-	21.33	-	12.57	-	43.52	-	4.99	-	-
VPU_{150sat}	5.97	0.01	15.94	-	22.96	-	33.99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	38.69	-	52.39	-	42.72	-	54.43	-	7.14	
N	3.92	0.11	0.51	0.20	0.77	0.04	-	0.00	-	1.57	-	-	-	-	-	-	6.63	22.96	47.13	-	78.67	47.61	-	-	-	-	-	-	-	

Tabela V: Importância relativa (%) das variáveis de previsão no modelo RNA (f_c : valores médios)

Comb.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
k_0	0.32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
δ_{ft}	3.37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
f_t	1.81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
G_f	0.91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
w_c	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
d_u	1.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
n	1.78	16.08	1.45	17.91	1.32	22.57	4.89	0.41	18.56	33.09	17.43	18.15	19.85	-	83.67	72.35	100.00	-	-	58.78	58.52	-	-	87.23	69.90	-	-	20.55	9.13	
ρ_d	2.80	3.78	-	4.94	-	16.88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
ρ_{sat}	11.38	9.46	2.10	-	0.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
E	3.00	1.88	0.06	0.38	0.16	3.14	16.34	2.84	77.26	65.32	79.41	79.20	77.74	1.92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
E^*	8.11	9.35	2.54	9.54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v	2.52	0.58	0.05	0.05	1.98	0.71	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ϵ_{ci}	1.05	8.57	4.12	1.64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
f_{ci}	21.92	12.41	3.28	0.49	0.40	8.20	-	-	-	-	-	-	-	15.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ϵ_{cd}	5.66	7.03	0.76	6.12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
f_{cd}	1.44	6.45	0.44	23.81	86.36	40.61	-	-	-	-	-	-	-	82.96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G_{cpre}	4.41	1.47	31.21	8.33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
dt_{pre}	0.58	0.09	16.22	3.17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G_{cpost}	0.90	5.45	4.27	5.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
d_{upost}	10.22	14.03	16.68	10.79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VPV_{54d}	0.08	1.89	-	1.88	-	1.36	-	52.08	-	-	3.16	-	-	-	16.33	-	-	77.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VPV_{150d}	0.61	0.05	-	5.19	-	6.40	-	44.66	-	-	-	2.64	2.41	-	-	-	-	-	-	41.22	-	21.36	-	12.54	-	61.11	-	42.01	-	-
VPV_{54sat}	0.29	0.07	13.66	-	2.71	-	44.78	-	4.18	-	-	-	-	-	-	27.65	-	-	-	91.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UPV_{150sat}	5.23	0.48	2.52	-	4.76	-	33.99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	41.48	-	52.40	-	3.02	-	76.58	-	9.68	-
N	10.56	0.88	0.65	0.26	1.92	0.13	-	0.00	-	1.59	-	-	-	-	-	-	0.00	22.96	8.60	-	-	78.64	47.60	-	-	-	-	-	-	-

Tabela VI: Importância relativa (%) das variáveis de previsão no modelo MVS (f_c : valores médios)

Comb.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
k_0	0.39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
δ_{ft}	2.37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
f_t	1.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G_f	5.36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
w_c	1.64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
d_u	2.22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
n	2.08	3.17	3.71	3.88	8.68	16.06	20.71	27.52	28.52	32.06	37.00	41.61	34.27	-	54.46	90.12	41.74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
p_d	0.14	0.11	-	0.63	-	3.66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
p_{sat}	0.27	0.09	0.32	-	0.57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E	7.65	6.73	9.89	8.42	12.68	13.76	36.85	35.51	49.80	67.41	62.04	54.26	60.75	28.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E^*	6.52	7.38	10.68	9.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v	4.49	3.87	4.11	4.09	3.80	6.34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ϵ_{ci}	0.91	1.39	1.12	1.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
f_{ci}	12.08	10.73	9.50	9.87	25.69	18.37	-	-	-	-	-	-	-	5.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ϵ_{cd}	15.88	9.07	3.22	5.41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
f_{cd}	14.67	14.07	11.31	12.08	42.56	29.78	-	-	-	-	-	-	66.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G_{cpre}	2.39	0.14	0.72	0.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$d_{u_{pre}}$	2.56	7.50	11.00	9.98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G_{cpost}	2.20	1.48	1.60	2.19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$d_{u_{post}}$	6.36	13.08	14.18	11.40	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VPU_{54d}	1.42	4.56	-	8.40	-	1.56	-	11.36	-	-	0.96	0.00	-	-	45.54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VPU_{150d}	1.45	4.68	-	8.76	-	1.62	-	10.76	-	-	4.13	4.98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VPU_{54sat}	1.70	3.85	6.99	-	1.03	-	15.48	-	21.68	-	-	-	-	-	9.88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VPU_{150sat}	2.46	5.18	8.56	-	3.26	-	18.37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N	1.66	2.92	3.09	3.75	1.73	8.85	8.60	14.86	-	0.53	-	-	-	-	-	-	58.26	49.27	10.84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela VII: Importância relativa (%) das variáveis de previsão no modelo RM (f_t : tração)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
VPU_{150d}	8.95	26.03	-	38.19	-	45.53	-	90.21	-	88.70	-	93.70	-	95.36	-
VPU_{150sat}	4.86	-	9.38	-	15.40	-	14.91	-	62.31	-	62.71	-	68.31	-	76.99
n	4.65	3.42	4.49	9.86	7.43	6.77	7.82	0.04	1.65	-	-	4.46	31.11	3.85	4.55
ρ	0.04	0.00	0.03	0.75	0.02	-	-	4.25	13.48	5.02	29.25	-	-	0.79	18.46
G_f	3.88	4.21	3.25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
w_c	0.02	0.00	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
k_0	70.64	56.64	77.10	51.20	77.15	47.70	77.27	-	-	-	-	-	-	-	-
d_u	6.96	9.66	5.76	-	-	-	-	5.49	22.55	6.28	8.04	1.84	0.58	-	-

Tabela VIII: Importância relativa (%) das variáveis de previsão no modelo RNA (f_t : tração)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
VPU_{150d}	16.39	3.07	-	32.44	-	7.89	-	87.67	-	78.17	-	76.16	-	90.20	-
VPU_{150sat}	2.16	-	12.66	-	13.13	-	3.08	-	42.22	-	45.30	-	17.32	-	22.48
n	2.35	8.04	8.91	36.49	38.87	29.50	0.66	2.18	17.92	-	-	7.41	22.90	3.79	26.92
ρ	4.09	6.81	11.14	12.12	18.67	-	-	2.19	18.09	10.14	14.98	-	-	6.01	50.60
G_f	6.00	2.11	23.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
w_c	8.03	0.24	4.46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
k_0	34.91	62.61	6.00	18.95	29.33	62.61	96.26	-	-	-	-	-	-	-	-
d_u	26.06	17.12	33.80	-	-	-	-	7.96	21.77	11.69	39.72	16.42	59.78	-	-

Tabela IX: Importância relativa (%) das variáveis de previsão no modelo MVS (f_t : tração)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
VPU_{150d}	19.65	24.15	-	51.58	-	65.11	-	64.72	-	59.74	-	60.81	-	90.77	-
VPU_{150sat}	1.37	-	2.37	-	27.99	-	32.23	-	49.41	-	47.77	-	57.57	-	39.87
n	0.59	0.54	0.49	18.61	1.89	20.62	8.90	5.99	17.17	-	-	27.35	27.54	7.79	7.24
ρ	1.07	2.77	1.75	12.83	16.55	-	-	17.16	21.82	17.55	36.20	-	-	1.44	52.89
G_f	2.98	7.58	9.76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
w_c	0.40	1.29	0.06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
k_0	66.64	53.15	72.18	16.98	53.57	14.27	58.88	-	-	-	-	-	-	-	-
d_u	7.30	10.51	13.38	-	-	-	-	12.12	11.60	22.71	16.02	11.83	14.89	-	-

Tabela X: Importância relativa (%) das variáveis de previsão modelo RM (E : amostras secas)

Comb.	1	2	3	4
VP_{150d}	81.09	93.84	78.67	-
f_c	15.73	-	21.33	91.56
n	3.18	6.16	-	8.44

Tabela XI: Importância relativa (%) das variáveis de previsão modelo RNA (E : amostras secas)

Comb.	1	2	3	4
VP_{150d}	57.27	91.51	96.65	-
f_c	30.69	-	3.35	91.56
n	12.04	8.49	-	8.44

Tabela XII: Importância relativa (%) das variáveis de previsão modelo MVS (E : amostras secas)

Comb.	1	2	3	4
VP_{150d}	80.51	90.61	77.99	-
f_c	16.06	-	22.01	80.75
n	3.43	9.39	-	19.25

Tabela XIII: Importância relativa (%) das variáveis de previsão modelo RM (E : valores médios)

Comb.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
f_t	-	-	-	-	-	-	-	7.14	2.55	-	-	-	-	5.87	6.33
n	11.2	1.44	39.43	6.68	49.63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ρ_d	8.17	-	-	-	-	0.01	-	17.79	-	21.1	-	-	-	-	-
ρ_{sat}	-	8.74	-	-	-	-	0	-	3.14	-	5.84	-	-	-	-
f_c	-	-	-	-	-	86.19	71.3	-	-	-	-	71.47	86.56	-	-
VP_{U150d}	80.64	-	60.57	-	-	13.8	-	81.48	-	78.9	-	-	13.44	94.13	-
$VP_{U150sat}$	-	89.82	-	93.34	-	-	28.7	-	94.31	-	94.16	28.53	-	-	93.67
N	-	-	-	-	50.37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela XIV: Importância relativa (%) das variáveis de previsão modelo RNA (E : valores médios)

Comb.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
f_t	-	-	-	-	-	-	-	7.14	2.55	-	-	-	-	7.68	3.66
n	41.33	1.439	43.99	6.68	48.85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ρ_d	33.07	-	-	-	-	0	-	36.83	-	75.87	-	-	-	-	-
ρ_{sat}	-	8.73	-	-	-	-	17.05	-	3.14	-	2.56	-	-	-	-
f_c	-	-	-	-	-	86.23	11.92	-	-	-	-	71.47	17.12	-	-
VP_{U150d}	25.6	-	56.01	-	-	13.76	-	56.03	-	24.13	-	-	82.88	92.32	-
$VP_{U150sat}$	-	89.83	-	93.34	-	-	71.03	-	94.31	-	97.44	28.53	-	-	96.34
N	-	-	-	-	51.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela XV: Importância relativa (%) das variáveis de previsão modelo MVS (E : valores médios)

Comb.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
f_t	-	-	-	-	-	-	-	11.12	38.57	-	-	-	-	14.07	8.05
n	1.55	17.99	20.92	5.293	59.77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ρ_d	0.27	-	-	-	-	0.19	-	10.34	-	12.89	-	-	-	-	-
ρ_{sat}	-	6.98	-	-	-	-	3.92	-	12.59	-	12.08	-	-	-	-
f_c	-	-	-	-	-	45.75	53.20	-	-	-	-	56.13	69.51	-	-
VP_{U150d}	98.18	-	79.08	-	-	54.06	-	78.54	-	87.11	-	-	30.49	85.93	-
$VP_{U150sat}$	-	75.03	-	94.71	-	-	42.87	-	48.85	-	87.92	43.87	-	-	91.95
N	-	-	-	-	40.23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Dados obtidos por Luzio (2010)

Tabela XVI: Granito azul de Gonça. Coeficiente de variação entre parêntesis (%)

Direção	Provete	f_c (MPa)	E (GPa)	VPU (m/s)	n (%)
1 _ 4	1	174.13	78.01	5710.68	0.35
	2	172.21	43.39	5660.43	0.35
	3	127.78	20.47	5696.28	0.34
	4	115.24	18.73	5681.82	0.31
	5	120.71	74.84	5710.68	0.28
Média		142.01 (20.28)	47.09 (60.55)	5691.98 (0.37)	0.35 (9.82)
2 _ 5	1	172.28	59.37	5710.68	0.39
	2	175.58	48.55	5660.43	0.37
	3	-	-	5696.28	0.38
	4	132.73	27.17	5681.82	0.38
	5	137.35	29.44	5710.68	0.37
Média		154.49 (14.61)	41.13 (37.65)	5691.98 (0.37)	0.38 (2.13)
3 _ 6	1	197.09	78.70	5717.93	0.38
	2	172.69	54.30	5747.18	0.31
	3	128.52	80.28	5754.55	0.34
	4	156.91	182.72	5761.86	0.38
	5	145.43	30.18	5717.93	0.31
Média		160.13 (16.37)	82.23 (68.31)	5739.89 (0.36)	0.35 (10.76)

Tabela XVII: Granito amarelo de Mondim de Basto. Coeficiente de variação entre parêntesis (%)

Direção	Provete	f_c (MPa)	E (GPa)	VPU (m/s)	n (%)
1 _ 4	1	61.27	61.07	3012.30	2.23
	2	70.94	63.05	3254.80	2.22
	3	77.73	86.12	3106.50	2.36
	4	82.48	17.49	3294.60	2.15
	5	73.18	32.83	3169.80	2.09
Média		73.12 (10.90)	52.11 (51.91)	3167.60 (3.59)	2.21 (4.67)
2 _ 5	1	77.96	33.59	2929.40	2.40
	2	50.64	60.60	2864.90	2.05
	3	80.02	45.03	2984.10	2.47
	4	82.85	33.25	2955.00	2.37
	5	-	-	2941.70	2.13
Média		72.86 (20.52)	43.12 (29.87)	2935.02 (1.50)	2.29 (7.98)
3 _ 6	1	60.39	39.35	3011.30	2.36
	2	87.76	35.27	3054.90	2.23
	3	83.84	28.93	3098.20	2.38
	4	-	-	3108.00	2.29
	5	76.46	-	3048.90	2.42
Média		77.11 (15.68)	34.52 (15.22)	3064.26 (1.28)	2.34 (3.30)