



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Avaliação do comportamento material e  
estrutural de construções em xisto

Ricardo Freitas Lima da Silva Barros

UMinho | 2013

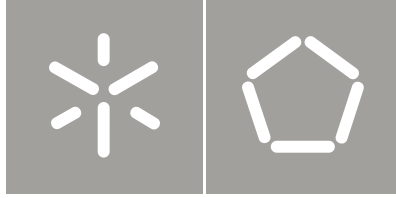
Ricardo Freitas Lima da Silva Barros

Avaliação do comportamento material e  
estrutural de construções em xisto

Dezembro de 2013







Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Ricardo Freitas Lima da Silva Barros

Avaliação do comportamento material e  
estrutural de construções em xisto

Tese de Doutoramento  
Engenharia Civil

Trabalho efectuado sob a orientação do  
Professor Doutor Daniel V. Oliveira  
Universidade do Minho  
Professor Doutor Humberto Varum  
Universidade de Aveiro

É autorizada a reprodução integral desta tese apenas para efeitos de investigação, mediante declaração escrita do interessado, que a tal se compromete.

Universidade do Minho, Dezembro de 2013.

Assinatura:

**...aos meus pais**



## AGRADECIMENTOS

A investigação apresentada nesta tese foi realizada no departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho em Portugal. Ao ISISE (Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering) agradece-se o apoio no desenvolvimento da investigação. A investigação foi financiada desde 2012 pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através da bolsa individual de doutoramento SFRH/BD/82600/2011.

Os meus mais sinceros agradecimentos aos meus orientadores, Prof. Doutor Daniel V. Oliveira e Prof. Doutor Humberto Varum, por toda a ajuda, pela inteira disponibilidade, pelos importantes conselhos, pelo exemplo de profissionalismo e dedicação e sobretudo pela amizade.

Ao Prof. Doutor Carlos Alves do departamento de Ciências da Terra da Universidade do Minho pela ajuda e conhecimentos na área da geologia. Ao Prof. Doutor Aires Camões do departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho pelos conselhos no âmbito da análise do material.

Os trabalhos experimentais não seriam possíveis sem o apoio dos técnicos de laboratório da Universidade do Minho nomeadamente António Matos e Marco Jorge do Laboratório de Estruturas, José Gonçalves do Laboratório de Geotecnia, Carlos Jesus e Fernando Pokee do Laboratório de Materiais de Construção. Muito obrigado pela ajuda, interesse, conselhos e amizade. Agradeço também à Rosa Carmo pela preciosa ajuda no trabalho experimental.

Agradeço às empresas Solicel e Soardosia pelo fornecimento de xisto e à empresa ArteCanter pelo trabalho de preparação dos provetes de xisto.

Aos meus colegas e amigos agradeço o companheirismo e a amizade que nos uniu ao longo destes anos. Um agradecimento especial ao Rui Silva pela troca de ideias e pela ajuda no estudo dos solos.

Agradeço a toda a minha família em especial aos meus pais, pela paciência nos momentos mais difíceis, pelo apoio incondicional e pelo amor. Sem eles nada seria possível.



## RESUMO

As construções tradicionais em alvenaria de xisto fazem parte do vasto património edificado universal. Pese o extenso património edificado e a inegável importância histórica e cultural das construções em alvenaria de xisto, são poucos os estudos caracterizadores do seu comportamento mecânico. Assim, pretende-se com o presente estudo contribuir para o conhecimento científico neste domínio através da caracterização detalhada do comportamento mecânico das alvenarias tradicionais de xisto, possibilitando a preservação e salvaguarda deste património.

Em Portugal continental, as alvenarias em xisto encontram-se espalhadas ao longo de várias regiões do território nacional, variando as tipologias das construções, as metodologias construtivas e até o próprio xisto. As metodologias construtivas foram desenvolvidas em direta relação com vários fatores que as influenciaram, adaptando-se a diferentes ambientes e requisitos, dando origem a uma grande diversidade de tipologias que hoje existem no território Português. Neste estudo são apresentadas e analisadas diferentes tipologias e metodologias construtivas. São também apresentados os principais danos observados nas construções tradicionais de alvenaria de xisto.

O xisto utilizado nas construções tradicionais de alvenaria era tipicamente extraído do local de implantação, ou nas vizinhanças, das construções. Na presente tese caracterizam-se amostras de xisto de cinco zonas distintas do território nacional, nomeadamente, Vila Nova de Foz Côa, Serra de Arga, Barqueiros, Carrazedo de Montenegro e Sobral de São Miguel. A análise efetuada aos xistos das diferentes regiões permitiu alcançar a caracterização dos xistos quanto à porosidade, densidade, resistência mecânica e resistência à cristalização de sais.

Realizaram-se em laboratório ensaios mecânicos para a determinação da resistência à compressão uniaxial de prismas e da resistência à compressão diagonal de paredes de alvenaria de xisto, contemplando ainda a existência de reforço estrutural. Foi reproduzida a tipologia murária mais comum, de dois paramentos, com recurso a materiais e técnicas construtivas tradicionais. Os resultados obtidos permitiram avaliar as propriedades mecânicas das alvenarias de xisto, perceber o seu funcionamento estrutural e avaliar a eficácia de dois sistemas de reforço estudados.





## **ABSTRACT**

The traditional schist masonry constructions are part of the vast universal architectural heritage. Although the extensive built heritage and undeniable historical and cultural significance of the traditional schist constructions, studies aiming at the characterization of its mechanical behavior are scarce. Therefore, this study is intended to contribute to scientific knowledge within this field through the detailed characterization of the mechanical behavior of traditional schist masonry, allowing the preservation and safeguarding of this heritage.

There are many buildings in schist masonry spread all over Portugal, varying the buildings typology, the constructive techniques and even the type of schist. The constructive methodologies of these traditional structures have been developed in direct relation with the various influencing factors, adaptation to different environments and requirements, originating a wide diversity of typologies still existing in the Portuguese territory. This study presents and analyzes different typologies and construction methodologies. The main damage types observed in the traditional schist masonry constructions are also presented.

The schist used in traditional masonry constructions is typically extracted from the construction site. This study provides a characterization of schist's from five distinct areas of Portugal. Tests have been carried out to characterize schist's regarding porosity, density, mechanical strength and resistance to salt crystallization.

Prisms and walls made of schist were prepared in the laboratory to assess the compressive strength and the diagonal compressive strength, respectively, considering also the presence of strengthening. The most common schist masonry typology (two leaves) was reproduced using traditional building techniques. The results achieved allowed to determine the mechanical properties of the schist masonry, to interpret its structural behavior and to assess the efficiency of the adopted strengthening systems.



## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	v
RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	ix
ÍNDICE.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xv
ÍNDICE DE TABELAS .....	xxv
Capítulo 1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Objetivos e metodologia.....	2
1.2 Estrutura da tese.....	4
Capítulo 2 ESTADO DA ARTE .....	7
2.1 Geologia da Península e de Portugal .....	7
2.2 Rochas metamórficas.....	9
2.3 Xisto .....	16
2.4 Ensaios laboratoriais a xistos do território nacional.....	19
2.4.1 Estudo do xisto de Trás-os-Montes e Alto Douro .....	20
2.4.2 Estudo do xisto de Vila Nova de Foz Côa.....	22
2.4.3 Estudo do xisto do Baixo Alentejo .....	24
2.5 A aplicabilidade do xisto .....	28
2.6 Tipologias das construções em xisto .....	32
2.7 Caracterização experimental de elementos de alvenaria .....	36
2.7.1 Ensaios de compressão uniaxial .....	37
2.7.2 Ensaios de compressão diagonal .....	38
Capítulo 3 LEVANTAMENTO CONSTRUTIVO E DE DANOS .....	41
3.1 Construções tradicionais de xisto .....	41
3.1.1 Aspetos gerais.....	43
3.1.2 Fundações .....	45

3.1.3 Paredes .....	46
3.1.4 Cunhais.....	50
3.1.5 Pavimentos .....	51
3.1.6 Aberturas .....	52
3.1.7 Escadas.....	54
3.1.8 Cobertura.....	54
3.2 Construções de elevado valor patrimonial .....	56
3.2.1 Castelos .....	56
3.2.2 Edifícios religiosos.....	57
3.2.3 Pontes .....	58
3.3 Outras construções .....	61
3.3.1 Moinhos .....	61
3.3.2 Muros .....	62
3.4 Levantamento estatístico.....	64
3.4.1 Vilar de Mouros (Minho).....	66
3.4.2 Barqueiros (Minho).....	68
3.4.3 Carrazedo de Montenegro (Trás-os-Montes).....	69
3.4.4 Castelo Maior (Beiras).....	70
3.4.5 Piódão (Beiras).....	72
3.4.6 Mértola (Alentejo).....	73
3.4 Danos comuns nas alvenarias de xisto.....	75
3.4.1 Alterabilidade das rochas .....	75
3.4.2 Danos relacionados com os elementos pétreos .....	78
3.4.3 Destacamento ou deterioração do reboco .....	81
3.4.4 Alteração ou ausência da argamassa de assentamento.....	82
3.4.5 Fendilhação ou deformação de elementos em aberturas.....	82
3.4.6 Fissuração nas paredes .....	83

3.4.7 Colapso parcial de elementos .....	85
3.4.8 Colapso total da construção ou ruína.....	87
Capítulo 4 CARACTERIZAÇÃO MATERIAL DO XISTO .....	89
4.1 Microscopia ótica .....	93
4.2 Absorção de água à pressão atmosférica .....	95
4.3 Absorção de água por capilaridade.....	100
4.4 Velocidade de propagação de sons.....	104
4.5 Dureza superficial com esclerómetro de Schmidt .....	107
4.6 Resistência à compressão axial .....	110
4.7 Resistência à carga de ponta.....	113
4.8 Resistência à cristalização de sais .....	119
4.9 Comparação entre ensaios .....	122
4.9.1 Comparação entre ensaios para a determinação de resistências mecânicas .....	123
4.9.2 Comparação entre a resistência à compressão axial e os resultados dos ensaios não destrutivos.....	125
4.9.3 Comparação entre resistência à cristalização de sais e os restantes ensaios .....	129
4.10 Considerações finais .....	132
Capítulo 5 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE ALVENARIA DE XISTO.....	133
5.1 Caracterização das argamassas.....	134
5.1.1 Granulometria do solo .....	134
5.1.2 Presença de cal.....	136
5.1.3 Limites e atividade da argila.....	137
5.2 Argamassas produzidas em laboratório.....	140
5.2.1 Argamassa de terra .....	141
5.2.2 Argamassa de terra artificial.....	142
5.3 Resistência à compressão uniaxial de provetes de alvenaria de xisto.....	147
5.3.1 Preparação dos provetes .....	147

5.3.2 Esquema e procedimento de ensaio .....	149
5.3.3 Resultados dos ensaios.....	151
5.3.4 Modos de rotura .....	153
5.3.5 Análise comparativa.....	154
5.4 Resistência à compressão diagonal em alvenaria de xisto.....	156
5.4.1 Preparação das paredes .....	156
5.4.2 Esquema e procedimento de ensaio .....	159
5.4.3 Resultados das paredes não reforçadas .....	162
5.4.4 Metodologias de reforço adotadas .....	165
5.4.5 Resultados das paredes reforçadas com preenchimento de junta .....	169
5.4.6 Resultados dos ensaios das paredes reforçadas com preenchimento de junta e cordões metálicos.....	172
5.4.7 Análise comparativa.....	174
Capítulo 6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	177
6.1 Conclusões .....	177
6.2 Trabalhos futuros .....	179
REFERÊNCIAS.....	181
ANEXOS .....	189

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Unidades estruturais da Península Ibérica: 1. Bacias Cenoantropozóicas; 2. Cadeias Mesoceno-zóicas; 2. Cadeias Alpinas; 4. Maciço Hispérico (Aires-Barros, 2001).....	8
Figura 2.2 – Grandes unidades litoestratigráficas de Portugal continental (Marques <i>et al</i> , 2006).....	8
Figura 2.3 – Xistosidade: a) Orientação paralela regular; b) Orientação paralela prismática (Blyth e Freitas, 1984).....	13
Figura 2.4 – Micaxistos com segregação de quartzo (Qu) e moscovite (M) (Bell, 2007). ....	14
Figura 2.5 – Caracterização estrutural de uma rocha metamórfica deformada (Kornprobst, 2002).....	14
Figura 2.6 – Classificação das rochas metamórficas, adaptação de Blyth e Freitas (1984).....	15
Figura 2.7 – Rochas metamórficas. a) Mármore; b) Gnaisse; c) Granulito; d) Quartzito; e) Eclogito; f) Xisto; g) Serpentino; h) Anfibolito; i) Corneana. ....	16
Figura 2.8 – Xisto originário de: a) Minho, b) Trás-os-Montes, b) Beiras. ....	17
Figura 2.9 – Diferentes tipos de xistos: a) Micaxisto; b) Xisto mosqueado; c) Filito; d) Xisto verde; e) Xisto clorítico; f) Xisto actinolítico; g) Ardósia.....	18
Figura 2.10 – Mapa litológico de Portugal continental (adaptado de Rochas de Portugal). ....	19
Figura 2.11 – Esquema dos três planos de ensaio (Burcio, 2004).....	24
Figura 2.12 – Diferentes aldeias do xisto em Portugal: a) Vilar de Mouros; b) Piodão.....	29
Figura 2.13 – Construções em xisto no mundo: a) Portugal; b) Califórnia (Stone Quarries and Beyond, 2008); c) Bélgica (Tony Renard, 2008); d) França (Outsider Environments, 2013); e) Nova Iorque (Sindo’s NYC, 2013); f) Grécia (University of Delaware, 2013); g) Espanha (Chozas de Piedra, 2008); h) Itália (Sibille, 2013); i) Irlanda (Ireland a celtic Jaunt, 2012).....	29
Figura 2.14 – Construções em xisto: a) Capela (Carvalho, 2008); b) Pontes (Pereira, 2006); c) Muro (Ribeiro <i>et al.</i> , 2008).....	31
Figura 2.15 – Geologia na região do Minho e Douro (Associação dos Arquitetos Portugueses, 1980).....	33
Figura 2.16 – Localização das diferentes tipologias de casas em Portugal continental (Moutinho, 1995).....	34

Figura 2.17 – Construção com mistura de xisto e calhaus rolados de granito (Associação dos Arquitetos Portugueses, 1980). .....	35
Figura 2.18 – Construção em alvenaria de xisto em Monsaraz e Alcoutim (Associação dos Arquitetos Portugueses, 1980). .....	36
Figura 2.19 – Diferentes arranjos estruturais da alvenaria: a) seca, desalinhada, aleatória; b) ordinária, desalinhada, aleatória; c) aparelhada, irregular alinhada, aleatória; d) aparelhada, horizontal, corrigida à fiada e com cunhas; d) mista (Barroso, 2012). .....	37
Figura 2.20 – Ensaio de compressão diagonal: a) norma ASTM E519-02; b) Brignola <i>et al.</i> (2008), c) Corradi <i>et al.</i> (2002), d) Borri <i>et al.</i> (2011). .....	39
Figura 2.21 – Ensaio de compressão diagonal: a) esquema do ensaio; b) círculo de Mohr (Avorio <i>et al.</i> , 2002). .....	39
Figura 3.1 – Exemplos de construções em xisto: a) Vila de Mouros; b) Carrazedo de Montenegro; c) Vila Nova de Foz Côa; d) Paul; e) Mértola. ....	44
Figura 3.2 – Construção com brasão e capela (Vilar de Mouros). .....	44
Figura 3.3 – Fundação superficial em xisto aparelhado numa construção em Barqueiros (Barroso, 2012). .....	46
Figura 3.4 – Paredes: a) com um paramento (Vilar de Mouros); b) com dois paramentos (Cortes do Meio); c) com três paramentos (Carrazedo de Montenegro). .....	47
Figura 3.5 – Ligantes: a) sem ligante (Carrazedo de Montenegro); b) argamassa de terra (Carrazedo de Montenegro); c) argamassa de cimento (Vilar de Mouros). .....	48
Figura 3.6 – Barro: a) barro amassado; b) assentamento do xisto (Ribeiro <i>et al.</i> , 2008). .....	49
Figura 3.7 – Exemplos de paredes de xisto rebocadas: a) Vilar de Mouros; b) Santa Maria de Émeres. ....	50
Figura 3.8 – Paredes divisórias: a) associação de elementos de xisto e de granito (Vilar de Mouros); b) tabique (Carrazedo de Montenegro). .....	50
Figura 3.9 – Cunhais: a) xisto (Carrazedo de Montenegro); b) granito (Vilar de Mouros). ....	51
Figura 3.10 – Pavimentos em madeira (Vilar de Mouros). .....	51
Figura 3.11 – Exemplos de pavimentos exteriores em Piódão realizados com elementos de: a) grandes dimensões; b) pequenas dimensões. ....	52
Figura 3.12 – Lintéis: a) madeira (Gimonde); b) granito (Vilar de Mouros). .....	53



Figura 3.13 – Estruturas das aberturas: a) elementos monolíticos em xisto (Vilar de Mouros); b) estrutura em madeira trabalhada (Santa Maria de Émeres); c) estrutura de madeira simples (Gimonde); d) estrutura em granito trabalhada (Vilar de Mouros). .....	53
Figura 3.14 – Exemplos de escadas exteriores nas construções tradicionais em xisto da região de Trás-os-Montes: a) Gimonde; b) Santa Maria de Émeres. ....	54
Figura 3.15 – Estrutura de coberturas com elementos de madeira (Vilar de Mouros).....	55
Figura 3.16 – Revestimento das coberturas das construções em xisto: a) com palha (Carrazedo de Montenegro); b) com ardósia (Piódão); c) com telha cerâmica (Carrazedo de Montenegro). .....	56
Figura 3.17 – Fortalezas na região de Trás-os-Montes: a) Castelo de Bragança; b) Torre de Mogadouro. ....	57
Figura 3.18 – Fortalezas na região do Alentejo: a) Castelo de Mértola; b) Castelo de Portel. ....	57
Figura 3.19 – Edifícios religiosos: a) Igreja Paroquial de Nossa Senhora da Conceição, Piódão, Arganil b) Igreja de São Pedro, Piódão, Arganil.....	58
Figura 3.20 – Ponte Velha em Gimonde, Distrito de Bragança. ....	59
Figura 3.21 – Ponte de Castro de Avelãs. ....	59
Figura 3.22 – Ponte do Porto, Milhão, Bragança. ....	60
Figura 3.23 – Pontes em Piódão. ....	60
Figura 3.24 – Ponte de Mértola. ....	61
Figura 3.25 – Moinhos de vento de Tavira (Ribeiro <i>et al.</i> , 2008).....	62
Figura 3.26 – Azenhas de Mértola.....	62
Figura 3.27 – Muros: a) muro e pequena construção executados com junta seca (Serra de Arga); b) muro executado com xisto e calhaus rolados de granito (Paul).....	63
Figura 3.28 – Capeamento: a) horizontal (Vila de Mouros); b) inclinado (Carrazedo de Montenegro); c) apumado (Gimonde).....	64
Figura 3.29 – Dados retirados dos Censos nacionais de 2011 relativos aos edifícios construídos até 1945 (INE, 2013): a) Construções de acordo com o número de pisos; b) Tipo de estrutura; c) Tipo de revestimento; d) Tipo de cobertura; e) Tipo de revestimento em coberturas inclinadas; f) Estado de conservação. ....	66

Figura 3.30 – Dados retirados dos censos de 2011 dos edifícios existentes em Vila de Mouros construídos até 1945 (INE, 2013): a) Construções de acordo com o número de pisos; b) Tipo de estrutura; c) Tipo de revestimento; d) Tipo de cobertura; e) Tipo de revestimento em coberturas inclinadas; f) Estado de conservação.....	67
Figura 3.31 – Dados retirados dos censos de 2011 dos edifícios existentes em Barqueiros construídos até 1945 (INE, 2013): a) Construções de acordo com o número de pisos; b) Tipo de estrutura; c) Tipo de revestimento; d) Tipo de cobertura; e) Tipo de revestimento em coberturas inclinadas; f) Estado de conservação.....	69
Figura 3.32 – Dados retirados dos censos de 2011 dos edifícios existentes em Carrazedo de Montenegro construídos até 1945 (INE 2013): a) Construções de acordo com o número de pisos; b) Tipo de estrutura; c) Tipo de revestimento; d) Tipo de cobertura; e) Tipo de revestimento em coberturas inclinadas; f) Estado de conservação. ....	70
Figura 3.33 – Dados retirados dos censos de 2011 dos edifícios existentes em Castelo Maior construídos até 1945 (INE, 2013): a) Construções de acordo com o número de pisos; b) Tipo de estrutura; c) Tipo de revestimento; d) Tipo de cobertura; e) Tipo de revestimento em coberturas inclinadas; f) Estado de conservação.....	71
Figura 3.34 – Dados retirados dos censos de 2011 dos edifícios existentes em Piódão construídos até 1945 (INE, 2013): a) Construções de acordo com o número de pisos; b) Tipo de estrutura; c) Tipo de revestimento; d) Tipo de cobertura; e) Tipo de revestimento em coberturas inclinadas; f) Estado de conservação.....	73
Figura 3.35 – Dados retirados dos censos de 2011 dos edifícios existentes em Mértola construídos até 1945 (INE, 2013): a) Construções de acordo com o número de pisos; b) Tipo de estrutura; c) Tipo de revestimento; d) Tipo de cobertura; e) Tipo de revestimento em coberturas inclinadas; f) Estado de conservação.....	74
Figura 3.36 – Erosão do xisto numa habitação na zona de Arganil.....	78
Figura 3.37 – Erosão de xisto em habitações de Trás-os-Montes.....	80
Figura 3.38 – Fratura de pedras de xisto (Carrazedo de Montenegro). ....	81
Figura 3.39 – Deterioração e destacamento do reboco (Vilar de Mouros). ....	81
Figura 3.40 – Danos em padieiras: a) flexão em padieira de madeira (Gimonde); b) fissura em padieira de granito (Vilar de Mouros).....	83
Figura 3.41 – Fendas diagonais (Carrazedo de Montenegro). ....	84

Figura 3.42 – Diversas fissuras nas paredes originadas pela alteração do meio circundante à construção (Bragança).....	84
Figura 3.43 – Danos em paredes duplas: a) colapso do paramento exterior (Santa Maria de Émeres); b) barriga na zona da empena e fachada principal (Santa Maria de Émeres). .....	85
Figura 3.44 – Flexão de paredes com dois paramentos: a) afastamento dos paramentos exteriores; b) flexão de ambos os paramentos na mesma direção (Tubi, 2006).....	86
Figura 3.45 – Colapso: a) Parede de fachada (Vilar de Mouros); b) Cunhal (Carrazedo de Montenegro). .....	87
Figura 3.46 – Exemplos de estruturas de elevado valor patrimonial ou cultural em ruína: a) ponte sobre o rio Guadiana em Mértola; b) aldeias do xisto em Arganil.....	87
Figura 3.47 – Construções de xisto em estado de ruína (Santa Maria de Émeres). .....	88
Figura 4.1 – Locais de extração do xisto ensaiado. ....	90
Figura 4.2 – Provetes: a) Vila Nova de Foz Côa; b) Serra de Arga; c) Carrazedo de Montenegro; d) Sobral de São Miguel; e) Barqueiros.....	91
Figura 4.3 – Direções de ensaio: a) Normal ao plano de anisotropia; b) Paralela ao plano de anisotropia (adaptado de EN 1926:2006). ....	91
Figura 4.4 – Imagens de microscopia ótica com ampliação 6x: a) FC; b) SA; c) CM; d) SM; e) BA.....	94
Figura 4.5 – Imagens de microscopia ótica com ampliação 50x: a) FC; b) CM; c) SM; d) BA. ....	95
Figura 4.6 – Ensaio de absorção de água à pressão atmosférica. ....	96
Figura 4.7 – Absorção de água à pressão atmosférica: a) Percentagem de absorção máxima por tipo de xisto; b) Percentagem de absorção em relação ao tempo de absorção.....	97
Figura 4.8 – Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	100
Figura 4.9 – Coeficiente de absorção de água por capilaridade para ambas as direções: a) FC; b) SA; c) CM; d) SM; e) BA. ....	101
Figura 4.10 – Absorção de água por capilaridade: a) FC direção normal; b) FC direção paralela; c) SA direção normal; d) SA direção paralela; e) CM direção normal; f) CM direção paralela; g) SM direção normal; h) SM direção normal; i) BA direção normal; j) BA direção paralela.....	104

Figura 4.11 – Ultrassons: a) Realização do ensaio; b) Esquema do ensaio de ultrassons na direção normal ao plano de anisotropia (adaptado de EN 12504-4).....	105
Figura 4.12 – Comparação entre direção normal e a média das direções paralelas S1 e S2.	106
Figura 4.13 – Dureza superficial.....	109
Figura 4.14 – Ensaio de resistência à compressão uniaxial. ....	110
Figura 4.15 – Ensaio de resistência à compressão axial.....	111
Figura 4.16 – Ensaio de carga pontual.....	114
Figura 4.17 – Coeficiente de correção (adaptado de ISRM, 1985).....	115
Figura 4.18 – Requisitos sobre as formas dos provetes: a) teste diametral; b) teste axial; c) teste sobre elemento regular; d) teste sobre elemento irregular (adaptado de ISRM, 1985).	116
Figura 4.19 – Resultados dos ensaios de carga de ponta. ....	117
Figura 4.20 – Ensaio de resistência à cristalização de sais.....	120
Figura 4.21 – Comparação entre a resistência à compressão axial e o índice de carga de ponta: a) Direção normal; b) Direção paralela.....	124
Figura 4.22 – Comparação entre a resistência à compressão axial e a dureza superficial: a) Direção normal; b) Direção paralela.....	125
Figura 4.23 – Comparação entre a dureza superficial e o índice de carga de ponta: a) Direção normal; b) Direção paralela.....	125
Figura 4.24 – Comparação entre a resistência à compressão e a absorção de água à pressão atmosférica: a) Direção normal; b) Direção paralela. ....	126
Figura 4.25 – Comparação entre a resistência à compressão e a absorção de água por capilaridade: a) Direção normal; b) Direção paralela. ....	127
Figura 4.26 – Comparação entre a absorção de água à pressão atmosférica e absorção de água por capilaridade: a) Direção normal; b) Direção paralela.....	128
Figura 4.27 – Comparação entre a resistência à compressão e a velocidade de propagação de ultrassons na direção normal de ensaio.....	129
Figura 4.28 – Comparação entre o ensaio de resistência à cristalização de sais e o ensaio de resistência à compressão: a) Direção normal; b) Direção paralela. ....	130

Figura 4.29 – Comparação entre o ensaio de resistência à cristalização de sais e o ensaio de absorção de água à pressão atmosférica. ....	130
Figura 4.30 – Comparação entre o ensaio de resistência à cristalização de sais e o ensaio de absorção de água por capilaridade: a) Direção normal; b) Direção paralela.....	131
Figura 4.31 – Comparação entre o ensaio de resistência à cristalização de sais e o ensaio de propagação de ultrassons: b) Direção normal; b) Direção paralela.....	131
Figura 5.1 – Construções de onde foram extraídas as amostras de argamassa de terra para caracterização: a) Local de extração da amostra A; b) Local de extração da amostra B. ....	134
Figura 5.2 – Curvas granulométricas obtidas para as duas amostras de argamassa recolhidas. ....	135
Figura 5.3 – Adição de ácido clorídrico nas amostras de argamassa. ....	136
Figura 5.4 – Ensaio de azul-de-metileno: a) Esquema de ensaio; b) Mancha no papel de filtro. ....	139
Figura 5.5 – Ábaco para a caracterização do grau de atividade da fração argilosa dos solos (Fabbri, 1994). ....	140
Figura 5.6 – Local de extração de solo. ....	141
Figura 5.7 – Preparação em laboratório da argamassa de terra. ....	141
Figura 5.8 – Ensaio de resistência mecânica à flexão das amostras de argamassa de terra. ..	142
Figura 5.9 – Curva granulométrica do pó de calcário. ....	143
Figura 5.10 – Soluções e densímetro na execução do ensaio de Bouyoucos. ....	144
Figura 5.11 – Curva granulométrica da argamassa de terra artificial.....	146
Figura 5.12 – Ensaio de resistência mecânica à flexão da argamassa de terra artificial.....	146
Figura 5.13 – Preparação de prismas de xisto: a) Prismas com argamassa de terra; b) Prismas com argamassa artificial. ....	148
Figura 5.14 – Prismas de alvenaria de xisto: a) Prismas com argamassa de terra; b) Prismas com argamassa artificial. ....	149
Figura 5.15 – Esquema de ensaio adotado no ensaio de compressão axial dos prismas.....	149
Figura 5.16 – Prisma com superfície nivelada. ....	150

Figura 5.17 – Medição dos deslocamentos: a) Distanciamento entre pontos de medição (adaptado de EN 1052-1); b) Chapas de fixação e transdutores numa face do prisma.....	150
Figura 5.18 – Curvas tensão-extensão axial dos ensaios de compressão uniaxial para: a) Prismas com argamassa de terra; b) Prismas com argamassa de terra artificial. ....	153
Figura 5.19 – Padrão típico de fissuração de prismas ensaiados em compressão axial: a) Prismas com argamassa de terra; b) Prismas com argamassa de terra artificial. ....	154
Figura 5.20 – Envolvente das tensões-extensões da alvenaria de xisto sujeita a compressão axial.....	155
Figura 5.21 – Xisto utilizado na construção das paredes de alvenaria. ....	157
Figura 5.22 – Construção das paredes de alvenaria de xisto. ....	158
Figura 5.23 – Paredes concluídas.....	159
Figura 5.24 – Esquema de ensaio para determinação da resistência à compressão diagonal das paredes. ....	160
Figura 5.25 – Base de madeira de suporte das paredes com peça destacável para encaixe da cunha do dispositivo de ensaio.....	160
Figura 5.26 – Cunhas: detalhes, dimensões e ligação às paredes. ....	161
Figura 5.27 – Ensaio de compressão diagonal: a) Esquema de disposição dos transdutores de deslocamento; b) Transdutores de deslocamento fixos na parede. ....	161
Figura 5.28 – Ensaio de compressão diagonal.....	162
Figura 5.29 – Gráficos tensão-extensão do ensaio de compressão diagonal das paredes não reforçadas. ....	163
Figura 5.30 – Estado final dos ensaios de resistência à compressão diagonal em paredes não reforçadas; a) NR1; b) NR2; c) NR3. ....	165
Figura 5.31 – Diferentes fases do processo de preenchimento de junta: a) Argamassa removida; b) Preenchimento das juntas de metade da parede; c) Preenchimento das juntas de toda a parede. ....	167
Figura 5.32 – Localização dos cordões metálicos de reforço da parede.....	167
Figura 5.33 – Fibras de aço da Hardwire: a) Fibras de aço usadas; b) Cordão metálico extraído.....	168
Figura 5.34 – Conexão entre varões roscados e cordões metálicos.....	168

Figura 5.35 – Paredes de alvenaria de xisto: a) alvenaria de xisto não reforçada; b) alvenaria de xisto reforçada..... 169

Figura 5.36 – Gráficos tensão-extensão do ensaio de compressão diagonal das paredes reforçadas com preenchimento de junta. .... 170

Figura 5.37 – Estado final dos ensaios de resistência à compressão diagonal em paredes reforçadas com o preenchimento da junta; a) DR1; b) DR2. .... 171

Figura 5.38 – Gráficos tensão-extensão do ensaio de compressão diagonal das paredes reforçadas com preenchimento de junta e cordões metálicos..... 173

Figura 5.39 – Estado final dos ensaios de resistência à compressão diagonal em paredes reforçadas com o preenchimento da junta e cordões metálicos; a) DRB1; b) DRB2; c) DRB3. .... 174





## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resultados dos ensaios físico-mecânicos (Noronha <i>et al.</i> , 2011).....	21
Tabela 2.2 – Utilizações mais recomendadas (Noronha <i>et al.</i> , 2011). .....	21
Tabela 2.3 – Composição química (Burcio, 2004).....	23
Tabela 2.4 – Resultado dos ensaios efetuados por diferentes autores de caracterização do xisto (Burcio, 2004).....	23
Tabela 2.5 – Tensão resistente à compressão (Burcio, 2004). .....	24
Tabela 2.6 – Composição química das amostras de xistos (Pinho, 2003).....	25
Tabela 2.7 – Quadro síntese dos resultados dos ensaios físicos (Pinho, 2003).....	26
Tabela 2.8 – Resultados dos ensaios de expansibilidade (Pinho, 2003). .....	26
Tabela 2.9 – Quadro resumo dos ensaios de previsão de alterabilidade (Pinho, 2003). .....	27
Tabela 2.10 – Quadro síntese dos resultados de ultrassons e mecânicos (adaptado de Pinho, 2003).....	27
Tabela 2.11 – Valores máximos, mínimos e médio da resistência à compressão uniaxial e do módulo de deformabilidade (Pinho, 2003).....	28
Tabela 4.1 – Nomenclatura dotada para os provetes. ....	92
Tabela 4.2 – Resultados obtidos nos ensaios de absorção de água à pressão atmosférica (Ab). .....	96
Tabela 4.3 – Classificação da porosidade (adaptado de Bell, 2007). .....	98
Tabela 4.4 – Classificação da porosidade dos xistos ensaiados. ....	98
Tabela 4.5 – Absorção de água à pressão atmosférica de diferentes rochas. ....	99
Tabela 4.6 – Densidade e porosidade de diferentes rochas. ....	99
Tabela 4.7 – Resultados obtidos nos ensaios de absorção de água por capilaridade. ....	102
Tabela 4.8 – Coeficiente de absorção de água por capilaridade de diferentes rochas.....	104
Tabela 4.9 – Resultados obtidos em ensaio de ultrassons. ....	105
Tabela 4.10 – Velocidade de propagação de sons em diferentes rochas.....	106
Tabela 4.11 – Resultados obtidos em ensaio com esclerómetro de Schmidt. ....	108

Tabela 4.12 – Dureza superficial de diferentes rochas. ....	109
Tabela 4.13 – Resultados obtidos em ensaio de compressão axial. ....	110
Tabela 4.14 – Classificação da resistência mecânica à compressão uniaxial (adaptado de Bell, 2007). ....	112
Tabela 4.15 – Classificação da resistência mecânica à compressão uniaxial de xistos. ....	112
Tabela 4.16 – Resistência à compressão de diferentes rochas. ....	113
Tabela 4.17 – Resultados obtidos em ensaio de carga de ponta. ....	116
Tabela 4.18 – Classificação da resistência à carga de ponta (adaptado de Bell, 2007). ....	117
Tabela 4.19 – Classificação da resistência à carga de ponta de xistos. ....	118
Tabela 4.20 – Resistência à carga de ponta de diferentes rochas. ....	118
Tabela 4.21 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à cristalização de sais. ....	119
Tabela 4.22 – Resultados qualitativos do ensaio de resistência à cristalização de sais. ....	121
Tabela 4.23 – Classificação da resistência à cristalização de sais de xistos. ....	122
Tabela 4.24 – Resultados obtidos em ensaios de caracterização da resistência mecânica. ...	123
Tabela 4.25 – Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização dos diferentes tipos de xisto analisados. ....	132
Tabela 5.1 – Limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade. ....	137
Tabela 5.2 – Classificação dos minerais de argila quanto à atividade (Fernandes, 2011). ....	138
Tabela 5.3 – Atividade de argilo-minerais em função do coeficiente de atividade (Fabbri, 1994). ....	140
Tabela 5.4 – Resultados dos ensaios de caracterização mecânica da argamassa de terra. ....	142
Tabela 5.5 – Resultados obtidos do ensaio de Bouyoucos. ....	144
Tabela 5.6 – Percentagens de constituintes granulométricos da terra artificial (em peso). ...	145
Tabela 5.7 – Ensaio de caracterização da argamassa de terra artificial. ....	146
Tabela 5.8 – Resultados dos ensaios dos prismas com argamassa de terra recolhida <i>in-situ</i> . ...	151
Tabela 5.9 – Resultados dos ensaios dos prismas com argamassa de terra artificial. ....	152
Tabela 5.10 – Comparação de resultados médios obtidos nos prismas realizados com argamassa de terra e prismas realizados com argamassa de terra artificial. ....	154

Tabela 5.11 – Resultados da resistência à compressão axial de diferentes tipos de alvenarias. .....	155
Tabela 5.12 – Resultados dos ensaios sobre as paredes de xisto não reforçadas. ....	162
Tabela 5.13 – Padrão de fissuração das paredes não reforçadas ensaiadas em compressão diagonal. ....	164
Tabela 5.14 – Resultados da compressão diagonal de diferentes tipos de alvenarias. ....	165
Tabela 5.15 – Resultados das paredes reforçadas com preenchimento de junta. ....	169
Tabela 5.16 – Padrão de fissuração das paredes reforçadas com preenchimento de junta.....	171
Tabela 5.17 – Resultados das paredes reforçadas com preenchimento de junta e cordões metálicos. ....	172
Tabela 5.18 – Padrão de fissuração das paredes reforçadas com preenchimento de junta e cordões metálicos. ....	173
Tabela 5.19 – Comparação de resultados médios obtidos nas paredes não reforçadas, paredes reforçadas com preenchimento de junta e paredes reforçadas com preenchimento de junta e cordões metálicos. ....	175



# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

As pedras naturais são, a par da terra e da madeira, o mais antigo material construtivo. A difusão deste material construtivo por todo o mundo deve-se não só às suas boas propriedades de resistência e durabilidade, mas sobretudo à facilidade de aplicação na construção de abrigos. A possibilidade de aplicação deste material sem qualquer alteração do seu estado natural permitiu a proliferação de diferentes metodologias construtivas com uma grande diversidade de tipos de rochas, normalmente existentes nas proximidades do local de implantação das construções.

As construções em xisto localizam-se especialmente em zonas onde existe xisto no solo. A facilidade da sua extração e aplicação permitiu que diversas tipologias construtivas proliferassem variando com os fatores culturais, sociais e económicos da região. Atualmente as construções em xisto representam um legado cultural, arquitetónico e histórico muito importante em Portugal e noutros países da Europa. No que concerne às construções em xisto, o património nacional não se restringe às construções rurais. São diversos os exemplos de construções monumentais existentes em Portugal, nomeadamente, fortificações, pontes e edificações religiosas que atribuem valor cultural e monumental às construções em xisto.

O património rural existente no território nacional, em particular na região das Beiras deu origem à marca turística das aldeias do xisto, comprovando o potencial turístico e económico que a construção tradicional de alvenaria de xisto possui em Portugal. Considerando que estas

construções encontram-se na sua maioria distribuídas nas regiões do interior do país, a valorização do potencial turístico do património rural das construções tradicionais de alvenaria de xisto poderá ser um fator importante na contribuição para a revitalização económica, social e cultural do interior de Portugal. A valorização do património nacional das construções tradicionais em xisto permitiria o desenvolvimento de ações para a recuperação e reabilitação do edificado, assim como, para a requalificação de monumentos e espaços urbanos.

## **1.1 Objetivos e metodologia**

Apesar da existência de construções em xisto em diferentes partes do mundo, existem pouquíssimos estudos sobre o comportamento estrutural deste tipo de construções. Assim, pretende-se que este estudo seja um contributo importante para o preenchimento desta lacuna existente no conhecimento, através da caracterização detalhada do comportamento material e estrutural das construções em xisto, contribuindo-se deste modo para a preservação e salvaguarda deste património.

Este trabalho de investigação tem a particularidade de interligar as diversas áreas de conhecimento envolvidas no estudo das construções tradicionais, como a geologia, a geografia, a arquitetura, a história e a engenharia. Para que os resultados deste estudo possam efetivamente contribuir para o avanço do conhecimento relativamente às construções em xisto, torna-se necessário adotar uma abordagem multidisciplinar, envolvendo todas as componentes relacionadas com o tema. Por outro lado, entende-se que esta abordagem holística é perfeitamente compatível com o aprofundamento da componente de trabalho relacionada com a engenharia, nomeadamente o comportamento material e estrutural das construções em xisto.

Desta forma, torna-se necessário estudar as características geológicas do xisto, assim como a distribuição geográfica desta rocha e das construções que utilizam este material. A história da aplicação do xisto na construção e o seu relacionamento com fatores socioeconómicos e demográficos, interligados com as tipologias construtivas nas diferentes zonas geográficas, permitem compreender melhor o comportamento destas estruturas.

No que concerne especificamente ao comportamento estrutural, existe um grande vazio de conhecimento relativamente ao funcionamento mecânico das estruturas em xisto. Desta forma, torna-se necessário um estudo pormenorizado com o intuito de caracterizar o comportamento mecânico relativo às diferentes tipologias e metodologias construtivas

tradicionais, criando assim as bases para um mais rigoroso processo de análise, dimensionamento e verificação da segurança das construções em xisto.

Com esta tese pretende-se desenvolver e aprofundar o conhecimento das construções em xisto, através do estudo destas construções tradicionais a nível geológico, histórico, arquitetónico, material e estrutural, no contexto Português. Assim, será possível caracterizar o comportamento mecânico destas estruturas e dos seus materiais constituintes, determinar a capacidade resistente e desenvolver metodologias de reforço adequadas, tendo em conta o seu valor patrimonial.

Resumidamente os principais objetivos do presente estudo são:

- Caracterizar as principais tipologias construtivas de alvenaria de xisto em Portugal;
- Caracterizar o comportamento mecânico e determinar as principais propriedades físicas e mecânicas dos diferentes tipos de xistos existentes no território nacional;
- Caracterizar o comportamento mecânico de paredes de alvenaria tradicional de xisto;
- Propor e estudar metodologias de reabilitação adequadas às construções tradicionais de alvenaria de xisto.

Para se atingir os objetivos propostos, começou-se por estudar e identificar os locais com presença de xisto. Paralelamente realizaram-se levantamentos das tipologias construtivas e mapeamento de danos nas regiões onde existem construções tradicionais de alvenaria de xisto. Foram recolhidas amostras de xisto em cinco localizações distintas tendo em comum a existência de construções de alvenaria tradicional de xisto e a presença de xisto no subsolo. Seguidamente, foram realizados ensaios laboratoriais aos diferentes tipos de xistos para a sua caracterização físico-química e mecânica.

Tendo em vista a realização de ensaios laboratoriais, procedeu-se à identificação das argamassas comumente aplicadas, tendo-se estudado amostras recolhidas *in-situ* e produzido argamassas em laboratório. Posteriormente, procedeu-se à construção de provetes e à realização de ensaios laboratoriais para a caracterização do comportamento mecânico da alvenaria de xisto. Realizaram-se campanhas de ensaios para a determinação da resistência mecânica à compressão de prismas construídos com dois tipos de argamassa. Para a determinação da resistência ao corte e do módulo de distorção foram realizados ensaios de compressão diagonal em paredes. Os ensaios de caracterização mecânica da alvenaria foram concluídos com a execução e ensaio em compressão diagonal de duas propostas de reforço em paredes de xisto.

## 1.2 Estrutura da tese

No capítulo 2, apresenta-se uma visão geral do estado da arte no âmbito das diferentes áreas disciplinares relacionadas com a temática das construções de alvenaria de xisto, nomeadamente a geologia, a arquitetura, os materiais construtivos e as estruturas. Assim, apresentam-se os principais aspetos relacionados com a geologia com particular incidência nas rochas metamórficas concretamente nos diferentes xistos existentes. São também apresentados e analisados os principais resultados de ensaios a amostras de xisto de três estudos elaborados em diferentes zonas do país, nomeadamente, Trás-os-Montes, Beiras e Alentejo. Será ainda abordada a aplicabilidade na construção do xisto no território nacional, assim como as principais características tipológicas das construções de xisto. No final do capítulo apresentam-se os aspetos gerais da análise experimental das construções de alvenaria, dando-se particular relevo aos ensaios de compressão uniaxial e aos ensaios de compressão diagonal, dado que estes ensaios foram realizados na campanha experimental desenvolvida neste estudo.

No capítulo 3 apresenta-se a caracterização das principais tipologias das construções tradicionais de alvenaria de xisto, assim como os principais danos observados neste tipo de construção. Neste capítulo são detalhados os principais aspetos arquitetónicos e construtivos dos edifícios em alvenaria estrutural de xisto. São também apresentados os principais tipos de construções de xisto nacionais, como castelos, edifícios religiosos, pontes, moinhos e muros. No que concerne aos danos observados, inicia-se com uma abordagem geral da alterabilidade das rochas apresentando-se uma análise dos principais danos dos elementos pétreos. São também apresentados os diversos danos físicos, químicos e mecânicos relacionados com as construções tradicionais de alvenaria de xisto.

O capítulo 4 é dedicado à caracterização material do xisto. São apresentados os resultados obtidos na campanha de ensaios experimentais desenvolvida sob amostras de xisto provenientes de cinco regiões de Portugal, em termos das principais propriedades físico-químicas e mecânicas. É ainda realizada uma análise comparativa entre os xistos provenientes das diferentes regiões, assim como uma análise comparativa dos diferentes ensaios realizados.

No capítulo 5 apresenta-se a caracterização do comportamento estrutural das alvenarias tradicionais de xisto. São descritos e apresentados os resultados dos ensaios realizados às diferentes argamassas utilizadas na preparação das alvenarias de xisto. Neste capítulo descrevem-se os trabalhos de execução de prismas e paredes de xisto, bem como os respetivos



resultados da campanha experimental, nomeadamente ensaios para determinação da resistência mecânica à compressão axial e ensaios para a determinação da resistência mecânica à compressão diagonal. São também apresentadas duas propostas de reforço, assim como os resultados e respetiva análise dos ensaios realizados a paredes reforçadas. Em conjunto, o capítulo 4 e o capítulo 5 permitem a caracterização aprofundada do comportamento mecânico das alvenarias tradicionais de xisto.

Por último, no capítulo 6 apresentam-se as conclusões finais deste estudo e propostas de trabalhos futuros na sequência do estudo desenvolvido.



## Capítulo 2

# ESTADO DA ARTE

O presente capítulo aborda o estado do conhecimento relativo às construções tradicionais em alvenaria de xisto e os principais fatores relacionados com estas. Apresenta-se o enquadramento do xisto na vertente geológica, concretamente abordando a sua origem metamórfica, a distribuição geográfica das rochas metamórficas, e do xisto em particular, no território nacional, assim como se apresenta uma caracterização dos diferentes tipos de xistos. Caracteriza-se também o xisto utilizado com função estrutural nas construções, as metodologias construtivas tradicionais e as diferentes tipologias das construções tradicionais de xisto em Portugal. No final do capítulo apresenta-se uma visão geral sobre alguns ensaios para a caracterização mecânica da alvenaria.

### **2.1 Geologia da Península e de Portugal**

A Península Ibérica é constituída por um soco cristalino dominado pelo Maciço Hespérico, também conhecido por Meseta Ibérica ou Maciço Antigo (Figura 2.1). Portugal continental faz parte da maior unidade morfoestrutural da Península Ibérica, o Maciço Antigo, que, de Espanha, entra largamente no nosso país, onde ocupa todo o Minho, Trás-os-Montes, a maior parte das Beiras e do Alentejo, formando um conjunto de troços aplanados.

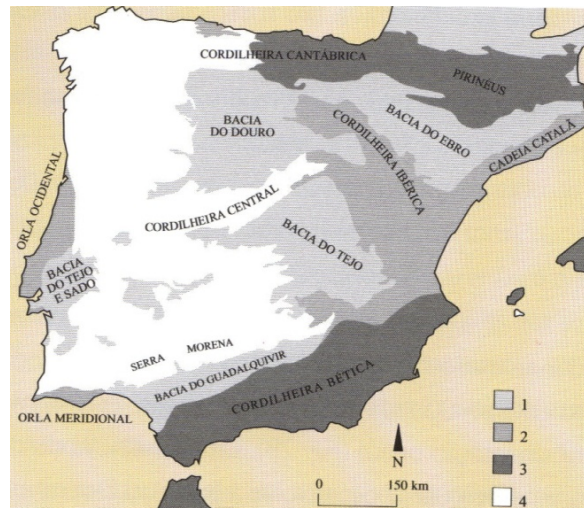


Figura 2.1 – Unidades estruturais da Península Ibérica: 1. Bacias Cenozoicas; 2. Cadeias Mesocenoicas; 3. Cadeias Alpinas; 4. Maciço Hispérico (Aires-Barros, 2001).

Do ponto de vista geológico, o território de Portugal continental divide-se nas seguintes unidades: o Maciço Antigo, as Orlas marginais cenozoicas ocidental e meridional e as Bacias inferiores dos rios Tejo e Sado (Figura 2.2). No Maciço Antigo, também conhecido por Meseta, predominam as rochas ígneas e metamórficas, enquanto nas restantes unidades predominam as rochas sedimentares. Estas grandes unidades têm correspondência nos tipos de rochas de construção que aí se encontram disponíveis, pelo que o património construído mostra um zonamento regional que reflete fortemente este enquadramento litoestratigráfico (Marques *et al.*, 2006).

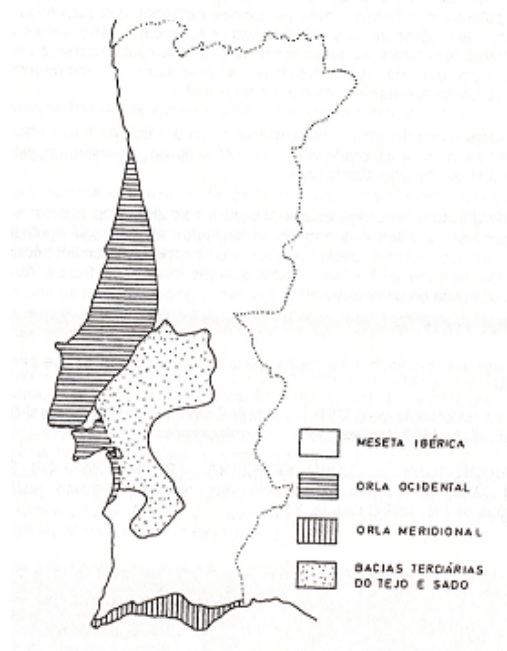


Figura 2.2 – Grandes unidades litoestratigráficas de Portugal continental (Marques *et al.*, 2006).

Cerca de sete décimos do território nacional continental são constituídos por um conjunto de rochas pré-câmbricas e paleozóicas, com predomínio de xistos, granitos e quartzitos, enrugados ou deslocados por vários ciclos orogénicos (Brito, 2008). Na sua maioria, o território nacional é dominado pelos granitos, existindo também uma grande prevalência de solos constituídos por xistos nas suas diversas formas. De facto, pelo património edificado antigo denota-se o extensivo recurso a estes dois tipos de rochas para a edificação. Em particular, os xistos existem em todo o norte do país, Beiras e grande parte do Alentejo.

Marques *et al.* (2006) refere que as rochas mais antigas de Portugal formam grupos litológicos muito heterogéneos, profundamente transformados devido aos sucessivos agentes tectónicos e erosivos que os afetaram. São de idade pré-câmbrica, quer seja designada por série negra, como alguns gnaisses, quartzitos e vulcanitos do Nordeste Alentejano, ou complexo xisto-grauváquico com grandes extensões de xisto na Beira e no leste do Douro. O restante território nacional é dominado pelas rochas sedimentares que se estendem por três zonas: a orla ocidental, a orla meridional e as bacias terciárias do Tejo e do Sado, tal como se pode observar na Figura 2.1.

## **2.2 Rochas metamórficas**

O metamorfismo é definido como a soma de todas as transformações que causam rearranjos dos elementos da rocha a uma escala atómica, levando a uma recristalização no estado sólido, com ou sem fase líquida, como resultado de variações na temperatura, pressão ou composição (Kornprobst, 2002). Por seu lado, Smulikowski (2007) considera que o metamorfismo é um processo que envolve alterações no conteúdo/composição dos minerais e/ou microestrutura da rocha predominantemente no estado sólido. Este processo é sobretudo devido a um ajustamento da rocha a condições físicas que diferem das que a rocha originalmente se formou e que também diferem das condições físicas que normalmente ocorrem na superfície da terra. Robertson (1999) descreve que a diversidade de rochas metamórficas resulta da combinação de efeitos de uma série de processos tectónicos e/ou metamórficos agindo num amplo espectro de protólitos que podem ser sedimentares, ígneos ou rochas que sofreram uma prévia metamorfose.

As rochas metamórficas têm origem na alteração de rochas pré-existentes através de ações derivadas de altas temperaturas e/ou pressões. Montgomery (2008) refere que a temperatura requerida para a formação de rochas metamórficas não é tão alta como a temperatura do

magma, de facto podem ocorrer alterações significativas nas rochas a temperaturas bem abaixo das temperaturas necessárias para as derreter.

Segundo Robertson (1999), o metamorfismo engloba todas as alterações de estado sólido que ocorrem entre os estados limites superior e inferior do metamorfismo. Entende-se estado limite inferior, como o momento em que as transformações começam a ocorrer em rochas sedimentares pouco depois da deposição e estado limite superior quando a rocha inicia a derreter não se comportando como um sólido. A transformação inicial é designada por diagénese, que segundo Árkai *et al.* (2007) corresponde a todas as alterações químicas, mineralógicas, físicas e biológicas sofridas por um sedimento após a deposição inicial e durante e após litificação, exclusiva da alteração superficial e de metamorfismo. No entanto, Robertson (1999) considera que a fronteira entre a diagénese e o metamorfismo é algo arbitrária e muito dependente da litologia envolvida.

Por sua vez, Marques *et al.* (2006), mencionam que o metamorfismo engloba as numerosas transformações, mineralógicas, químicas e estruturais sofridas pelas rochas sólidas ao serem submetidas às condições físico-químicas existentes nas profundidades abaixo da diagénese. Os minerais deixam de ser estáveis e desaparecem originando a formação de outras fases minerais estáveis nas novas condições. As transformações originadas pelas substituições de minerais e texturas podem acontecer de forma conjunta ou separada, mas, em qualquer caso, são sempre função do tipo e da intensidade do metamorfismo sofrido e da litologia da rocha envolvida no processo.

Kornprobst (2002) refere que o metamorfismo geralmente ocorre em condições de temperatura e pressão superiores à diagénese, mas a natureza intrínseca dos mecanismos físico-químicos é a mesma em ambos os processos. O metamorfismo é geralmente relacionado com o fenómeno orgânico ou pré-orgânico enquanto a diagénese está relacionada com a dinâmica das bacias sedimentares.

O metamorfismo causa alterações na textura, na estrutura e, em certas situações, até nos minerais constituintes das rochas, modificando as suas propriedades físicas. As modificações podem melhorar algumas propriedades mecânicas, como também podem diminuir a resistência da rocha (Johnson e De Graff, 1988).

O calor e a pressão normalmente fazem com que os minerais recristalizem, sendo que os minerais originais podem formar grandes cristais com ligações muito fortes entre si ou, pelo contrário, podem desaparecer por completo e surgirem novos minerais dadas as novas temperaturas e pressões. A pressão pode originar a deformação das rochas, compressões, trações ou flexões, sempre durante o estado sólido da rocha (Montgomery, 2008).

A natureza dos minerais das rochas metamórficas, assim como a matriz de texturas que estes apresentam, demonstra que a recristalização é produzida a uma certa profundidade abaixo da superfície da terra e, desta forma, perante temperaturas e pressões relativamente elevadas (Kornprobst, 2002). De facto, a ocorrência das transformações mineralógicas e estruturais com a rocha no estado sólido, é uma das principais características do metamorfismo. Outra característica importante do metamorfismo é a de que as rochas a ele submetidas continuam a manter basicamente a sua composição química inicial, independentemente de se tratar de rochas ígneas ou sedimentares. Excetuando pequenas entradas ou saídas de água e de anidrido carbónico, a composição química média permanece inalterada (Marques *et al.*, 2006).

Segundo Kornprobst (2002), o rearranjo dos constituintes de uma rocha à escala atómica ou iónica, no decorrer de um metamorfismo, responde a solicitações termodinâmicas que levam à redução da energia total armazenada no sistema. Esta energia é armazenada nas rochas de três formas: energia de superfície ou superfícies intergranulares; energia de deslocação relacionada com deformações; energia de ligação electrostática entre átomos, também conhecida por energia livre. A minimização da superfície e a deslocação de energia leva a uma evolução textural das rochas.

Kornprobst (2002) define ainda que, no que concerne à reação dos minerais, estas tomam três formas principais: alteração da estrutura do mineral sem alteração da composição química; instabilidade entre uma ou mais fases minerais da rocha levando a reações minerais entre as fases; alterações na composição do sistema, como adição ou perda de fluídos ou catiões na solução que provocam reações minerais da forma.

O metamorfismo é distinguido em três classes diferentes, dependendo das reações exercidas pela temperatura e pressão, identificadas como metamorfismo: térmico ou de contacto, que depende da temperatura; burial ou de aprofundamento, que depende das tensões exercidas; regional, que depende da pressão e da temperatura. Caillegari e Petsev (2007) definem o metamorfismo de contacto ou térmico como um tipo de metamorfismo de extensão local, que afeta as rochas em redor de corpos de magma integrados numa variedade de ambientes, quer

sejam em zonas continentais quer em oceânicas. O magma é a fonte de calor, massa e energia mecânica necessária para este tipo de metamorfismo. A zona onde o metamorfismo de contacto ocorre designa-se por auréola de contacto enquanto o produto deste metamorfismo é designado por rocha de contacto. Este tipo de metamorfismo origina, fundamentalmente, recristalizações químicas nas rochas penetradas, como resposta ao aumento importante da temperatura, provocado pela intrusão, e à presença de fluídos quimicamente ativos nos poros e desprendidos pelo magma. Porque se trata de um processo fundamentalmente térmico, as deformações mecânicas não são importantes e as modificações texturais que surgem são originadas exclusivamente pela recristalização (Marques *et al.*, 2006).

Kornprobst (2002) menciona que a recristalização produzida durante o metamorfismo de contacto tem como causa direta observável a imediata proximidade das altas temperaturas da intrusão magmática. A intrusão transporta uma certa quantidade de calor que se difunde nas paredes frias das rochas e controla a formação de uma auréola de metamorfismo de contacto.

O metamorfismo burial ou de aprofundamento, origina-se em bacias sedimentares profundas, quando as rochas sedimentares, após a diagénese, atingem cerca de 10 km de profundidade e temperaturas de 300° C. Envolve fundamentalmente recristalizações químicas e a tensão tende a ser vertical, levando a que a foliação presente seja paralela à estratificação. Representa a primeira etapa do metamorfismo, logo após a diagénese e passa gradualmente ao metamorfismo regional à medida que a temperatura e pressão aumentam (Marques *et al.*, 2006). Smulikowski (2007) define que o metamorfismo burial é um tipo de metamorfismo, sobretudo de extensão local, que afeta rochas que se encontram a elevada profundidade sob um amontoado sedimentar-vulcânico e não é tipicamente associado com a deformação ou o magmatismo. As rochas resultantes são parcialmente ou completamente recristalizadas e geralmente sem xistosidade.

Relativamente ao metamorfismo regional, este resulta das tensões e do calor que as rochas estão sujeitas na formação de montanhas ou pelos movimentos das placas tectónicas (Montgomery, 2008). Segundo Marques *et al.* (2006), este metamorfismo origina os tipos de rochas metamórficas mais comuns (filitos, xistos, gnaisses e ardósias) e afeta regiões extensas e espessuras de rochas da ordem dos quilómetros.

Segundo Kornprobst (2002), em contraste com o metamorfismo de contacto, que está relacionado diretamente com a intrusão, o metamorfismo regional não tem uma causa diretamente observável. Este é desenvolvido numa vasta área e é acompanhado na maioria dos casos por diversas xistosidades e estiramentos lineares. Assim sendo, o metamorfismo



regional, de uma forma geral, resulta em recristalização dinâmica sob tensões anisotrópicas. Trata-se de um metamorfismo que se considera de multi-fases resultante da evolução das condições de recristalização ao longo do tempo.

Para além da influência da temperatura e pressão, fatores principais no metamorfismo, outro fator a ser considerado é o tempo. A duração dos processos de contacto, burial ou regional tem larga influência na definição final do elemento pétreo. A evolução temporal da pressão e temperatura dos sistemas metamórficos pode influenciar a sobreposição ou arranjo das rochas metamórficas pois, ao longo do tempo, as reações cinéticas minerais são geralmente menos rápidas do que a variação das condições de cristalização.

As altas temperaturas e as pressões que aumentam com a profundidade originam grandes deformações na crosta terrestre, sendo que, neste tipo de metamorfismo é comum a maioria dos materiais fluir sob a influência de tensões anisotrópicas ainda mais facilitadas se as reações metamórficas ocorrerem envolvendo rearranjos à escala cristalina. Tal resulta em rochas com textura mais ou menos achatada, conhecida por xistosidade ou foliação (Figura 2.3).

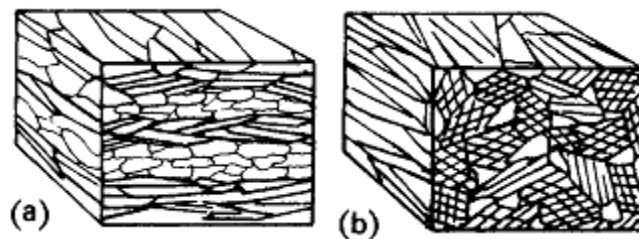


Figura 2.3 – Xistosidade: a) Orientação paralela regular; b) Orientação paralela prismática (Blyth e Freitas, 1984).

Segundo Bell (2007), a maioria das rochas metamórficas que sofreram deformações possuem uma orientação preferencial. Kornprobst (2002) refere que as estruturas mais comuns e mais características são as estruturas planares e lineares adquiridas durante a deformação e recristalização que acompanha o metamorfismo regional. A orientação preferencial pode ser exibida em estratificações lineares ou planas que permitem uma divisão mais fácil das rochas num sentido do que no outro.

A forma cristalina de um mineral metamórfico determina a forma como se desenvolveu, tendo em conta a velocidade da sua transformação perante as pressões e temperaturas. A estrutura de uma rocha metamórfica está relacionada com o arranjo dos minerais constituintes e com a

textura dos seus elementos nas três dimensões. De acordo com Bell (2007), os minerais são organizados em camadas paralelas ao longo da direção normal ao plano de corte da tensão, dando à rocha o carácter xistoso. Uma das famílias de minerais mais comum no desenvolvimento de xistosidade é a família das micas (ver Figura 2.4).

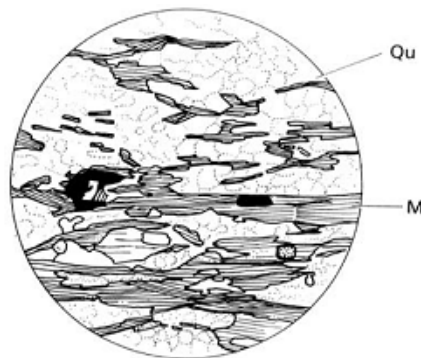


Figura 2.4 – Micaxistos com segregação de quartzo (Qu) e moscovite (M) (Bell, 2007).

Na Figura 2.5 ilustra-se a caracterização estrutural de uma rocha metamórfica deformada. À esquerda da figura é possível observar uma deformação moderada, enquanto à direita é possível observa-se uma deformação mais intensa. É possível também observar elementos de uma estrutura antigamente dobrada, assim como objetos comprimidos e sombras de pressão.  $S_n$  representa a xistosidade enquanto  $l_e$  representa um alongamento linear paralelo ao eixo  $x$ . A designação  $l_i$  representa os dois tipos de estratificações lineares paralelas ao eixo  $y$ .

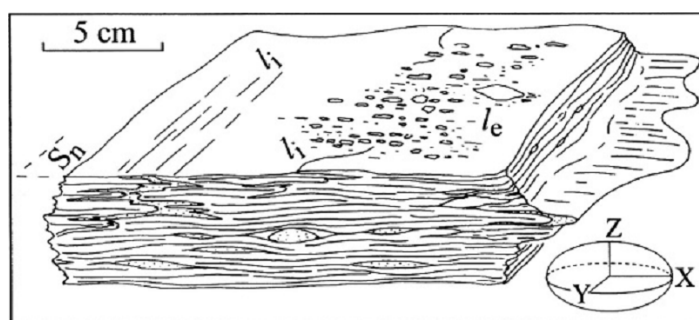


Figura 2.5 – Caracterização estrutural de uma rocha metamórfica deformada (Kornprobst, 2002).

A textura das rochas metamórficas pode ser distinguida em seis tipos diferentes; de textura foliada, originada por pressões podendo ser de clivagem ou de xistosidade dependendo respetivamente da menor ou maior foliação; de textura gnaissica, quando os planos de mineralização são de difícil identificação, mesmo sendo diferentes entre si, a identificação só se torna possível através da orientação paralela dos minerais mais escuros; de textura xistosa, quando a foliação é fina em rochas holocristalinas de grão médio; de textura pseudofórica,

quando existem cristais de grande dimensão; de textura granoblástica, tradicional do gnaisses, com a existência de cristais de quartzo ou feldspato equidistantes; de textura lepidoblástica, caracterizada pela existência de mica e clorite dispostos em lâminas ou sub-paralelamente (Marques *et al.*, 2006).

A classificação das rochas metamórficas baseia-se fundamentalmente na presença ou ausência de foliação. Blyth e Freitas (1984) referem que, as rochas metamórficas mais comuns são classificadas segundo bases que descrevem a anisotropia criada pela foliação (Figura 2.6).

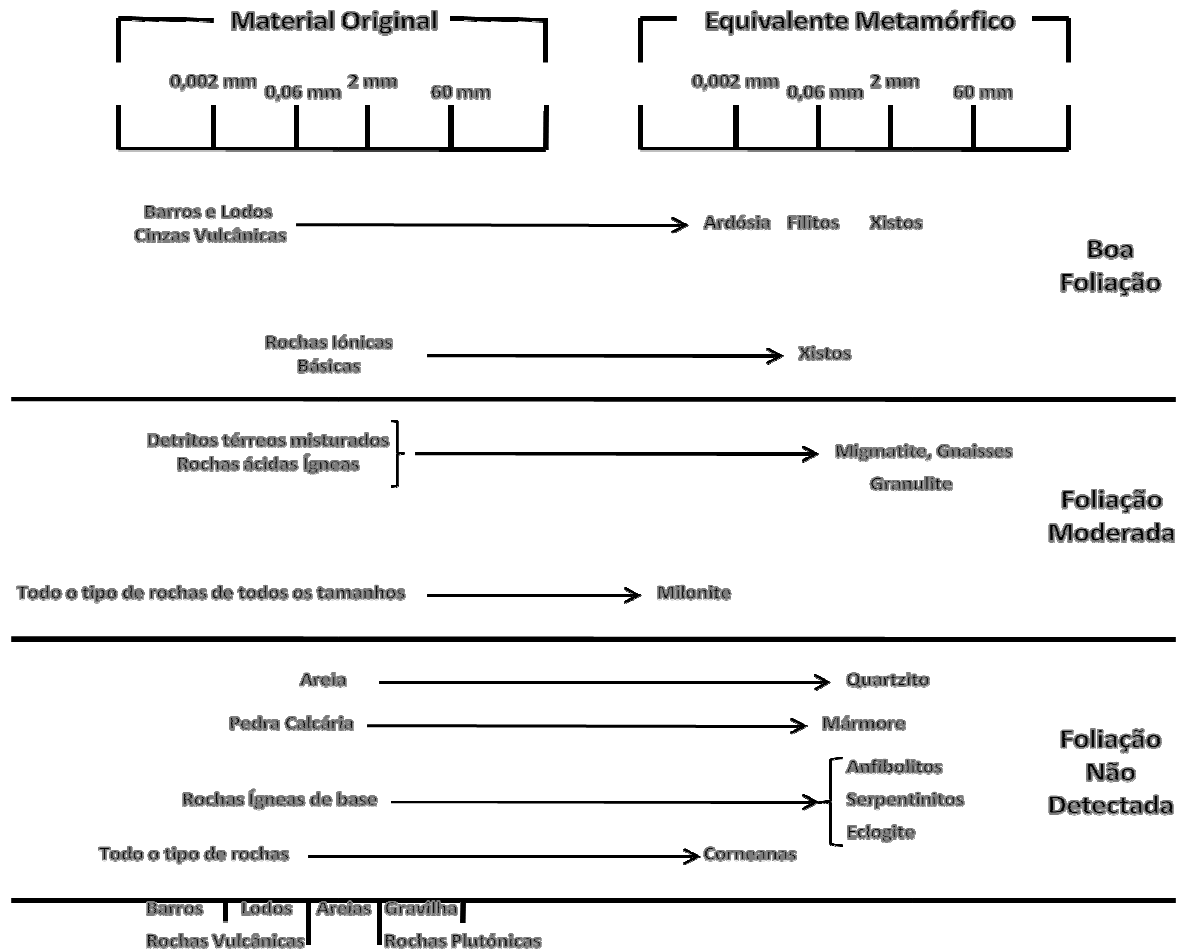


Figura 2.6 – Classificação das rochas metamórficas, adaptação de Blyth e Freitas (1984).

Por sua vez, Marques *et al.* (2006) referem que a natureza premetamórfica só é utilizada na nomenclatura das rochas metamórficas quando, a partir da composição da rocha metamórfica, é possível deduzir a sua composição original, sendo que, na classificação utilizam-se os prefixos; “orto”, quando a rocha original é de origem ígnea; “para”, quando a rocha original é de origem sedimentar; e “meta” quando a rocha não anulou completamente as características da rocha original.

Segundo Schmid *et al.* (2007), de uma forma geral as principais características das rochas metamórficas amplamente utilizadas para a classificação são: presença de minerais; estrutura da rocha; natureza da rocha antes do metamorfismo; condições genéticas do metamorfismo; composição química da rocha. Como explicado anteriormente, as duas primeiras características são as mais usadas na classificação, estão diretamente relacionadas e têm grande influência nas restantes.

Das principais rochas metamórficas aplicadas na construção encontram-se os mármore, gnaisses, granulitos, quartzitos, eclogitos, serpentinitos, anfibolitos, corneanas, e todos os xistos (Figura 2.7).

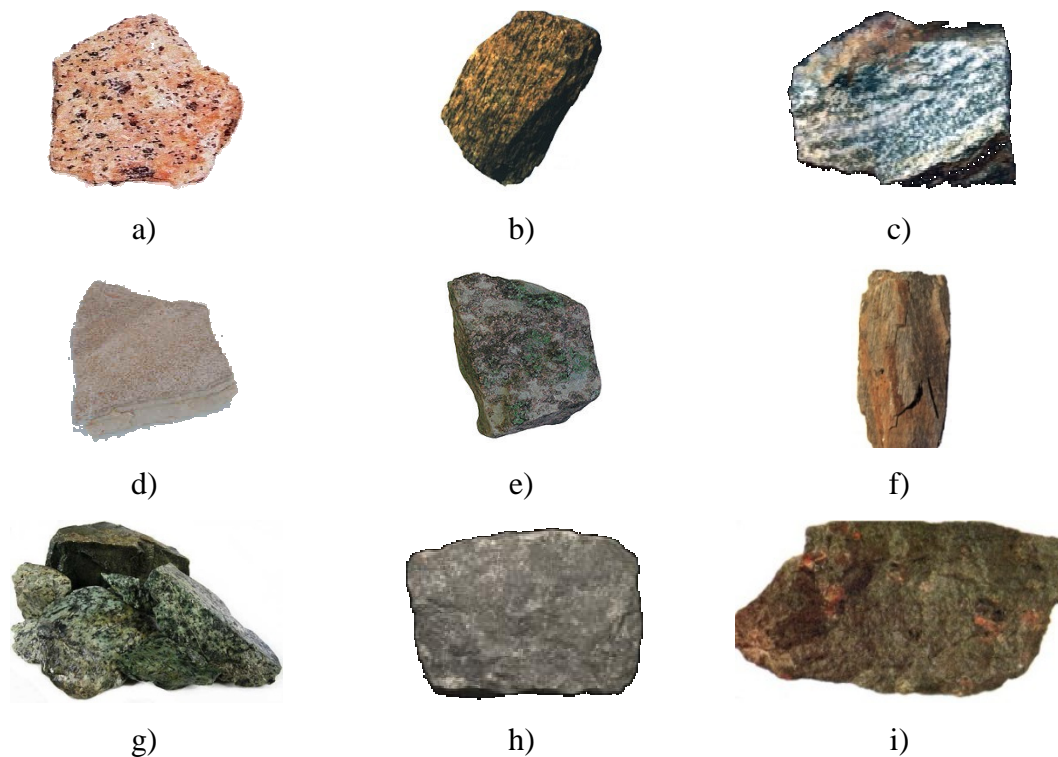


Figura 2.7 – Rochas metamórficas. a) Mármore; b) Gnaisse; c) Granulito; d) Quartzito; e) Eclogito; f) Xisto; g) Serpentino; h) Anfibolito; i) Corneana.

### 2.3 Xisto

O termo xisto deriva do grego “schistos” que significa folhelhos. Segundo Brodie *et al.* (2007), na sua forma mais simples o xisto pode ser associado a um processamento das rochas denominado xistosidade. No entanto a *Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks* (SCMR) define xisto como uma rocha com xistosidade bem desenvolvida. O termo xisto também pode ser aplicado a rochas que apresentam um fabrico linear em lugar de

xistosidade tendo planos de clivagem a uma escala de um centímetro ou menos. Nestes casos, pode ser aplicado o termo xisto linear.

É possível definir o xisto como sendo uma rocha metamórfica que tem uma estrutura xistosa de forma irregular ou plana, na qual são visíveis a olho nu as suas camadas minerais, ver Figura 2.8. Os xistos distinguem-se das outras rochas metamórficas pelo tamanho dos seus cristais minerais e, comparativamente à ardósia, a sua estrutura é mais enrugada e irregular. Estas rochas quebram-se facilmente pelos seus planos de xistosidade como as ardósias ao longo da sua linhagem.

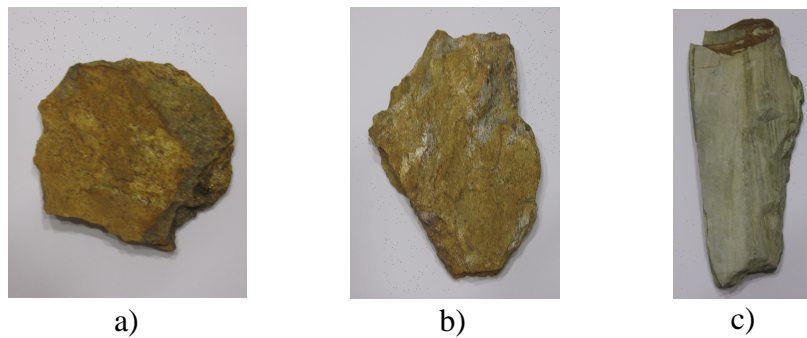


Figura 2.8 – Xisto originário de: a) Minho, b) Trás-os-Montes, b) Beiras.

O xisto tem uma xistosidade muito melhor definida do que os gnaisses. De acordo com Brodie *et al.* (2007) no que concerne ao conteúdo mineral, o xisto em relação aos gnaisses é mais rico em filosilicatos e mais pobre em minerais granulares como o quartzo e o feldspato.

De acordo com Brodie *et al.* (2007), foram distinguidos os termos clivagem e xistosidade. No entanto, foi subsequentemente reconhecido que não existe uma diferença significativa entre os dois termos. Apesar do idioma em que se designam os termos, existir ou não uma distinção, a SCMR indica que o termo xistosidade contempla ambos os termos clivagem e xistosidade. Se forem entendidos como termos distintos é conveniente interpretar clivagem como a propriedade de uma rocha quebrar em planos regulares paralelos ou sub-paralelos e xistosidade como a orientação preferencial dos minerais numa rocha. Na maioria da literatura, para evitar confusão entre os termos clivagem e xistosidade, é habitual a aplicação do termo foliação. Este termo foi usado em 1821 por Macculloch na classificação geológica das rochas e tem vindo a ser utilizado por diversos autores sendo adotado pela SCMR.

Dependendo das características intrínsecas dos xistos, estes adquirem diferentes nomenclaturas, podendo ser designados por xistos mosqueados, micaxistos, filitos, xistos verdes, xistos azuis, xistos cloríticos, xistos actinolíticos, xistos glaucofânicos ou xistos

esteatíticos (Figura 2.9). Apesar de possuírem uma estrutura mais regular, as ardósias também podem ser consideradas como um tipo de xisto.

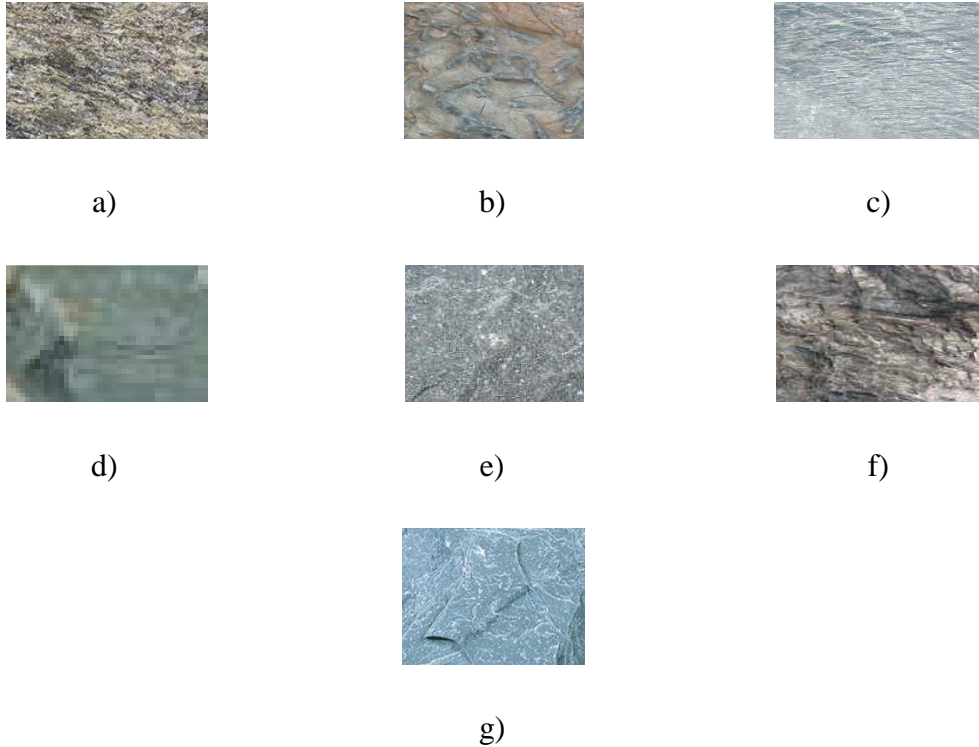


Figura 2.9 – Diferentes tipos de xistos: a) Micaxisto; b) Xisto mosqueado; c) Filito; d) Xisto verde; e) Xisto clorítico; f) Xisto actinolítico; g) Ardósia.

O metamorfismo regional, que origina os xistos, está relacionado com a pressão litostática que acontece em locais de formação de montanhas, como se pode observar através da distribuição das rochas em Portugal continental na Figura 2.10. A ação da pressão diminui a granulação das rochas fragmentando os seus cristais, transformando a rocha num elemento plano. O aumento da temperatura leva a um desenvolvimento maior da granulação (recristalização). Relacionado com o metamorfismo regional e através dos aspetos mencionados anteriormente, surgem dois grupos principais de rochas metamórficas: as rochas nas quais, a deformação predomina sobre a recristalização, que são rochas de granulação muito fina a fina e de estrutura muito plana (exemplo: a ardósia utilizada em coberturas); e as rochas nas quais a recristalização predomina sobre a deformação, que são rochas de granulação média a grossa e com estrutura menos plana ou mais irregular (exemplo: os xistos utilizados nas construções tradicionais objeto deste estudo).



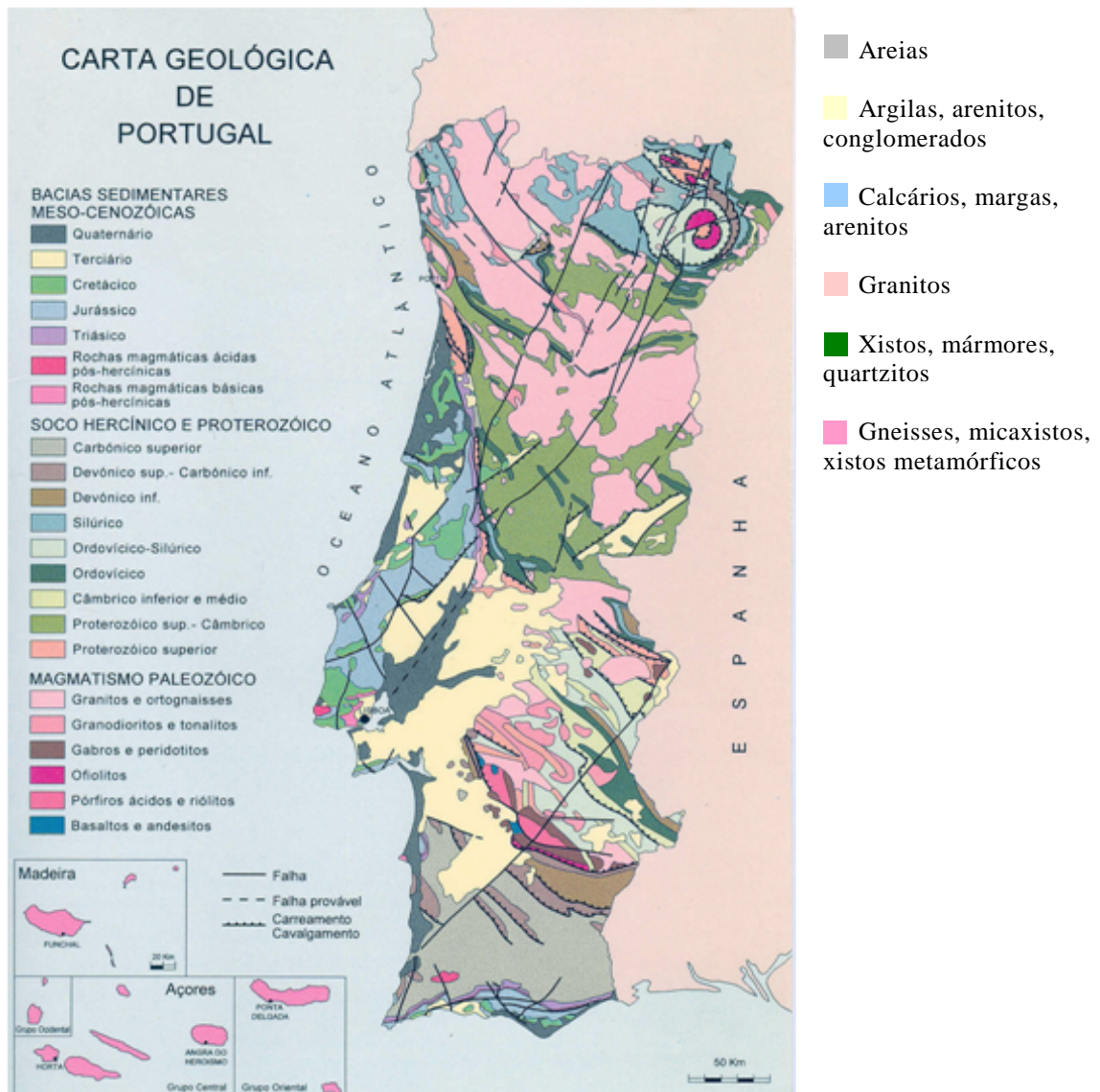


Figura 2.10 – Mapa litológico de Portugal continental (adaptado de Rochas de Portugal).

## 2.4 Ensaio laboratoriais a xistos do território nacional

As propriedades das pedras derivam das características físico-químicas dos materiais de que são constituídas e das características geométricas da sua estrutura. Entre as principais propriedades encontra-se a resistência à compressão, a resistência aos agentes atmosféricos e facilidade de ser trabalhada. Pode-se ainda considerar a permeabilidade, a inércia térmica e a durabilidade como características a ter em conta, dependendo da localização e utilização do edificado.

Apresenta-se de seguida o sumário dos principais resultados disponíveis na literatura para xistos de três zonas de Portugal, nomeadamente Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Nova de Foz Côa e Baixo Alentejo.

### **2.4.1 Estudo do xisto de Trás-os-Montes e Alto Douro**

O projeto “Schistoresource” (ver Noronha *et al.*, 2011) teve como objetivo primordial o aumento do conhecimento dos recursos geológicos de Trás-os-Montes e Alto Douro em particular os xistos. Neste estudo foram selecionadas 14 localizações distintas nas regiões de Trás-os-Montes e Alto Douro para a extração de amostras e posterior análise laboratorial. Entre os diferentes locais de extração analisados encontram-se as localizações de Poio, em Vila Nova de Foz Côa, e Zebras, em Valpaços. Realçam-se estas regiões neste estudo, dado que no capítulo 4, na caracterização material, serão apresentados estudos de xistos extraídos da mesma pedreira de Poio e de Carrazedo de Montenegro, que se localiza na proximidade de Zebras.

No estudo elaborado por Noronha *et al.* (2011) foram realizados estudos petrográficos químicos e tecnológicos, estudos de anisotropia da suscetibilidade magnética e ensaios físico-mecânicos. Nestes últimos foram realizados ensaios de determinação da resistência à compressão, determinação da resistência à flexão, determinação da densidade aparente e da porosidade aberta e determinação da absorção de água à pressão atmosférica. Foram ainda realizados ensaios de envelhecimento acelerado, concretamente a determinação da resistência ao desgaste e determinação da resistência ao envelhecimento por choque térmico.

Das análises petrográficas realizadas por Noronha *et al.* (2011) foi possível avaliar o potencial de reatividade aos álcalis quando utilizados os xistos no fabrico de betões. Como o quartzo, nas suas diferentes formas, está presente nestes xistos e sendo este uma das formas de sílica, desaconselha-se o uso destas rochas como agregado para betões.

Na Tabela 2.1 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios físico-mecânicos das 17 amostras recolhidas. Tendo em consideração os resultados obtidos, Noronha *et al.* (2011) fazem uma recomendação para os usos dos diferentes xistos ensaiados na zona de Trás-os-Montes e Alto Douro. Estas recomendações são apresentadas na Tabela 2.2.



Tabela 2.1 – Resultados dos ensaios físico-mecânicos (Noronha *et al.*, 2011).

	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à flexão (MPa)	Densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Porosidade aberta (%)	Absorção de água (%)	Resistência ao desgaste Máquina de Capon (mm)	Resistência ao envelhecimento por choque térmico (%)
Eucísia 1	53	16,3	2520	9,3	1,2	26	-0,01
Eucísia 2	51	9,8	2670	3,9	1,6	24,5	0,09
Nozelos	78	40,1	2740	1,3	0,6	24,5	0,02
Tanha	110	42,9	2760	1,3	0,5	26,5	-0,01
Poio Am	136	45,5	2700	1,1	0,5	20	0,03
Poio Az	114	61	2760	0,4	0,2	22	0,02
Pardelhas	42	55	2800	0,3	0,1	17,5	n.d.
Garraia 1	150	35,6	2630	1,6	0,7	19	0,07
Zebras 1	89	29,6	2630	0,8	0,3	18,5	0,01
Zebras 2	87	37,7	2650	0,8	0,3	16,5	0,03
Nogueira	76	26,7	2570	3,6	1,4	21	0,02
Palheiros	213	35,2	2670	1,2	0,5	18,5	0,00
Gimonde	39	10,5	2510	5,6	2,3	31,5	0,13
Aveleda	221	33,3	2670	1,4	0,5	17,5	0,27
Deilão	60	27,4	2560	5,6	2,2	25,5	0,19
Portelo	31	77,6	2740	2,2	0,9	28,0	n.d.
Cruzinha	51	18,2	2880	1,5	0,6	21,5	0,02

Tabela 2.2 – Utilizações mais recomendadas (Noronha *et al.*, 2011).

	Alvenarias rústicas	Alvenarias Resistentes/Pilares	Lintéis	Pavimentos	Revestimentos de paredes	Coberturas <sup>1)</sup>
Eucísia 1	X	X?		X (B)	X (1)	
Eucísia 2	X	X?		X (B)	X (1)	
Nozelos	X	X	X	X (C)	X	
Tanha	X	X	X	X (A)		X
Poio Am	X	X	X	X (E)	X	
Poio Az	X	X	X	X (C)	X	
Pardelhas	X	X	X	X (A)	X	X
Garraia 1	X	X		X (H)	X (1)	
Zebras 1	X	X		X (G)	X	
Zebras 2	X	X		X (I)	X	
Nogueira	X	X		X (F)		

Palheiros	X	X		X (G)	X	
Gimonde	X				X (1)	X?
Aveleda	X	X	X	X (I)		
Deilão	X	X		X (B)	X (1)	X?
Portelo	X			X (B)	X (1)	X
Cruzinha	X	X?		X (E)	X	

Legenda: X- Possibilidade de utilização <sup>1)</sup> Sob a forma de placas mais ou menos espessas, exceto para a ardósia de Pardelhas que também é utilizável sob a forma de soletos; X ?- Possibilidade de utilização com reservas; (1)- Interiores, de preferência; (A)- Tráfego fraco; (B)- Tráfego fraco, de preferência em interiores; (C)- Tráfego moderado; (D)- Tráfego moderado, de preferência em interiores; (E)- Tráfego forte a moderado; (F)- Tráfego forte a moderado, de preferência em interiores; (G)- Tráfego forte; (H)- Tráfego forte, com reservas para exteriores; (I)- Tráfego intenso; (J)- Tráfego intenso, com reservas para exteriores.

#### 2.4.2 Estudo do xisto de Vila Nova de Foz Côa

O estudo de Burcio (2004) teve como principal objetivo a obtenção dos parâmetros que controlam a distribuição espacial das pedreiras de xisto da região de Vila Nova de Foz Côa. A área geográfica cartografada neste estudo situa-se no distrito da Guarda tendo sido efetuados levantamentos nas zonas do Poio e Fariseu, bem como ao longo da margem esquerda do rio Côa em pleno parque arqueológico do vale de Côa. Foram também efetuados levantamentos em áreas dispersas, nomeadamente no Paço, Orgal e Castelo Melhor. Nesse trabalho foi dada maior ênfase ao estudo relativo à área das pedreiras de Poio, local onde se encontram as maiores pedreiras nacionais atualmente em atividade, e onde foi extraído xisto para o estudo que se apresenta no capítulo 4.

Segundo Burcio (2004), o metamorfismo desta região foi induzido no Paleozóico superior pela formação da Cadeia Varisca associado ao processo de metamorfismo regional. Em termos geológicos, na Cadeia Varisca apresenta-se um comportamento complexo devido à interferência dos fenómenos regionais com a instalação dos granitos pertencentes ao alinhamento magmático do Antiforma Lamego-Penedono-Escalhão. No que concerne à composição química, o estudo de Burcio (2004) refere que os xistos de Poio são bastante quartzosos o que lhe confere elevada durabilidade. Apesar da heterogeneidade da composição química do xisto em questão, é apresentada na Tabela 2.3 a composição química padrão.

Tabela 2.3 – Composição química (Burcio, 2004).

Composição química	Quantidade (%)
Óxido de silício SiO <sub>2</sub>	60
Óxido de alumínio Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20
Óxido de ferro Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9
Trióxido de Enxofre SO <sub>3</sub>	6
Outros (MgO, K <sub>2</sub> O, CaO, Na <sub>2</sub> O, TiO <sub>2</sub> )	5

Neste estudo, em termos de ensaios físicos e mecânicos laboratoriais apenas foram determinadas as resistências mecânicas à compressão uniaxial. No entanto, Burcio (2004) realça estudos prévios concluindo que os xistos do Poio são xistos de baixa permeabilidade, visto que a absorção é muito lenta. Refere ainda que em termos de alteração e alterabilidade pode-se concluir que fisicamente a rocha apresenta boa estabilidade, não sofrendo quase nenhuma modificação, enquanto quando sujeita a meios muito agrestes, muda de cor, de cinza-azulada para castanha-amarelada. De seguida apresenta-se uma tabela síntese de resultados de ensaios, compilada por de Burcio (2004) a partir dos resultados de Gomes e Almeida (2003).

Tabela 2.4 – Resultado dos ensaios efetuados por diferentes autores de caracterização do xisto (Burcio, 2004).

Resistência à compressão (Kg/cm <sup>2</sup> )	740
Resistência à compressão após teste de gelo-degelo (Kg/cm <sup>2</sup> )	738
Resistência à flexão (Kg/cm <sub>2</sub> )	738
Massa volúmica aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	2704
Absorção de água à pressão atmosférica (%)	0,10
Porosidade aberta (%)	0,27
Coefficiente de dilatação térmica linear (x10 <sup>-6</sup> /°C)	8,4
Resistência ao desgaste (mm)	0,5
Resistência ao choque (cm)	55-60

Burcio (2004) estudou a variação da resistência mecânica à compressão uniaxial em função da orientação relativa dos planos de anisotropia, realizando 3 ensaios para planos distintos, tal como se apresenta na Figura 2.11, onde S<sub>0</sub> e S<sub>1</sub> são direções perpendiculares ao plano de anisotropia e S<sub>0</sub>S<sub>1</sub> é a direção paralela ao plano de anisotropia.

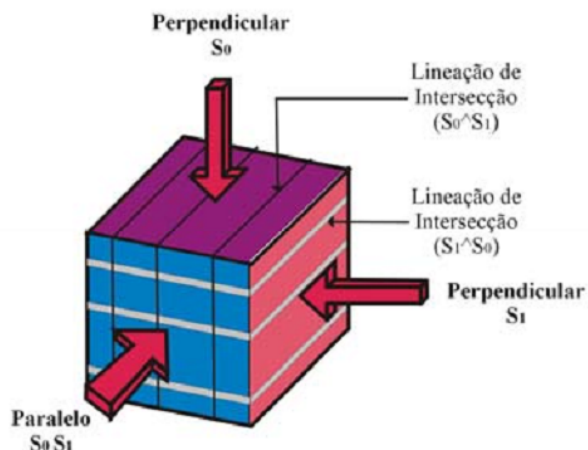


Figura 2.11 – Esquema dos três planos de ensaio (Burcio, 2004).

Burcio (2004) realizou 3 ensaios por cada tipo de xisto ensaiado, num total de 30 ensaios, tendo obtido os valores de resistência à compressão listados na Tabela 2.5. Considerando os planos de anisotropia, constata-se que os ensaios realizados com a direção da força paralela ao plano de anisotropia são os que apresentam maior resistência à compressão.

Tabela 2.5 – Tensão resistente à compressão (Burcio, 2004).

	Tensão de rutura ( $\text{kgf/cm}^2$ )		
	Planos de ensaio		
	Perpendicular $S_0$	Perpendicular $S_1$	Paralelo a $S_0$ e $S_1$
Amostra (média)	670,5	775	1621,5

### 2.4.3 Estudo do xisto do Baixo Alentejo

O estudo de Pinho (2003) foi efetuado com o intuito de contribuir para o conhecimento das características geotécnicas das rochas e maciços rochosos que constituem as formações turbidíticas do Grupo do Flysch do Baixo Alentejo. Neste grupo, que abrange parte da região do Alentejo e norte do Algarve, foi efetuada uma caracterização das principais propriedades físicas, mecânicas e de alterabilidade dos principais litótipos do referido maciço rochoso, nomeadamente, as rochas pelíticas como os xistos argilosos e filitos, e os grauvaques. O estudo laboratorial teve como objetivo avaliar as propriedades mais adequadas para a caracterização geotécnica do maciço rochoso. Foram ainda efetuadas caracterizações do ponto de vista textural, químico e mineralógico.

Pinho (2003) considerou também para análise a influência da anisotropia no comportamento geotécnico das rochas estudadas, nomeadamente na expansibilidade e na resistência. O autor refere que a anisotropia resultante da textura é uma característica muito importante que pode influenciar o comportamento mecânico, sendo por esta razão essencial que, ao ensaiar estes materiais, a orientação das descontinuidades seja identificada de forma a permitir uma correta interpretação dos resultados. O autor refere que a caracterização física e mecânica dos xistos é de elevada dificuldade devido à anisotropia aliada à heterogeneidade característica deste tipo de rochas. Tal facto ficou expresso na acentuada dispersão nos resultados apresentados nesse estudo. Segundo o autor, a heterogeneidade está relacionada com o facto de os xistos ocorrerem em regra, finamente estratificados, o que por vezes afeta a representatividade dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais.

Na análise química, Pinho (2003) realizou ensaios de espectrometria de fluorescência de Raio-X a amostras de xistos com distintos estados de conservação. Na Tabela 2.6 são apresentados os resultados em percentagens ponderadas dos elementos maiores sob a forma de óxidos. Perante estes resultados, constata-se que Pinho (2003) obteve nos xistos ensaiados os maiores teores em  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , tal como Noronha *et al.* (2011) e Burcio (2004).

Tabela 2.6 – Composição química das amostras de xistos (Pinho, 2003).

Amostras	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	$\text{MnO}$ (%)	$\text{TiO}_2$ (%)	$\text{CaO}$ (%)	$\text{K}_2\text{O}$ (%)	$\text{P}_2\text{O}_5$ (%)	$\text{SiO}_2$ (%)	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	$\text{MgO}$ (%)	$\text{Na}_2\text{O}$ (%)	P.R. (%)
Não alteradas	7,38	0,22	0,91	0,63	2,99	0,19	59,55	18,94	2,36	1,46	5,17
Alteradas	7,96	0,12	1,01	0,05	3,41	0,12	58,25	20,45	1,72	0,86	5,83
Total	7,82	0,15	0,98	0,20	3,31	0,14	58,57	20,08	1,88	1,01	5,67

No que concerne aos ensaios físicos, Pinho (2003) realizou ensaios para a determinação da massa volúmica aparente, porosidade aparente, índice de vazios, índice de desgaste em meio aquoso, absorção de azul-de-metileno e expansibilidade. Os resultados obtidos são expressos na Tabela 2.7 sendo  $\gamma_a$  a massa volúmica aparente;  $I_v$  o índice de vazios;  $I_{d2}$  o índice de desgaste em meio aquoso;  $V_{am}$  o valor de absorção de azul-de-metileno;  $\epsilon_{média}$  o valor médio da expansibilidade;  $W1-2$ ,  $W3$  e  $W4-5$  os estados de alteração, respetivamente, materiais são a pouco alterados, materiais medianamente alterados e materiais muito alterados.

Tabela 2.7 – Quadro síntese dos resultados dos ensaios físicos (Pinho, 2003).

Estado de alteração das amostras	$\gamma_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	$N_a$ (%)	$I_v$ (%)	$I_{d2}$ (%)	$V_{am}$ (g/100g finos)	$\epsilon_{Média}$ (%)
W <sub>1-2</sub>	2548	7,6	1,1	98,6	0,468	0,910
W <sub>3</sub>	2192	16	3,7	95,3	0,688	2,158
W <sub>4-5</sub>	2103	23,9	9,5	86,2	1,196	2,986

Perante estes resultados o autor concluiu que: a massa volúmica aparente diminui com o aumento do estado de alteração; a porosidade aparente aumenta com o aumento do estado de alteração; as amostras com um estado mais avançado de alteração são mais vulneráveis à fragmentação e desintegração; deteta-se uma tendência para maior absorção de azul-de-metileno nas amostras com estado de alteração mais avançado. A expansibilidade dos xistos também foi determinada por Pinho (2003), com o intuito de avaliar a influência da anisotropia na expansibilidade do xisto. Os resultados obtidos encontram-se expressos na Tabela 2.8, onde  $\epsilon_a$  representa a deformação axial e  $\epsilon_r$  representa a deformação radial.

Tabela 2.8 – Resultados dos ensaios de expansibilidade (Pinho, 2003).

Amostra	Profundidade (m)	$\epsilon_a$ média (%)	$\epsilon_r$ média (%)
X(G)90	15,25 – 18,15	0,425	0,021
X(G)45	8,70 – 10,00	0,388	0,026
X(G)0	18,40 – 21,0	0,093	0,047
X/G90	15,25 -18,15	0,396	0,014
X/G45	8,70 -10,00	0,706	0,097
X/G0	5,80 – 8,70	0,024	0,038

Dos resultados obtidos é notório que os xistos superficiais têm menor deformação que os xistos de profundidades superiores a 8,7 metros, no entanto é importante considerar que o aumento da profundidade não é sinónimo de um aumento efetivo da deformação. No âmbito da alterabilidade das rochas, Pinho (2003) realizou ensaios de ataque pela água oxigenada a 110 volumes e com ensaios de ataque pelo sulfato de magnésio. Os resultados obtidos, em valores médios, para os xistos ensaiados são apresentados na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Quadro resumo dos ensaios de previsão de alterabilidade (Pinho, 2003).

Amostra	Ataque pela água oxigenada				Ataque pelo sulfato de magnésio					P
	1ºCiclo	2ºCiclo	3ºCiclo	4ºCiclo	1ºCiclo	2ºCiclo	3ºCiclo	4ºCiclo	5ºCiclo	
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
(média)	3,68	3,75	2,72	2,08	1,28	2,23	3,88	5,95	9,10	33,06

Foram ainda realizados ensaios de ultrassons e ensaios de resistência mecânica, nomeadamente de carga de ponta e de resistência mecânica à compressão uniaxial. Apresenta-se na Tabela 2.10 a média dos resultados obtidos por Pinho (2003) para xistos recolhidos em diferentes localizações.

Tabela 2.10 – Quadro síntese dos resultados de ultrassons e mecânicos (adaptado de Pinho, 2003).

Amostra	Compressão axial (MPa)	Carga pontual $I_{s(50)}$ médio (MPa)		Ultrassons $V_p$ (m/s)
		Direção perpendicular à foliação	Direção paralela à foliação	
		(média)	13,24	

Verifica-se uma elevada dispersão nos resultados obtidos. É importante realçar que a influência dos planos de anisotropia apenas foi considerada num provete e apenas no ensaio de carga de ponta. Relativamente à resistência mecânica à compressão uniaxial e considerando também a deformabilidade, o autor apresenta na Tabela 2.11 um resumo para dois tipos de litologia analisados.

Tabela 2.11 – Valores máximos, mínimos e médio da resistência à compressão uniaxial e do módulo de deformabilidade (Pinho, 2003).

Litologia		Compressão uniaxial	Deformabilidade
		$\sigma_c$	$E$
		(MPa)	(MPa)
X(G)	máximo	20,2	19000
	mínimo	0,3	14600
	médio	7,6	16800
X/G	máximo	38,3	37600
	mínimo	8,6	9300
	médio	18,1	19400

## 2.5 A aplicabilidade do xisto

Numerosos fatores determinam se uma rocha é trabalhável como pedra de construção. Entre esses fatores encontra-se o volume de material que pode ser extraído, a facilidade com que este pode ser extraído, o conseqüente desperdício após extração, o custo do transporte bem como a sua aparência e propriedades físicas. Uma aparência uniforme é geralmente desejável na construção de pedra. A aparência da pedra depende em grande medida da sua cor que é determinada pela sua composição mineral sendo que a textura também afeta a aparência da pedra (Bell, 2007).

Noronha *et al.* (2011) referem que até às primeiras décadas do século XX, o xisto foi um material com utilização relevante na construção, principalmente, nas regiões Nordeste e Centro de Portugal, devendo-se esta distribuição geográfica a questões naturais de ordem geológica. Referem também que os xistos possuem excelentes propriedades e características físicas, químicas e mecânicas tais como: impermeabilidade, resistência mecânica, durabilidade, flexibilidade e capacidade isolante (térmica e elétrica), que os convertem em bons elementos para o uso na construção, decoração e obra civil.

Dentro do património tradicional português, encontram-se as construções tradicionais em alvenaria de xisto, espalhadas por diversas regiões de Norte a Sul do país, variando as tipologias das construções, as metodologias construtivas e até o próprio material xisto que, dependendo da zona de onde é extraído, pode ter propriedades e características diferentes, como se pode observar na Figura 2.12. No capítulo 3 apresenta-se uma descrição detalhada dos aspetos construtivos das construções tradicionais em alvenaria de xisto.





Figura 2.12 – Diferentes aldeias do xisto em Portugal: a) Vilar de Mouros; b) Piodão.

Para além de Portugal, as construções tradicionais em xisto podem ser igualmente encontradas em diversos países do mundo, como se observa na Figura 2.13, nomeadamente na Itália, França, Grécia, Bélgica, Turquia, Albânia, Irlanda, EUA, Macedónia, Estónia, Nova Zelândia, etc., sempre em regiões onde esta rocha metamórfica existe localmente. Observam-se também diferentes aplicações do xisto (habitações, castelos, fortalezas, igrejas, etc.) e variadas metodologias de construção.

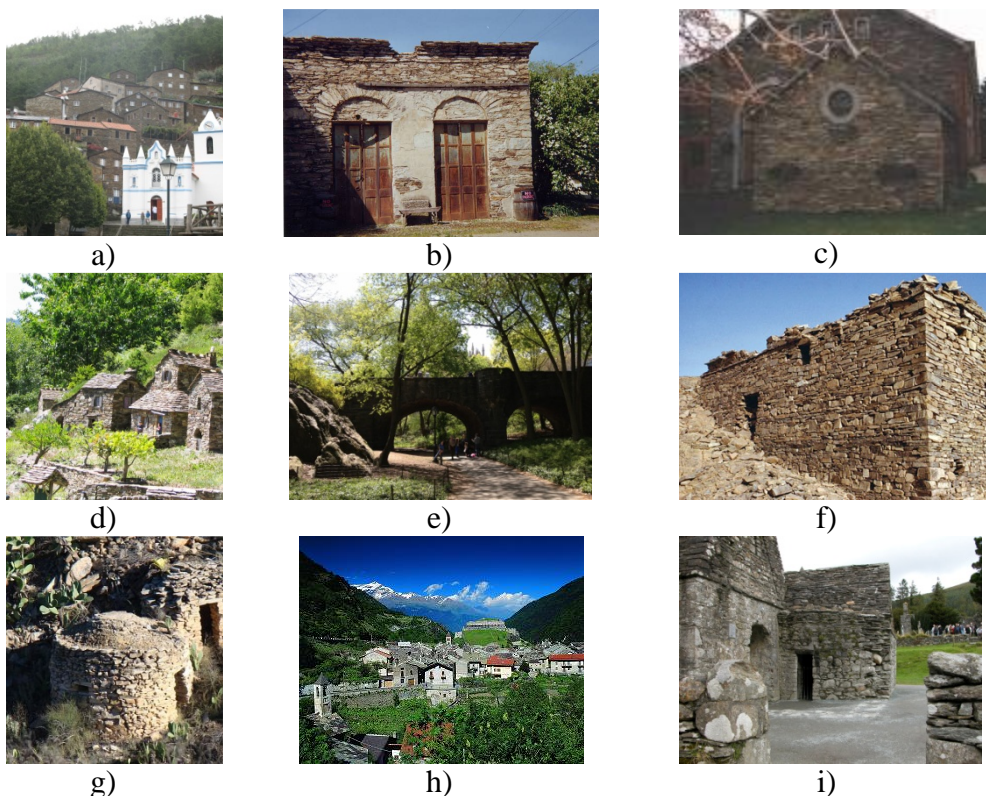


Figura 2.13 – Construções em xisto no mundo: a) Portugal; b) Califórnia (Stone Quarries and Beyond, 2008); c) Bélgica (Tony Renard, 2008); d) França (Outsider Environments, 2013); e) Nova Iorque (Sindo's NYC, 2013); f) Grécia (University of Delaware, 2013); g) Espanha (Chozas de Piedra, 2008); h) Itália (Sibille, 2013); i) Irlanda (Ireland a celtic Jaunt, 2012).

Em Portugal, os xistos foram aplicados como elementos construtivos em património edificado maioritariamente rústico, em castelos, torres, pontes e outros tipos de estruturas onde se encontram na forma de blocos, como elementos estruturais em panos de muralhas, por vezes misturados com blocos de granitos.

Segundo Boeri (2000), as pedras naturais encontram-se presentes na natureza com as mesmas características que possuem quando são utilizadas na construção. Tratando-se de materiais naturais, o processo de tratamento não pode ser considerado como um ciclo produtivo no sentido próprio, mas compreende as fases necessárias à extração e à transformação do material, ou seja, a localização, escavação, subdivisão e acabamento.

Lourenço *et al.* (2008) especificam que na arquitetura vernácula os materiais tradicionais de construção eram quase exclusivamente materiais locais, normalmente usados sem muito processamento ou com ligeiras alterações através de equipamento elementar.

No caso particular do xisto, a localização era uma das principais razões para o seu uso na construção, ou seja, não existia a necessidade de procurar a localização da pedra em locais específicos e após extração transportar para o local de implantação, pois estas construções populares eram efetuadas com as pedras naturais existentes no local de implantação ou em zonas muito próximas desse local. A escavação era tipicamente efetuada sem equipamento especializado em afloramentos rochosos. A subdivisão era também efetuada no local. Dependendo da zona do país e das respetivas características do xisto, principalmente dureza e estratificação da estrutura interna, permitia-se a dispensa de equipamento especial para o seu corte.

Após extraído, o xisto era aplicado em lascas, sem qualquer tipo de tratamento ou acabamento, sobrepondo regularmente os elementos e aproveitando-se as suas boas características xistosas e as suas irregularidades geométricas, e em algumas situações aliados à utilização de ligante (ver Figura 2.14).

Nas casas de habitação, o xisto era empregue na construção das paredes, dos pavimentos térreos, das escadas e, em algumas situações, até nas coberturas (Cardoso, 2006). Amaral *et al.* (1988) referem que o xisto era utilizado nas suas formas naturais após extração, em paredes de alvenaria, muito menos estáveis do que as de granito, ou em coberturas de edifícios simples. Segundo Ribeiro *et al.* (2008), o xisto recolhido do solo e aplicado na construção acaba por denunciar nas alvenarias a sua melhor ou pior qualidade já que o

transporte de materiais de outros locais era física e materialmente difícil e economicamente inviável.

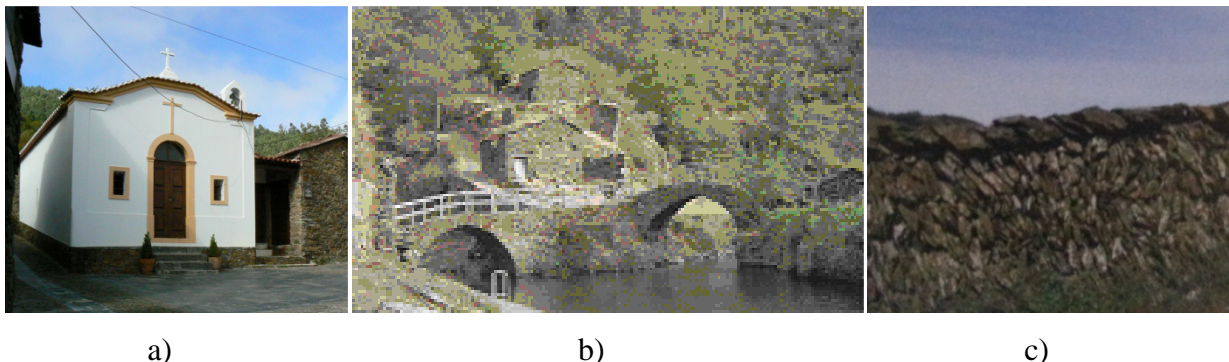


Figura 2.14 – Construções em xisto: a) Capela (Carvalho, 2008); b) Pontes (Pereira, 2006); c) Muro (Ribeiro *et al.*, 2008).

As paredes de alvenaria de xisto têm, por norma, uma espessura entre os 40 e os 70cm, são maioritariamente de panos múltiplos em toda sua extensão, com exceção das zonas dos cunhais que eram em geral reforçados com pedras de perpianho. O espaço intermédio era preenchido com pedras mais pequenas, restos de telha cerâmica e terra.

De acordo com Amaral *et al.* (1988) e Carvalho (2008), as argamassas são de uso relativamente recente sendo correntes as alvenarias não argamassadas. No entanto, na sua maioria as paredes eram consolidadas com argamassa tradicional de reduzida resistência mecânica, à base de barro, rebocadas no exterior e podendo até ser pintadas. Ribeiro *et al.* (2008) referem que o barro era empregue cru não só como argamassa de assentamento mas também como revestimento ou na melhoria do isolamento das coberturas.

A par do xisto, a madeira era utilizada como material complementar na construção. Esta era usada para as varandas e sobrados, assim como para os lintéis das portas e janelas das casas mais humildes. De acordo com Amaral *et al.* (1988), apenas em regiões privilegiadas se poderia extrair de um maciço de xisto uma verga para um vão de porta ou janela. Perante tal situação, impôs-se a aplicação de madeira com uma solução alternativa que se generalizou. Considerando a necessidade de uma madeira duradora e sólida, usava-se comumente o castanho (Amaral *et al.*, 1988), sendo que no sul de Portugal o azinho e a oliveira eram mais comuns (Ribeiro *et al.*, 2008). Já as casas pertencentes a proprietários mais abastados exibiam, muitas vezes, blocos de granito nos lintéis, em vez da madeira. As paredes interiores divisórias, por norma elaboradas em tabique, assentam diretamente sobre o soalho (Cardoso, 2006).

Os soalhos das construções em xisto assentavam em barrotes de madeira, assim como o vigamento para suporte da cobertura, que por sua vez assentava diretamente nas paredes de alvenaria. As ombreiras das portas e janelas eram também reforçadas com pedras maiores, onde se apoiavam lintéis em madeira (Carvalho, 2008; Ribeiro *et al.*, 2008). As coberturas têm duas a quatro águas com a exceção das construções do Alentejo e Algarve que possuem por norma uma ou duas águas. De acordo com Carvalho (2008) e Ribeiro *et al.* (2008), os revestimentos podem variar entre a utilização de telha de canudo, ardósia ou em casos mais raros através da utilização de palha.

Esta arquitetura tradicional foi ao longo dos tempos executada através da utilização de materiais existentes na região. Os trabalhos de construção de edifícios em xisto foram desde sempre efetuados por trabalhadores locais que foram transmitindo, geração em geração, os conhecimentos das técnicas de execução tradicionais destes edifícios.

Hoje em dia, as construções em xisto tem sido cada vez mais valorizadas, não só pelo seu valor histórico e patrimonial, mas também, pelos aspetos representativos de um povo e das suas vivências, das metodologias construtivas tradicionais e da arquitetura.

## **2.6 Tipologias das construções em xisto**

O estudo das construções em xisto considerando as diferentes regiões de implantação a nível nacional (Minho, Trás-os-Montes, Beiras, parte do Alentejo e Algarve), permite compreender que existem variações nas metodologias construtivas relacionadas com o tipo de material disponível para a construção, nomeadamente com os diferentes tipos de xisto (Figura 2.15). Como referido anteriormente, existem também fatores sociais, ambientais e económicos que estão relacionados com as diferentes metodologias construtivas.



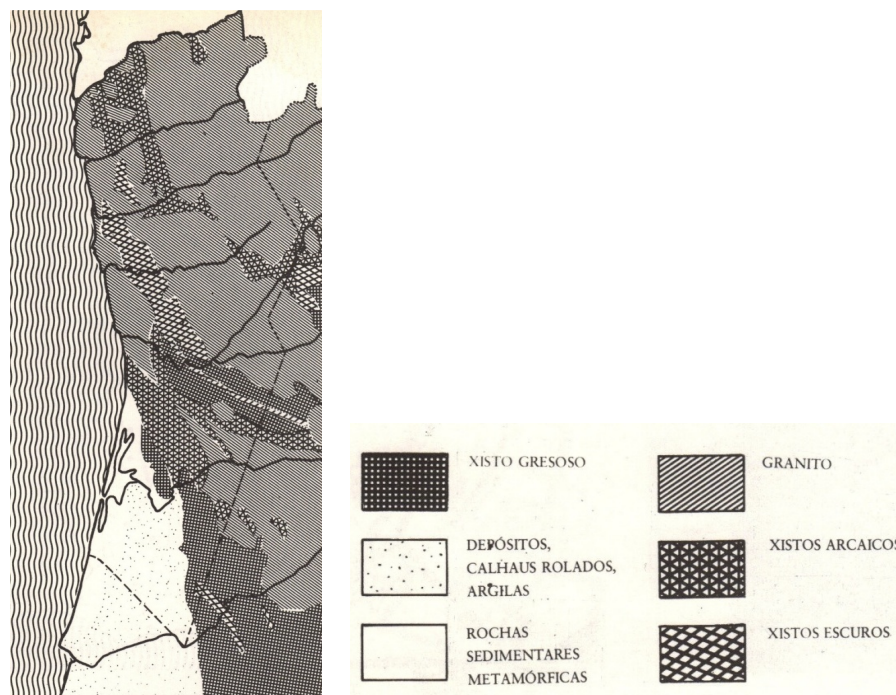


Figura 2.15 – Geologia na região do Minho e Douro (Associação dos Arquitetos Portugueses, 1980).

Alguns destes fatores estão diretamente relacionados com a arquitetura popular da região. Na região do Norte encontram-se dois tipos de povoamento: disperso e aglomerado. O primeiro é frequente no Minho, enquanto o segundo se encontra mais no interior, particularmente em Trás-os-Montes (Moutinho, 1995). Como se pode observar na Figura 2.16, para além da influência do tipo de povoamento nas diversas tipologias arquitetónicas das habitações portuguesas, pode-se analisar a variação arquitetónica tendo em conta a dispersão das construções no território nacional. Desta forma, pode-se considerar quatro zonas gerais onde se distingue uma elevada variação tipológica, sendo elas, o Norte, o Centro-Litoral, o Alentejo e o Algarve.

Na zona do Norte é predominante a casa minhota na região do Minho, a casa transmontana na região de Trás-os-Montes e a casa serrana na região das Beiras. Na zona do Alentejo e Algarve são tradicionais as casas do vale do Guadiana comumente construídas com estrutura de xisto, podendo ter as denominações de casa, de monte, de povoado, ou rural.

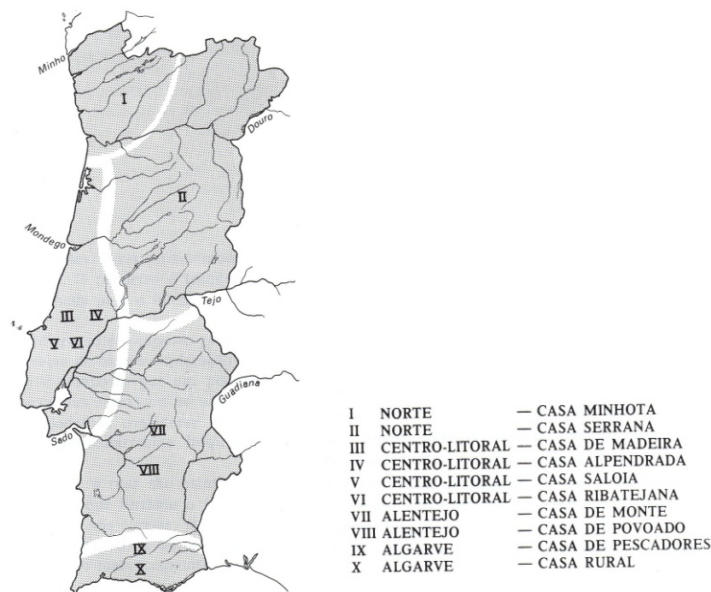


Figura 2.16 – Localização das diferentes tipologias de casas em Portugal continental (Moutinho, 1995).

De acordo com Moutinho (1995), a casa Minhota é comum em paisagens de povoamento disperso, é construída tradicionalmente em granito, geralmente aparelhado, ou xisto, composta de dois pisos com planta retangular. Contém no rés-do-chão cortes, adega, lagar e espaços para arrumações, enquanto no andar sobrado situam-se os quartos e salas.

Tal como a casa Minhota, a casa Transmontana encontra-se em paisagens de povoamento disperso, tem normalmente paredes estruturais em xisto com emparelhamento desalinhado, composta por dois pisos em planta retangular. Tradicionalmente o rés-do-chão era utilizado para arrumos e para albergar os animais, e nos pisos superiores situavam-se os quartos, a sala e/ou cozinha. O telhado tem estrutura de madeira de duas ou quatro águas com revestimento em telha cerâmica ou xisto.

A Casa Serrana tem tipologia muito semelhante à casa Transmontana e, segundo Moutinho (1995), é composta por dois pisos de planta quadrada ou retangular, contém no rés-do-chão a corte do gado e no andar sobrado possui uma ou duas divisões (cozinha com lareira e quarto). O telhado é de duas ou quatro águas e pode ser coberto com telha caleira, placas de xisto, lousa ou colmo segundo a sua situação geográfica. Os materiais de construção usados são o granito, que raramente é aparelhado, e o xisto utilizado sem argamassa ou reboco. O xisto, que se apresenta sob a forma de pequenas lajes, implica que as ombreiras, padeiras e aventais sejam de madeira ou granito, assim como os cunhais que geralmente são formados por grandes blocos de granito.

Deve-se ainda ter em consideração mais algumas casas típicas que se podem distinguir arquitetonicamente em pormenores como o caso de algumas casas do sul da região de Trás-os-Montes, nas quais é possível denotar uma varanda ao centro da fachada principal, pormenor que as distingue das restantes casas transmontanas. As casas de dois pisos, com acesso exterior à habitação no primeiro andar constituem o tipo dominante. Não é invulgar que a área do piso térreo seja menor que a do primeiro andar, sobretudo em locais de terreno com pendente acentuada onde o afloramento rochoso é aproveitado para paredes (Carvalho, 2008). Segundo Amaral *et al.* (1988), nesta região são comuns as varandas-alpendre que constituem os elementos primaciais da arquitetura Beirã.

Na região das Beiras, como em Paul e nas imediações, é possível observar uma tipologia muito particular, onde são utilizados nas paredes xistos e calhaus rolados de granito, de forma esférica ou ovoide e de grande dureza, extraídos do leito das ribeiras, dando um forma peculiar às paredes de fachada, ver Figura 2.17 (Associação dos Arquitetos Portugueses, 1980).



Figura 2.17 – Construção com mistura de xisto e calhaus rolados de granito (Associação dos Arquitetos Portugueses, 1980).

A sul do território nacional os terrenos são abundantes em xistos em localidades como Mértola, Monsaraz, Portalegre, Elvas, Arronches, Assumar ou Alcoutim. De facto, o xisto é a pedra mais frequente na região do Alentejo. Tal como refere na publicação da Associação dos Arquitetos Portugueses (1980), nesta região a pedra é aplicada nas alvenarias rebocadas ou não (Figura 2.18), nos pavimentos e como fundações das paredes de taipa ou tijolo.

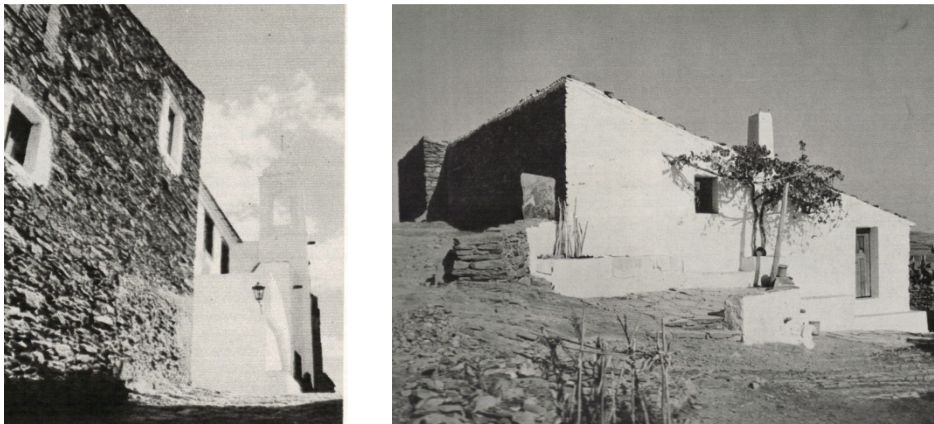


Figura 2.18 – Construção em alvenaria de xisto em Monsaraz e Alcoutim (Associação dos Arquitetos Portugueses, 1980).

No Alentejo e no Algarve onde predominam as casas de monte, as construções tradicionais são casas elementares que muitas vezes se resumem a um único compartimento. As paredes de xisto erguem-se desde o solo rijo sendo o xisto normalmente assente com argamassa de barro. As aberturas são por norma reforçadas com elementos de madeira. O revestimento aplica-se apenas em edifícios de habitação de proprietários com melhor capacidade económica e consiste numa caição direta sobre alvenaria ou na sua aplicação sobre um reboco de argamassa de cal, podendo encontrar-se situações em que o revestimento cobre todo o edifício e outras em que este se aplica apenas na fachada principal (Ribeiro *et al.*, 2008).

## 2.7 Caracterização experimental de elementos de alvenaria

A alvenaria é um material não homogéneo constituído pelo conjunto de tijolo ou de pedra, assentes com argamassa, de acordo com variáveis tipológicas relacionadas com múltiplos fatores, como a época histórica, a situação económica e a localização geográfica do local de implantação (Corradi, 2006).

Oliveira (2003) refere que apesar da simplicidade associada à construção em alvenaria, a análise do comportamento mecânico das construções em alvenaria permanece ainda um desafio. A alvenaria apresenta propriedades diferentes em distintas direções devido às juntas que atuam como planos frágeis e, conseqüentemente, as estruturas de alvenaria apresentam um complexo comportamento mecânico. Segundo Luso (2012), a aplicação de diferentes formas e técnicas na construção deste tipo de paredes confere a estes elementos características completamente distintas, quer físicas, quer mecânicas, mesmo no caso de se aplicarem os mesmos materiais.



Não só as metodologias construtivas infligem diferentes propriedades mecânicas à alvenaria. De facto, os próprios materiais aplicados (pedra e argamassa, quando esta existe), podem induzir diferentes propriedades mecânicas à estrutura. Como se pode verificar na Figura 2.19, podem ser gerados um elevado número de diferentes arranjos estruturais, não só relativos à disposição dos elementos pétreos e da dimensão destes e das justas de argamassa, mas também relativos ao número de panos constituintes da parede de alvenaria. Apesar destas diferenças, as estruturas de alvenaria possuem em geral grande espessura, são heterogéneas e apresentam uma baixa resistência à tração e ao corte.

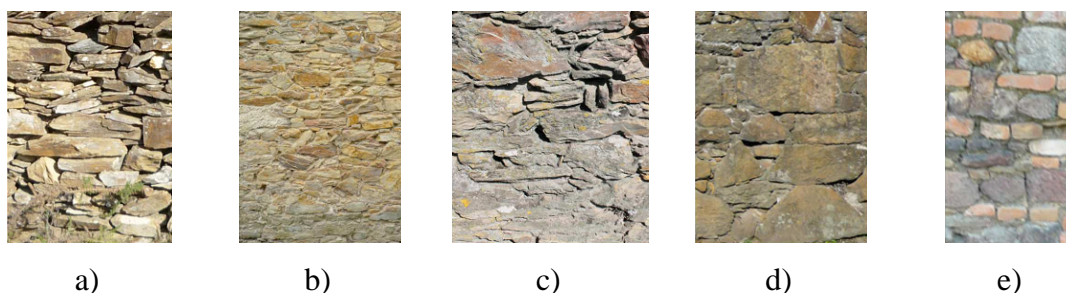


Figura 2.19 – Diferentes arranjos estruturais da alvenaria: a) seca, desalinhada, aleatória; b) ordinária, desalinhada, aleatória; c) aparelhada, irregular alinhada, aleatória; d) aparelhada, horizontal, corrigida à fiada e com cunhas; e) mista (Barroso, 2012).

Existe uma grande variedade de ensaios laboratoriais que permitem a caracterização mecânica de elementos estruturais de alvenaria. No entanto, considerando as características enunciadas das estruturas de alvenaria, a sua reprodução em laboratório e a sua caracterização mecânica adquirem um elevado grau de dificuldade.

Considerando que neste estudo foram realizados ensaios de compressão uniaxial e de compressão diagonal para a caracterização das estruturas de alvenaria de xisto (que serão apresentados no capítulo 5), no que se segue será feita uma descrição deste tipo de ensaios.

### 2.7.1 Ensaios de compressão uniaxial

Num prisma sujeito a compressão uniaxial, a argamassa tende a expandir-se transversalmente mais do que a pedra, devido às suas diferentes propriedades elásticas. A continuidade entre os elementos pétreos e argamassa, garantida pela coesão e atrito cria um confinamento lateral à argamassa. Como resultado, desenvolve-se um estado de compressão triaxial na argamassa e de tração biaxial juntamente com compressão uniaxial nos elementos pétreos. Consequentemente, a rotura ocorre geralmente através da abertura de fendas paralelas à direção da carga nos elementos pétreos.

Segundo Corradi (2006), considerando que a alvenaria de xisto é uma alvenaria de qualidade baixa, é possível determinar a resistência à compressão da alvenaria  $f_i$  através de

$$f_i = \left(\frac{2}{3} f_{bc} - f_0\right) + 0,5 \cdot f_{mc} \quad (2.1)$$

onde  $f_{bc}$  é a resistência à compressão da pedra,  $f_{mc}$  é a resistência à compressão da argamassa e  $f_0$  pode tomar os valores de 0,5 MPa para blocos de pedra regulares ou 2,5 para blocos de pedra irregulares.

No capítulo 5 serão apresentados e analisados os ensaios para a determinação da resistência à compressão uniaxial em prismas de alvenaria tradicional de xisto.

### 2.7.2 Ensaios de compressão diagonal

O ensaio de compressão diagonal pretende simular um estado puro de corte e é um ensaio amplamente utilizado, em laboratório ou *in-situ* para determinar as características de rigidez e resistência ao corte da alvenaria. São diversos os autores que procederam a ensaios de compressão diagonal em laboratório ou *in-situ*, como por exemplo Chriostrini *et al.* (2000), Brignola *et al.* (2008), Calderini (2009), Valluzzi *et al.* (2002), Corradi *et al.* (2002), Corradi *et al.* (2007), Corradi *et al.* (2010), Borri *et al.* (2010), Borri *et al.* (2011) e Avorio *et al.* (2002). Na Figura 2.20 apresentam-se esquemas de ensaio dotados por alguns dos referidos autores.



a)



b)

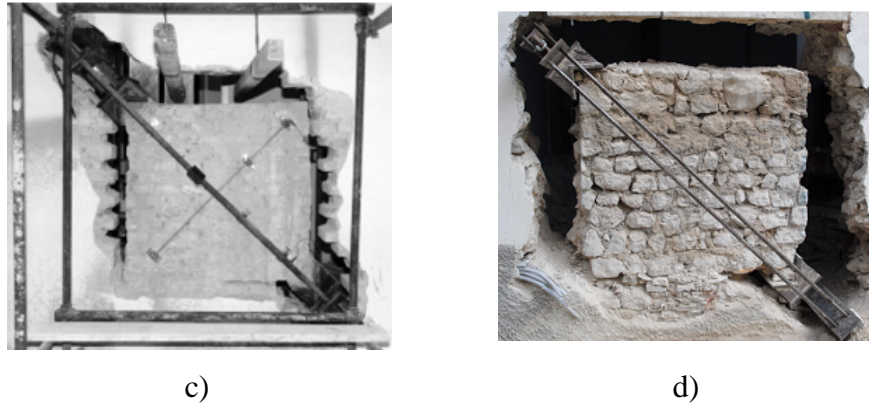


Figura 2.20 – Ensaio de compressão diagonal: a) norma ASTM E519-02; b) Brignola *et al.* (2008), c) Corradi *et al.* (2002), d) Borri *et al.* (2011).

De acordo com Avorio *et al.* (2002), o círculo de Mohr, tal como se apresenta na Figura 2.21, que é representativo do estado tensional resulta centrado na origem e o valor da tensão tangencial  $\tau$  é igual ao da tensão principal  $\sigma_1$ .

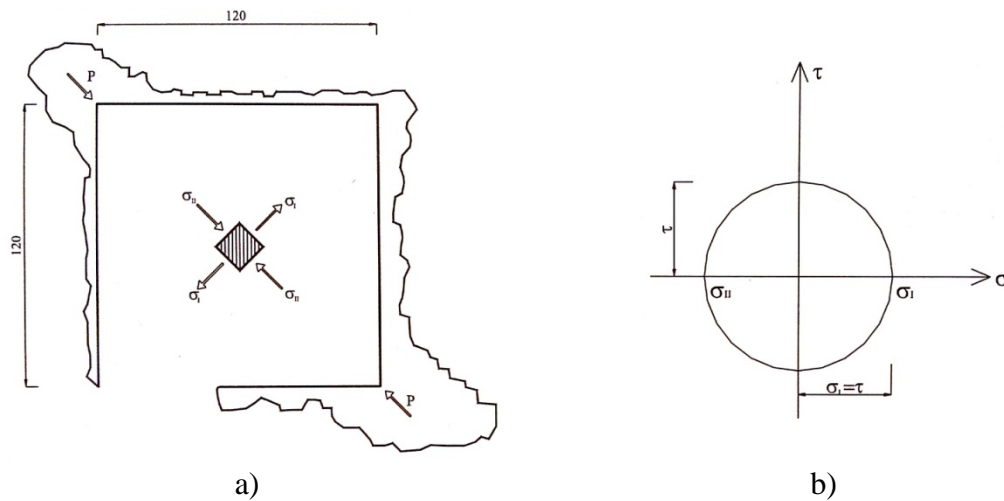


Figura 2.21 – Ensaio de compressão diagonal: a) esquema do ensaio; b) círculo de Mohr (Avorio *et al.*, 2002).

Perante tal interpretação, a resistência à compressão diagonal pode ser obtida através da seguinte equação (Avorio *et al.*, 2002):

$$f_{vk0,nom}^{diag} \cong \tau_{ult}^{diag} = \frac{P_{ult}}{A\sqrt{2}} \quad (2.2)$$

O  $P_{ult}$  é a carga máxima à compressão diagonal,  $A$  é a secção do painel e parede. A designação da resistência varia mediante a norma a considerar:

$f_{vk0,nom}^{diag}$  é a resistência característica nominal ao corte na ausência de carga vertical, obtida de um ensaio de compressão diagonal como definida no Eurocódigo 6;

$\tau_{ult}^{diag}$  é a resistência última ao corte para ensaios de compressão diagonal segundo a norma ASTM 519-02.

No capítulo 5 serão apresentados e analisados os ensaios para a determinação da resistência à compressão diagonal em paredes de alvenaria tradicional de xisto.

## Capítulo 3

# LEVANTAMENTO CONSTRUTIVO E DE DANOS

O presente capítulo aborda as construções de alvenaria de xisto, nomeadamente em termos da caracterização do património nacional no que concerne às tipologias construtivas mais comuns, e os danos mais comumente observados em estruturas de xisto. Para além de se caracterizarem as tipologias mais comuns das construções tradicionais de xisto, são também apresentados exemplos de construções em xisto de elevado valor patrimonial ou cultural, como as construções religiosas, fortificações, pontes, moinhos, etc.

Na última secção do presente capítulo, são apresentados os danos mais frequentemente observados nas construções tradicionais de xisto, quer em termos da própria pedra, quer em outros elementos ou materiais estruturais, ou ainda na ligação entre elementos ou partes da estrutura.

### **3.1 Construções tradicionais de xisto**

O levantamento das tipologias arquitetónicas mais comuns das construções em xisto existentes no território nacional, e o levantamento dos danos frequentes nestas construções, constituem-se como ferramentas para o estudo das estruturas em xisto. As estruturas de xisto são muito heterogéneas, devido à variação dos materiais constituintes, incluindo o próprio xisto que possui diferentes propriedades dependendo da sua formação geológica, mas também pela variação das suas tipologias construtivas.

Saisi (2008) refere que o estudo das alvenarias deve iniciar-se numa extensa investigação das diferentes geometrias e técnicas construtivas. A mesma autora refere que as técnicas construtivas tradicionais e principalmente as adotadas nas construções mais pobres, como é o caso de muitas das construções em xisto, necessitam de ser cuidadosamente investigadas.

O levantamento e diagnóstico aplicado à generalidade das construções antigas é um trabalho de elevada dificuldade, pois trata-se de construções normalmente elaboradas sem qualquer tipo de projeto e sem qualquer tipo de regulamentação construtiva. Grillo (2002) refere que o conhecimento dos danos de uma construção ou do seu nível de segurança estrutural é uma operação complexa, seja pela dificuldade de determinar as causas precisamente ou pela sobreposição e interação de vários fenómenos.

Por sua vez, Baruchello (2004) refere que as imposições de procedimentos de cálculo e de verificações da segurança cada vez mais complexas devido à difusão das técnicas de cálculo automático, requer um conhecimento aprofundado dos parâmetros estruturais em jogo e das características físicas e mecânicas dos vários elementos resistentes. Desta forma, no planeamento de qualquer intervenção sobre a construção torna-se muito importante a análise e diagnóstico rigorosos relativamente à fase de execução. A carência de uma aprofundada fase de diagnóstico já por diversas vezes conduziu à execução de intervenções incorretas que posteriormente requereram alterações mais complexas do que seria necessário executar na intervenção, caso esta tivesse sido bem fundamentada (Baruchello, 2004).

Assim, normalmente, aquando da execução de um levantamento deve-se desenvolver inicialmente uma inspeção preliminar, qualitativa, recorrendo à observação visual ou à utilização de equipamento simples na identificação das patologias e problemas existentes. Numa segunda fase, deve efetuar-se a inspeção detalhada, quantitativa, na qual são realizados ensaios e medições, de forma a ser obtida uma avaliação das características dos materiais constituintes da estrutura e das propriedades mecânicas da própria estrutura, bem como um estudo mais aprofundado das anomalias observadas (Barros, 2012).

A preparação prévia do levantamento é essencial para o sucesso do estudo. Assim, nas análises desenvolvidas neste trabalho de investigação, tendo em conta que se trata de um tipo de construção muito específica tanto em termos construtivos como em termos dos materiais usados, é necessário um bom conhecimento da geologia e geografia do território nacional. Sabendo que estas construções tradicionais são edificadas com os materiais disponíveis localmente, exige-se para o presente estudo o conhecimento das zonas do território nacional

onde existe xisto. Considerando os dados apresentados no capítulo 2 sobre a geologia e geografia do território nacional, neste trabalho foram efetuados levantamentos das construções existentes nas seguintes regiões: Minho, Trás-os-Montes, Beiras e Alentejo.

Reconhecendo que na reabilitação é fundamental a realização de um diagnóstico rigoroso da construção existente, e com o intuito de obter uma boa caracterização arquitetónica e patológica das construções, procedeu-se à elaboração de uma ficha de levantamento específica para as construções em alvenaria de xisto. Em anexo apresenta-se a ficha de levantamento utilizada neste estudo. A presente ficha de levantamento foi elaborada com o intuito de guiar e melhor estruturar o levantamento e diagnóstico das construções tradicionais de xisto estudadas, sendo que esta abrange vários aspetos específicos deste tipo de construção relacionados com a arquitetura, sistema estrutural, paredes e danos observados.

### 3.1.1 Aspetos gerais

Tal como refere Ribeiro *et al.* (2008), uma das características da arquitetura vernácula é o seu acentuado vínculo ao território, nomeadamente na forma como utiliza os materiais e recursos disponíveis localmente, como a pedra, a terra ou a madeira. Estes materiais locais aliados a tradições construtivas populares e às condições económicas das regiões criaram variações específicas nas tipologias construtivas.

A nível nacional as tipologias construtivas das construções tradicionais em xisto não diferem substancialmente das outras tipologias tradicionais regionais (ver Figura 3.1). No capítulo 2 foram abordadas as diferentes tipologias tradicionais por região, sendo que, de uma forma geral, as construções em xisto têm um, dois ou três pisos no máximo. Nas construções de dois ou três pisos, que têm geralmente uma geometria em planta retangular, o piso térreo é constituído por espaços destinados a lojas, currais ou espaços de arrumação, enquanto os pisos superiores serviam normalmente para habitação.



a)



b)





c)



d)



e)

Figura 3.1 – Exemplos de construções em xisto: a) Vila de Mouros; b) Carrazedo de Montenegro; c) Vila Nova de Foz Côa; d) Paul; e) Mértola.

Alguns casos de construções na região do Minho de proprietários com maiores recursos económicos possuem geometria em planta em forma de “L”, tendo associados anexos para os animais e mantimento destes. A título de curiosidade refere-se uma construção com capela em xisto situada em Vilar de Mouros, no concelho de Caminha, com brasão que fez parte do conjunto de construções estudadas neste trabalho (ver Figura 3.2).



Figura 3.2 – Construção com brasão e capela (Vilar de Mouros).

As construções com apenas um piso do Alentejo, normalmente não possuem paredes divisórias interiores, sendo constituídas por um compartimento único destinado à habitação.



Nestas regiões é possível encontrar conjuntos habitacionais interligados que se referem a edifícios com distintas fases de construção, ou seja que à construção original lhe foram agregadas novas construções devido, por exemplo, ao aumento do agregado familiar.

Assim, as maiores diferenças existentes entre as tipologias das construções em alvenaria de xisto e as tipologias das construções em alvenaria de outros materiais estão associadas às propriedades do xisto que em muitos casos influenciam os métodos e as soluções construtivas criando assim algumas variações na construção.

Pretende-se nesta secção fazer uma caracterização geral de alguns aspetos diferenciadores das construções em xisto, realçando as soluções construtivas e materiais nas diferentes construções tradicionais em xisto que se encontram em Portugal. Neste estudo incluem-se as construções das regiões do Minho, Trás-os-Montes, Beiras e Alentejo.

### **3.1.2 Fundações**

A metodologia construtiva aplicada nas construções de xisto, não é muito diferente da metodologia construtiva geralmente aplicada em construções de alvenaria com outros tipos de pedra. Contudo, é possível denotar algumas diferenças na qualidade do sistema de fundações entre edifícios tradicionais de xisto de grande porte e de pequeno porte, assim como entre construções populares simples e construções de maior envergadura.

As fundações das construções rurais de xisto são realizadas normalmente também em xisto, muitas das vezes retirado do próprio local onde se realizaram as aberturas no solo para a implantação das fundações, exceto no caso das construções da região do Minho que em algumas situações são efetuadas com recurso ao granito, como se pode observar no concelho de Caminha. Estes elementos construtivos funcionam como um prolongamento das paredes de fachada para o solo, até uma profundidade de normalmente 60 cm, dependendo da implantação do edifício. Por norma são fundações contínuas apresentando usualmente uma espessura maior que a das paredes.

No caso das construções de xisto implantadas em zonas de terreno com algum declive, como acontece em certas situações na região das Beiras, as fundações tendem a ser prolongadas até atingirem a rocha ou um solo mais resistente e consolidado. Na região do Minho, nomeadamente em zonas como Barqueiros, tal como refere Barroso (2012), as fundações podem não chegar a atingir o solo duro, dado que grande parte do subsolo existente nessa região é composto por caulinos ou por terras argilosas que se desenvolvem até grandes

profundidades. Ao contrário do que sucede com as fundações na região das Beiras, o mesmo autor refere que é pouco frequente nas construções de xisto da zona de Barqueiros o reaproveitamento de maciços pré-existentes (ver Figura 3.3).



Figura 3.3 – Fundação superficial em xisto aparelhado numa construção em Barqueiros (Barroso, 2012).

### 3.1.3 Paredes

Geralmente, na execução de paredes de alvenaria de pedra, e particularmente nas paredes de xisto, eram utilizadas pedras de maior dimensão junto aos cantos (cunhais), e pedra mais miúda para construção do resto da parede. O assentamento das diferentes fiadas depende do tipo de xisto disponível no local, nomeadamente da regularidade da sua xistosidade. De uma forma geral, para se garantir a estabilidade e também uma boa aparência é importante que se mantenha o ritmo e a regularidade das fiadas horizontais de xisto, independentemente do tipo de xisto usado.

Na construção das paredes, os elementos pétreos de xisto usados seguiam normalmente um conjunto de regras, como a aplicação com a sua foliagem na horizontal e a aplicação de elementos de maior dimensão na base das paredes. Outro aspeto que merece particular atenção no assentamento dos elementos de xisto na construção das paredes é relativo às juntas verticais, que devem ser desfasadas entre fiadas horizontais consecutivas. O desencontro das juntas verticais entre fiadas horizontais consecutivas permite um melhor imbricamento entre os elementos de pedra e uma maior estabilidade do aparelho murário e, assim, um melhor comportamento das paredes para as diferentes solicitações a que estão sujeitas.

As paredes destas estruturas (ver exemplos na Figura 3.4) podem ser de um, dois ou três paramentos, sendo que a maioria das construções em xisto em Portugal são de dois ou três paramentos tendo espessuras que variam entre 40 e 70cm (Ribeiro *et al.*, 2008; Carvalho,

2008). Quando era difícil extrair no local pedras de xisto de maior dimensão, as paredes eram construídas com dois paramentos. Nestas, as pedras de xisto eram dispostas de forma organizada, tendo a argamassa, normalmente de terra, e as travações de madeira ou pedra, um papel preponderante no funcionamento conjunto das paredes. As paredes simples encontram-se mais frequentemente na região do Minho, onde é possível extrair pedras de xisto de maior dimensão e onde é habitual, como será discutido mais adiante, o uso combinado de pedras de xisto e de elementos de granito na construção. Nas restantes regiões em estudo as paredes de apenas um paramento encontram-se em construções simples, como as de apoio à atividade agrícola.



a)



b)



c)

Figura 3.4 – Paredes: a) com um paramento (Vilar de Mouros); b) com dois paramentos (Cortes do Meio); c) com três paramentos (Carrazedo de Montenegro).

No caso de paredes de dois paramentos, e principalmente nas paredes de três paramentos, é tipicamente mantida de forma geral a largura das pedras nos paramentos exteriores, bem como a sua altura. Era também uma boa prática comum, nas paredes de três paramentos, criar-se uma superfície de transição entre panos marcadamente irregular, entre os paramentos externos e o miolo. Esta irregularidade permite uma melhor coesão entre os paramentos externos e o paramento interno, melhorando a sua estabilidade, e consequentemente evitando a formação de anomalias por separação e destacamento dos panos, com a formação de deformações excessivas para fora do plano ou até mesmo o colapso do paramento externo.

Nas paredes de três paramentos, o interior era executado com elementos de xisto de menor dimensão e por vezes com mistura de materiais cerâmicos. Tipicamente a espessura das paredes diminui ao longo da sua altura. As pedras utilizadas no travamento dos paramentos

que constituem as paredes desempenham um papel muito importante. Estas normalmente atravessam a parede de face a face, ligando as duas faces entre si e assim melhorando o funcionamento conjunto de todo o elemento murário. As pedras de travação são normalmente em xisto sendo que em alguns casos é possível encontrar travamentos realizados com elementos de madeira.

Um aspeto que diferencia marcadamente as várias tipologias de alvenaria de xisto é o ligante (ver Figura 3.5). Existem paredes nas quais são aplicados diferentes tipos de ligantes, tais como argamassas de cimento, em construções mais recentes, de terra ou mesmo paredes sem qualquer ligante em construções mais antigas de certas regiões, em que um assentamento regular do xisto associado às irregularidades das pedras de xisto levam a que as paredes tenham um bom comportamento mecânico.

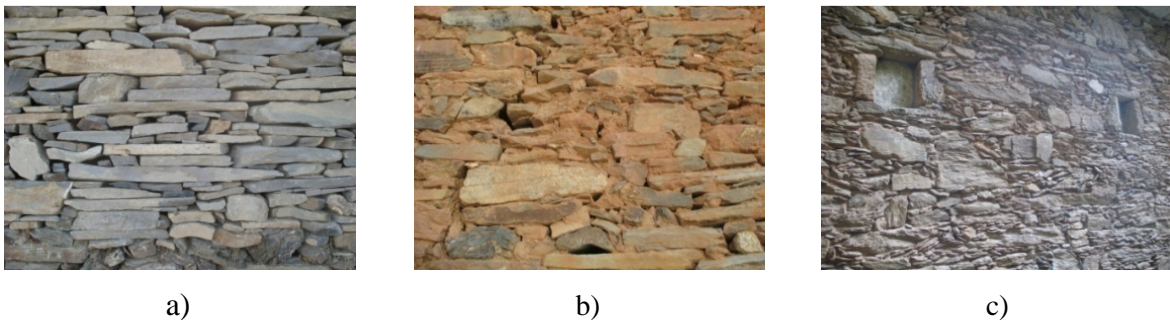


Figura 3.5 – Ligantes: a) sem ligante (Carrazedo de Montenegro); b) argamassa de terra (Carrazedo de Montenegro); c) argamassa de cimento (Vilar de Mouros).

A argamassa de terra é o ligante mais comunmente usado nas construções em xisto de todo o território nacional, justificado pela facilidade de obtenção, sendo normalmente obtido a partir das terras disponíveis no local de implantação da construção ou das suas proximidades. Os solos xistosos são por norma solos argilosos, sendo então possível a recolha de terra adequada para a utilização como ligante nas construções. A argamassa de terra era preparada e aplicada apenas com terra peneirada e água, ou em certos casos com a adição de palha. Propriedades como a plasticidade e a aderência fizeram do barro a matéria-prima mais utilizada no assentamento do xisto em paredes (ver Figura 3.6).



Figura 3.6 – Barro: a) barro amassado; b) assentamento do xisto (Ribeiro *et al.*, 2008).

A cal também foi utilizada como ligante das argamassas usadas em algumas construções, se bem que devido ao seu custo, sobretudo por esta ser extraída em locais afastados das zonas onde se construiu usando o xisto, não é tão comum. Carvalho (2008) refere que nas construções das Beiras a utilização de cal conferia um carácter algo luxuoso à construção, pois implicava o transporte deste material de locais distantes como da região de Cantanhede e portanto aumentava muito o custo da construção.

Na zona de Barqueiros encontram-se construções em xisto com ligante à base de caulino. Tal sucede devido à proximidade de locais de extração de caulino.

O cimento pode encontrar-se nas argamassas das construções mais recentes. Apesar do cimento produzir argamassas de resistência mais elevada do que as argamassas de barro ou com cal (Ribeiro *et al.*, 2008), estas podem potenciar alguns problemas associados à sua baixa permeabilidade potenciando a acumulação de sais no interior das paredes.

Nas construções de xisto, a execução de rebocos nas paredes não é muito comum (ver Figura 3.7), podendo no entanto ser encontrados alguns casos sobretudo em edifícios religiosos ou em habitações de proprietários mais abastados. Em Portugal são mais facilmente encontradas paredes de alvenaria de xisto rebocadas em habitações na zona sul (por exemplo em Mértola) ou na região do Minho.





a)



b)

Figura 3.7 – Exemplos de paredes de xisto rebocadas: a) Vilar de Mouros; b) Santa Maria de Émeres.

As paredes divisórias destas construções, sendo paredes-mestras em edifícios de maior porte, são efetuadas completamente em xisto, tendo-se observado no entanto alguns casos na região do Minho em que as paredes-mestras interiores foram executadas com a associação de elementos de xisto e granito (ver Figura 3.8 a)). Nas zonas norte e centro do país, as paredes divisórias eram tipicamente efetuadas em tabique (ver Figura 3.8 b)).



a)



b)

Figura 3.8 – Paredes divisórias: a) associação de elementos de xisto e de granito (Vilar de Mouros); b) tabique (Carrazedo de Montenegro).

### 3.1.4 Cunhais

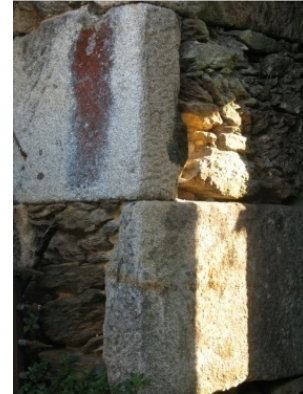
Os cunhais são um dos elementos mais importantes para o bom funcionamento do conjunto das paredes exteriores que constituem o sistema estrutural da construção. Estes elementos tornam-se ainda mais importantes quando se trata de paredes de dois ou três paramentos, tendo em conta que em muitos destes casos a qualidade da alvenaria de xisto é menor, em parte devido à menor dimensão das pedras usadas.

Nas regiões de Trás-os-Montes e Beiras, onde é mais comum a construção de paredes duplas, os cunhais são muitas vezes realizados com pedras de xisto de maior porte (ver exemplos na

Figura 3.9 a)), ou associando blocos de xisto com quartzito, enquanto na região do Minho encontraram-se situações em que os cunhais são elaborados usando elementos pétreos de grande dimensão em xisto ou em granito (ver Figura 3.9 b)).



a)



b)

Figura 3.9 – Cunhais: a) xisto (Carrazedo de Montenegro); b) granito (Vilar de Mouros).

### 3.1.5 Pavimentos

Em muitas das construções de xisto populares os pavimentos superiores servem como elemento divisor entre o rés-do-chão, onde correntemente se recolham os animais, e a zona habitacional do(s) andar(es) superior(es). Geralmente, os pavimentos interiores eram construídos em madeira, com uma estrutura simples de soalho sobre barrotes apoiados nas paredes estruturais da construção (ver exemplos na Figura 3.10). Em algumas casas mais nobres, e em certos casos de construções com maiores vãos, podem-se encontrar nas estruturas dos pavimentos alguns elementos metálicos.



Figura 3.10 – Pavimentos em madeira (Vilar de Mouros).

Os pavimentos térreos, nas situações em que estes tinham a função de albergar animais, normalmente não se encontram pavimentados. No entanto, em habitações mais nobres, encontram-se pavimentos em pedra, como por exemplo em granito na zona do Minho, sendo

no resto do país mais comum a ardósia ou mesmo o xisto. Os pavimentos térreos exteriores à construção, quando revestidos, eram normalmente executados com os mesmos materiais que se usavam no revestimento do piso interior do rés-do-chão das habitações, que por vezes também se encontram nos revestimentos dos arrumamentos. Em certas localidades, a calçada dos arruamentos era executada em lajes de grandes dimensões ou com elementos de pequenas dimensões (ver exemplos na Figura 3.11).



a)



b)

Figura 3.11 – Exemplos de pavimentos exteriores em Piódão realizados com elementos de: a) grandes dimensões; b) pequenas dimensões.

### 3.1.6 Aberturas

As aberturas de janelas e portas são zonas nas paredes que implicam maior atenção, porque introduzem descontinuidades estruturais, exigindo cuidados específicos de forma a garantir uma adequada distribuição de esforços, especialmente em alvenarias com elementos pétreos de pequena dimensão.

As zonas de apoio dos lintéis de portas e janelas são particularmente críticas. Estes são normalmente realizados com materiais diferentes do xisto. Nas regiões de Trás-os-Montes e Beiras estes elementos são muitas vezes realizados com recurso à madeira (ver Figura 3.12 a)), enquanto na região do Minho estes elementos são na sua maioria elaborados com recurso a elementos de grandes dimensões em granito (ver Figura 3.12 b)).





Figura 3.12 – Lintéis: a) madeira (Gimonde); b) granito (Vilar de Mouros).

As aberturas desempenham as funções comuns como o acesso, a luminosidade e a ventilação dos diferentes espaços da construção. Além dessas funções, estas têm um papel marcante na arquitetura destas construções. As diferenças encontradas nas variantes dos materiais, dimensões dos elementos ou na geometria das aberturas marcam as diferentes tipologias das construções de xisto de cada região. De facto, fatores territoriais, sociais e económicos, são claramente evidenciados nos vários tipos de sistemas aplicados nas aberturas das construções tradicionais de xisto. Como exemplo, refira-se que aberturas elaboradas com três elementos monolíticos de xisto ou granito (ver Figura 3.13 a)) podem ser encontradas na região do Minho, existindo também alguns casos na região de Trás-os-Montes. As estruturas de madeira são também comuns nas regiões de Trás-os-Montes, Beiras e Alentejo, podendo estas ser muito trabalhadas (ver exemplos na Figura 3.13 b)) no caso de edifícios pertencentes a proprietários mais abastados, ou simples (ver Figura 3.13 c)) em edifícios populares. Na região do Minho é possível encontrar algumas estruturas nas aberturas elaboradas em granito trabalhado, como se pode observar no exemplo da Figura 3.13 d), numa habitação brasonada.

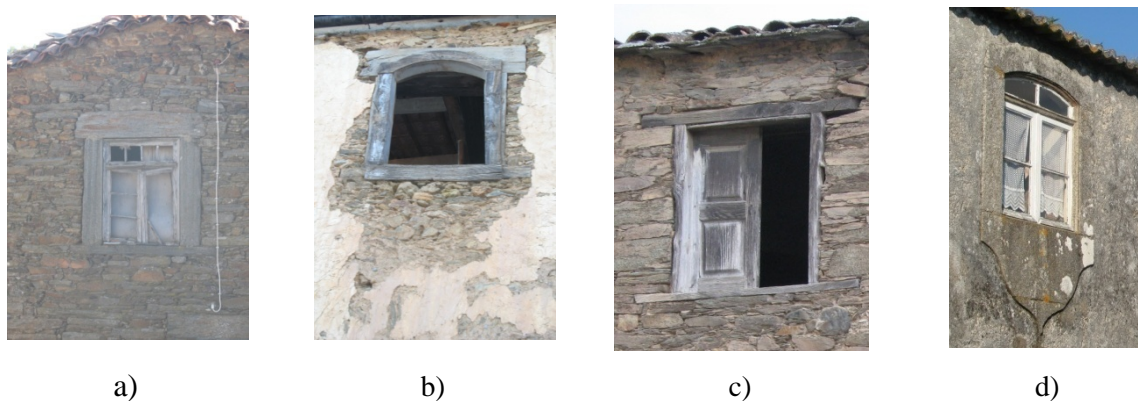


Figura 3.13 – Estruturas das aberturas: a) elementos monolíticos em xisto (Vilar de Mouros); b) estrutura em madeira trabalhada (Santa Maria de Émeres); c) estrutura de madeira simples (Gimonde); d) estrutura em granito trabalhada (Vilar de Mouros).

### 3.1.7 Escadas

Na maioria das construções em xisto existem apenas escadas exteriores que permitem o acesso ao primeiro piso, normalmente diretamente à cozinha, compartimento principal da habitação.

Nas construções em xisto em Portugal, podem encontrar-se diversos tipos de escadas exteriores, variando os materiais ou a própria estrutura, em função da zona geográfica e do poder económico do proprietário. Na região de Trás-os-Montes as escadas externas são na sua maioria executadas em xisto, com os patamares em xisto, ardósia, ou madeira. Nesta região as escadas exteriores (ver Figura 3.14) constituem-se como um dos principais marcos arquitetónicos, marcando uma clara distinção das restantes tipologias construtivas de xisto. A cobertura das escadas é normalmente realizada em estrutura de madeira assente em pilares de madeira ou xisto, e é também um marco específico destas tipologias construtivas.



a)



b)

Figura 3.14 – Exemplos de escadas exteriores nas construções tradicionais em xisto da região de Trás-os-Montes: a) Gimonde; b) Santa Maria de Émeres.

Nas regiões do Minho e das Beiras as escadas exteriores são muito semelhantes em termos estruturais, variando apenas nos materiais. Nas Beiras estes elementos são normalmente construídos totalmente em xisto, enquanto no Minho podem encontrar-se vários casos em que estas são elaboradas totalmente em granito.

### 3.1.8 Cobertura

As coberturas das construções em xisto são muito semelhantes às coberturas usadas na generalidade das construções tradicionais em Portugal. Nas regiões do Minho, Trás-os-Montes e Beiras as coberturas das construções populares têm normalmente duas águas, e em alguns casos de construções de maior porte surgem coberturas com três ou quatro águas. No

Alentejo as coberturas de uma ou duas águas são mais comuns. As pendentes das coberturas são normalmente mais elevadas nas construções das regiões de Trás-os-Montes e Beiras.

As coberturas são tipicamente realizadas em estrutura tradicional de madeira (ver exemplos na Figura 3.15), e os seus elementos têm ligações por encaixe, podendo ter ou não forro sob o revestimento.



Figura 3.15 – Estrutura de coberturas com elementos de madeira (Vilar de Mouros).

O revestimento é um dos elementos da cobertura onde se observa maior variação entre as construções de xisto distribuídas no território nacional. No entanto, nas várias regiões predomina a cobertura revestida com telha cerâmica (ver Figura 3.16 c)), normalmente de tipo canudo. Nas regiões das Beiras, Trás-os-Montes e Alentejo é possível encontrar habitações com cobertura efetuada com estrutura de madeira revestida por palha (ver Figura 3.16 a)). Nas Beiras o revestimento tradicional mais comum é realizado em ardósia (ver Figura 3.16 b)).



a)



c)



b)

Figura 3.16 – Revestimento das coberturas das construções em xisto: a) com palha (Carrazedo de Montenegro); b) com ardósia (Piódão); c) com telha cerâmica (Carrazedo de Montenegro).

## 3.2 Construções de elevado valor patrimonial

Para além das construções comuns, como as utilizadas para fins de habitação, em Portugal continental também se encontram muitas outras construções em xisto, algumas de elevado valor patrimonial associado, tais como castelos, edifícios religiosos, torres e pontes, e outras construções como moinhos e muros. Assim, no que se segue faz-se uma breve apresentação de alguns aspetos particulares destas diferentes tipologias construtivas, apresentando alguns exemplos existentes no território nacional.

### 3.2.1 Castelos

Os castelos, estruturas tipicamente robustas, outrora usadas para defesa e controlo de territórios, são símbolo máximo da soberania sobre a região onde se encontram implantados. Entre vários materiais de construção usados para construir estas estruturas de grande porte, encontra-se o xisto, que apesar de não ser o material mais comum nestas construções, encontra-se em alguns exemplos de grande valor patrimonial.

Um dos principais e mais conhecidos castelos construído com recurso ao xisto é o castelo de Bragança (ver Figura 3.17 a)). A construção do castelo de Bragança data do século XV e durou por um período de aproximadamente 30 anos. É constituído por um extenso conjunto de muralhas e conta com quinze torres e outros tantos panos de muro. As paredes da estrutura do castelo são elaboradas em alvenaria de xisto, sendo que os cunhais e as aberturas são elaborados com recurso a blocos de granito de maior porte que o xisto aplicado no interior das paredes. Para além do castelo de Bragança, ainda na região de Trás-os-Montes a torre de Mogadouro (ver Figura 3.17 b)) é outro exemplo de uma fortaleza elaborada com estrutura em alvenaria de xisto.





a)



b)

Figura 3.17 – Fortalezas na região de Trás-os-Montes: a) Castelo de Bragança; b) Torre de Mogadouro.

No Alentejo encontram-se também vários castelos, como são exemplo o castelo de Mértola (ver Figura 3.18 a)) e o castelo de Portel (ver Figura 3.18 b)), ambos com estrutura realizada em alvenaria de xisto, com uso pontual do granito nas zonas estruturalmente mais críticas, como cunhais e aberturas.



a)



b)

Figura 3.18 – Fortalezas na região do Alentejo: a) Castelo de Mértola; b) Castelo de Portel.

### 3.2.2 Edifícios religiosos

As igrejas e capelas são, desde a antiguidade e a par com os castelos, símbolos e referências marcantes da história e das populações. Muitas vezes encontram-se situados no núcleo urbano em lugar de destaque relativamente às construções populares circundantes.

Tal como as construções populares eram elaboradas com os materiais disponíveis localmente, as construções religiosas seguiam a mesma lógica, apesar de, em certos casos, em conjunto com o xisto, fosse aplicado granito em algumas zonas estruturais mais críticas. É interessante

observar, em algumas regiões do Minho, aldeias com construções populares em xisto e a igreja local totalmente construída em granito (por exemplo em Vilar de Mouros), muito provavelmente devido à existência de granito nas proximidades. Este facto permite depreender que no passado era reconhecido que o granito como um material de superior qualidade e durabilidade e, como tal, aplicado em construções de maior envergadura e importância.

São exemplo de construções religiosas em xisto a Igreja paroquial de Nossa Senhora da Conceição (ver Figura 3.19 a)) e a Igreja de São Pedro (ver Figura 3.19 b)), ambas situadas na aldeia de Piódão, na região de Arganil. É interessante denotar que apesar de em Piódão todas as construções serem edificadas com recurso ao xisto, as igrejas são os únicos edifícios nos quais foi aplicado reboco, tal como se pode observar na Figura 3.19.



a)



b)

Figura 3.19 – Edifícios religiosos: a) Igreja Paroquial de Nossa Senhora da Conceição, Piódão, Arganil b) Igreja de São Pedro, Piódão, Arganil.

### 3.2.3 Pontes

O xisto também serviu como material para a construção de várias pontes, como é o caso de muitas pontes existentes na região de Trás-os-Montes, existindo também alguns casos nas Beiras e Alentejo. Um dos exemplos mais notáveis de pontes construídas com recurso ao xisto é a Ponte Velha (ver Figura 3.20 a)) sobre o rio Malara, situada em Gimonde, distrito de Bragança. A Ponte Velha foi construída totalmente em xisto emparelhado assente com argamassa de barro. A ponte é constituída por seis arcos e guardas construídas também em xisto, tal como se observa na Figura 3.20 b).



a)



b)

Figura 3.20 – Ponte Velha em Gimonde, Distrito de Bragança.

Outra ponte construída totalmente com recurso ao xisto é a Ponte de Castro de Avelãs (ver Figura 3.21). Apesar de hoje em dia se encontrar muito alterada, a ponte, constituída por três grandes arcos em xisto, demonstra a aplicação no passado do xisto na construção deste tipo de estruturas.



Figura 3.21 – Ponte de Castro de Avelãs.

A Ponte do Porto (ver Figura 3.22), situada no Milhão, distrito de Bragança, é constituída por um só arco e, tal como a Ponte Velha, foi construída inteiramente em alvenaria de xisto incluindo as guardas.





Figura 3.22 – Ponte do Porto, Milhão, Bragança.

Outros exemplos de pontes na região de Bragança são: as pontes Carvas, Jorge e Granja na freguesia de Santa Maria; a Ponte Velha de Penacal em São Pedro de Sarracenos; a Ponte de Parada em Parada; a Ponte de Valbom em Milhão; e a Ponte de Alimonde em Carrazedo, todas construídas totalmente em alvenaria de xisto. Existe ainda no centro da cidade de Bragança, nomeadamente na freguesia da Sé, a Ponte dos Açougues que, contrariamente às restantes pontes do distrito de Bragança, esta foi construída em alvenaria de xisto e granito.

No distrito de Castelo Branco encontram-se as pontes de São João e Algozo ambas construídas com recurso à alvenaria de xisto, sendo que no caso da ponte de São João um dos tímpanos foi elaborado com recurso ao granito. Na região das Beiras destacam-se duas pontes, nomeadamente no concelho de Piódão, elaboradas com um só arco e construídas totalmente com recurso ao xisto (ver Figura 3.23).



Figura 3.23 – Pontes em Piódão.

Mais a sul, no distrito de Beja, a Ponte de maior relevo é a ponte de Mértola (ver Figura 3.24), apesar de pouco restar desta obra. Situada sobre o rio Guadiana, esta ruína é constituída pelos vestígios de uma construção da qual restam apenas seis pegões dispostos de forma curvilínea



em planta, com secção quadrangular, com exceção do sexto, junto ao leito do rio, que é ovalado, possui maiores dimensões e está disposto longitudinalmente à obra. As bases dos pégões usam matéria-prima local, o xisto, fazendo a reutilização de mármore de edifícios romanos e também de pedra de outras regiões, como os arenitos (IPPAR, 2008).



Figura 3.24 – Ponte de Mértola.

Ainda no distrito de Beja destacam-se mais duas pontes de referência, a Ponte de Ribeira de Cobres em Almodôvar, elaborada em alvenaria de xisto e tijolo, e a Ponte de Vila Ruiva em Beja, onde se detetam diversos materiais para além do xisto, nomeadamente granito, calcário e tijolo, provavelmente devido às várias reconstruções ocorridas ao longo dos tempos.

### **3.3 Outras construções**

#### **3.3.1 Moinhos**

No território nacional podem também encontrar-se moinhos de vento e de água construídos em alvenaria de xisto. Existem alguns moinhos de vento (ver Figura 3.25) no Baixo Alentejo e no Algarve. Segundo Ribeiro *et al.* (2008), estas estruturas ligeiramente cónicas apresentam dois pisos, podendo atingir os 5 metros de altura com estrutura de dois paramentos assente diretamente no afloramento rochoso com dimensões a variar entre os 1,50 metros na base até 1,00 metros no topo. A cobertura com estrutura em madeira é tradicionalmente revestida com palha.



Figura 3.25 – Moinhos de vento de Tavira (Ribeiro *et al.*, 2008).

Os moinhos de água em estrutura de xisto podem encontrar-se nas regiões de Trás-os-Montes, Beiras, Alentejo e Algarve. Estas estruturas têm normalmente uma geometria retangular podendo ser, em termos estruturais, semelhantes às habitações correntes em alvenaria tradicional de xisto. Em alguns casos, tal como menciona Ribeiro *et al.* (2008), quando o edifício é habitado podem ter dois pisos, sendo o primeiro piso habitado pelo moleiro e o rés-do-chão ou caboucos onde se encontra o sistema de moagem. Uma tipologia particular dos moinhos de água pode encontrar-se em Mértola, não habitável, constituídos por pequenas unidades retangulares distribuídas paralelamente ao leito do rio, como se pode observar na Figura 3.26.



Figura 3.26 – Azenhas de Mértola.

### 3.3.2 Muros

Os muros de separação de terrenos em xisto existem essencialmente nas regiões do Minho, Trás-os-Montes e Beiras, mas também podem ser encontrados na região do Douro vinhateiro e em parte do Alentejo, sendo que neste último caso os muros são realizados com xisto e taipa.

Na sua maioria os muros são realizados apenas com recurso ao xisto, podendo estes ter junta seca ou com argamassa de terra. No Minho encontram-se muros com mistura de xisto e

granito e em Trás-os-Montes juntamente com o xisto encontram-se elementos pétreos de quartzito. Um caso particular que merece referência são os muros da freguesia de Paul na região das Beiras. Estes são realizados com misturas de fiadas alternadas de xisto e calhaus rolados de granito, como se pode observar na Figura 3.27. No Alentejo são comuns os muros de taipa com fundação de xisto.



Figura 3.27 – Muros: a) muro e pequena construção executados com junta seca (Serra de Arga);  
b) muro executado com xisto e calhaus rolados de granito (Paul).

Tal como as paredes de xisto das habitações correntes, apresentadas na seção 3.1, os muros podem ser realizados com um, dois ou três paramentos e podem apresentar variações no seu aparelho, dependendo do tipo de xisto disponível para a construção e do local de implantação do muro. A aplicação ou não de argamassa, e a sua composição, era dependente da qualidade murária pretendida, sobretudo considerando os requisitos específicos de funcionalidade, durabilidade e estética.

As metodologias construtivas dos muros não diferem substancialmente das metodologias adotadas na construção das paredes das habitações. Na seção 3.1 foram já discutidas as metodologias construtivas características da alvenaria de xisto.

Considerando que estes muros são realizados com junta seca, ou com uma argamassa de baixa resistência. A sua estabilidade estrutural depende muito da qualidade das fundações. Mesmo que a construção acima das fundações seja de boa qualidade, a sua estabilidade ficará comprometida quando as fundações são mal executadas, podendo dar origem a danos ou mesmo ao seu colapso. As fundações dos muros em xisto, para além de terem a função de proporcionar uma base estável, devem resistir aos assentamentos diferenciais.

A eventual inclinação da face aparente dos muros está muito dependente da sua função e dimensões, que conseqüentemente influenciam a sua espessura por forma a garantir a estabilidade. Nesta linha refiram-se os muros de suporte de terras construídos em xisto, muito comuns na zona vinhateira do Douro, que podem ter inclinações acentuadas dependendo das cargas transmitidas pelo solo que suportam.

No topo dos muros é normalmente realizado o capeamento, com diversas soluções de execução. Este é de grande importância, pois serve essencialmente para ligar os diferentes paramentos no topo do muro e, tal como as pedras de travação, serve ainda para melhorar o comportamento conjunto dos panos. Para além disso, protege o topo do muro das intempéries e de outros tipos de ações físicas. No que concerne aos capeamentos dos muros de xisto, estes podem ser realizados com elementos na horizontal, inclinados ou aprumados (ver exemplos na Figura 3.28). Devido às características do xisto, o capeamento horizontal é o mais comum pois permite manter a ordem das fiadas de assentamento colmatando o muro com uma fiada que conecta os diferentes panos. O formato inclinado difere do anterior apenas no assentamento das pedras na diagonal no topo do muro. Por último, o capeamento aprumado é menos comum entre os três tipos, sendo o de mais difícil execução.

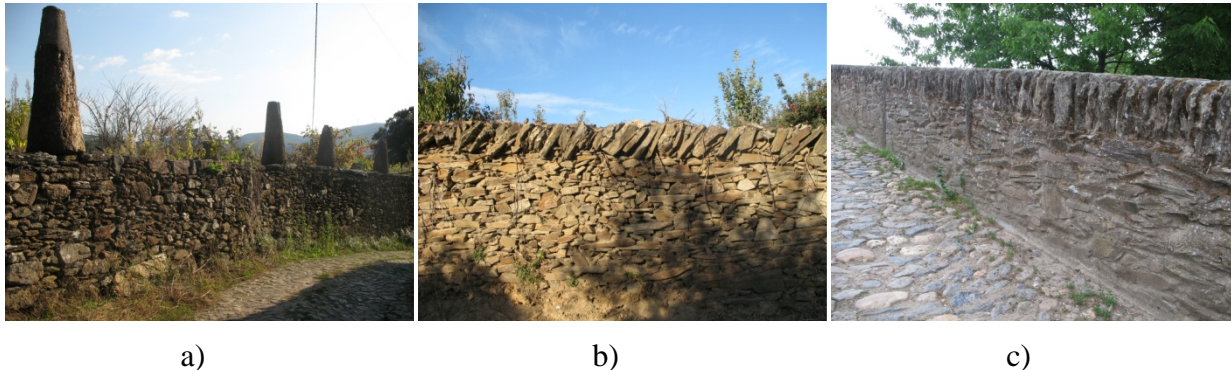


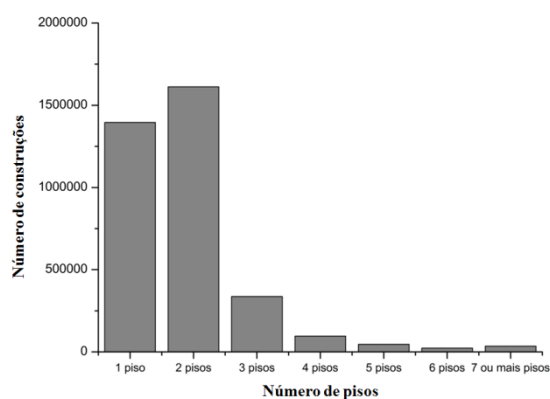
Figura 3.28 – Capeamento: a) horizontal (Vila de Mouros); b) inclinado (Carrazedo de Montenegro); c) aprumado (Gimonde).

### 3.4 Levantamento estatístico

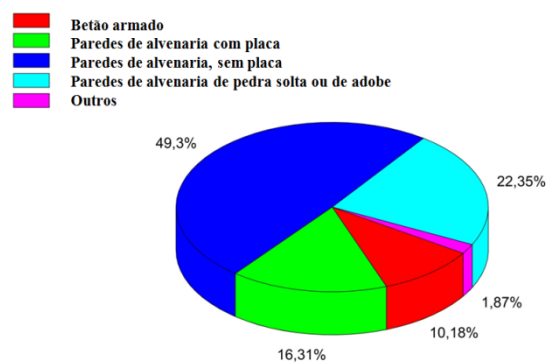
De acordo com os dados do Instituto Nacional de Estatística relativos aos Censos de 2011 (INE, 2013), em Portugal existem 3544389 edifícios clássicos, dos quais 50,6% são edifícios em alvenaria. Ainda de acordo com os dados apresentados pelos Censos de 2011 (INE, 2013), o património edificado até 1945 representa 14,4% do total dos edifícios. Do total dos edifícios

de alvenaria, 25,1% foram construídos antes de 1945. Na Figura 3.29 apresentam-se alguns dados estatísticos do parque edificado construído em Portugal até 1945.

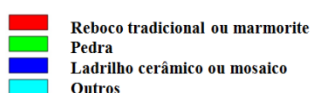
Assim sendo, conclui-se que a maior parte dos edifícios construídos em Portugal até 1945 possui um ou dois pisos. Conclui-se também que 88% dos edifícios tem paredes de alvenaria, que o reboco tradicional ou a marmorite existe em 66,6% dos edifícios, que a cobertura inclinada é a mais comum existindo em 98% dos edifícios, 98% dos edifícios possui as suas coberturas com revestimento em telha cerâmica ou de betão. Outro dado importante diz respeito ao estado de conservação do edificado, sendo que 52,5% tem necessidade de reparação e 7,8% dos edifícios encontram-se muito degradados.



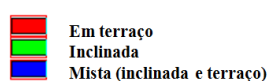
a)



b)



c)



d)



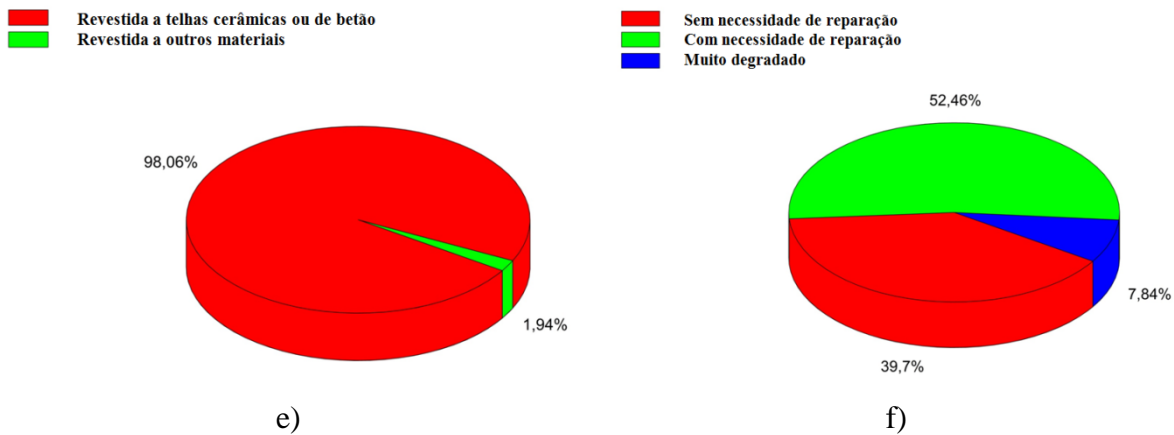


Figura 3.29 – Dados retirados dos Censos nacionais de 2011 relativos aos edifícios construídos até 1945 (INE, 2013): a) Construções de acordo com o número de pisos; b) Tipo de estrutura; c) Tipo de revestimento; d) Tipo de cobertura; e) Tipo de revestimento em coberturas inclinadas; f) Estado de conservação.

Nos dados que se apresentam, considerando os parâmetros avaliados nos Censos de 2011 (INE, 2013) e tendo em conta as características das paredes de alvenaria de xisto, entende-se que as construções tradicionais de alvenaria de xisto podem enquadrar-se nos parâmetros caracterizadores: paredes de alvenaria, sem placa e paredes de alvenaria de pedra solta.

Para uma análise mais detalhada das construções de xisto em Portugal, foram seleccionadas para este estudo seis localidades em zonas de onde foram extraídas as amostras de xisto para a caracterização material que se apresentará no capítulo 4. Assim sendo, considerou-se para análise as seguintes freguesias das regiões em estudo: Vilar de Mouros (Minho), Barqueiros (Minho), Carrazedo de Montenegro (Trás-os-Montes), Castelo Maior (Beiras), Piódão (Beiras) e Mértola (Alentejo).

### 3.4.1 Vilar de Mouros (Minho)

Na Figura 3.30 apresenta-se a análise efetuada ao edificado construído antes de 1945 na freguesia de Vilar de Mouros com base nos dados dos Censos de 2011 (INE, 2013).

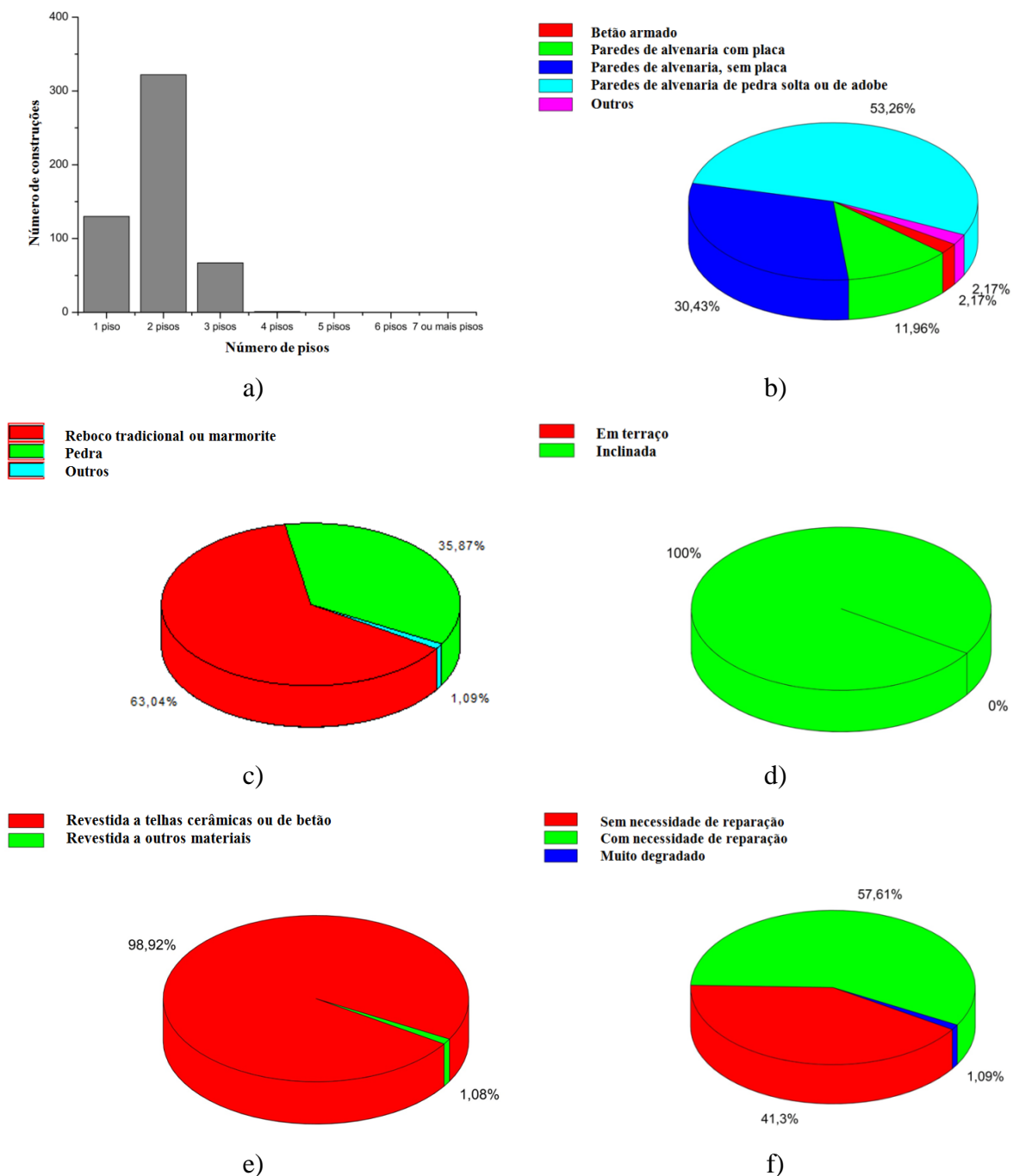


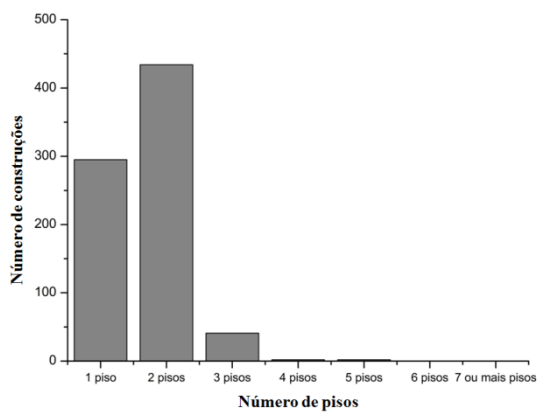
Figura 3.30 – Dados retirados dos censos de 2011 dos edifícios existentes em Vila de Mouros construídos até 1945 (INE, 2013): a) Construções de acordo com o número de pisos; b) Tipo de estrutura; c) Tipo de revestimento; d) Tipo de cobertura; e) Tipo de revestimento em coberturas inclinadas; f) Estado de conservação.

Em Vila de Mouros a maior parte dos edifícios construídos até 1945 possui um ou dois pisos. Conclui-se que 95,7% dos edifícios tem paredes de alvenaria e que o reboco tradicional ou a marmorite existe em 63% dos edifícios. Todos os edifícios possuem cobertura inclinada e que

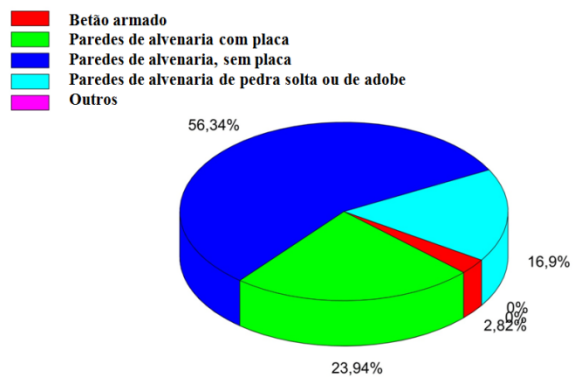
98,9% das coberturas inclinadas possuem revestimento em telha cerâmica ou de betão. Relativamente ao estado de conservação, 57,6% tem necessidades de reparação e 1,1% encontram-se muito degradados.

### 3.4.2 Barqueiros (Minho)

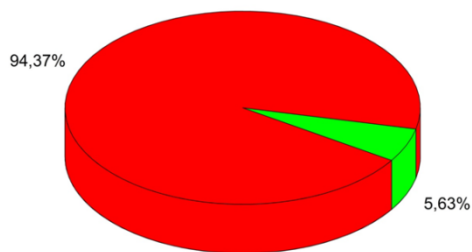
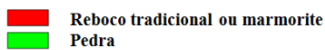
Na Figura 3.31 apresenta-se a análise efetuada ao edificado construído antes de 1945 na freguesia de Barqueiros com base nos dados dos Censos de 2011 (INE, 2013).



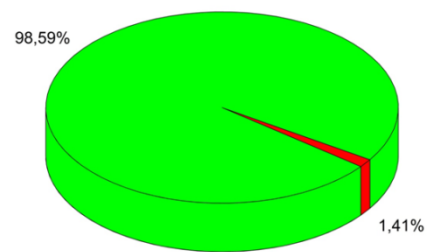
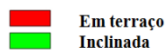
a)



b)



c)



d)



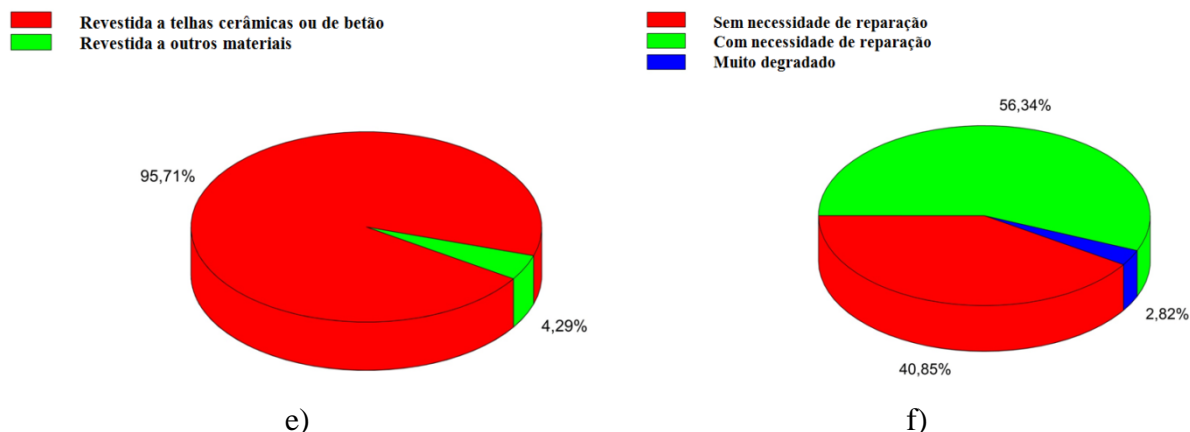
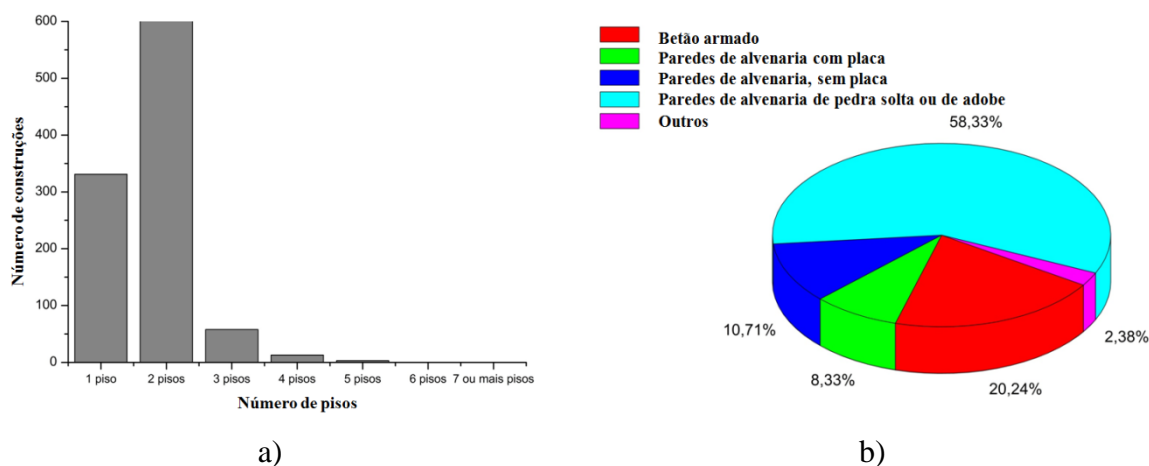


Figura 3.31 – Dados retirados dos censos de 2011 dos edifícios existentes em Barqueiros construídos até 1945 (INE, 2013): a) Construções de acordo com o número de pisos; b) Tipo de estrutura; c) Tipo de revestimento; d) Tipo de cobertura; e) Tipo de revestimento em coberturas inclinadas; f) Estado de conservação.

É possível concluir que a maior parte dos edifícios de Barqueiros construídos até 1945 possui um ou dois pisos. Conclui-se também que 97,2% dos edifícios tem paredes de alvenaria, que o reboco tradicional ou a marmorite existe em 94,4% dos edifícios tendo os restantes pedra à vista. A cobertura inclinada é a mais comum existindo em 98,6% dos edifícios sendo que 95,7% das coberturas inclinadas possuem revestimento em telha cerâmica ou de betão. Outro dado importante diz respeito ao estado de conservação destes edifícios, 56,3% tem necessidades de reparação e 2,8% encontram-se muito degradados.

### 3.4.3 Carrizado de Montenegro (Trás-os-Montes)

Na Figura 3.32 apresenta-se a análise efetuada ao edificado construído antes de 1945 na freguesia de Carrizado de Montenegro com base nos dados dos Censos de 2011 (INE, 2013).



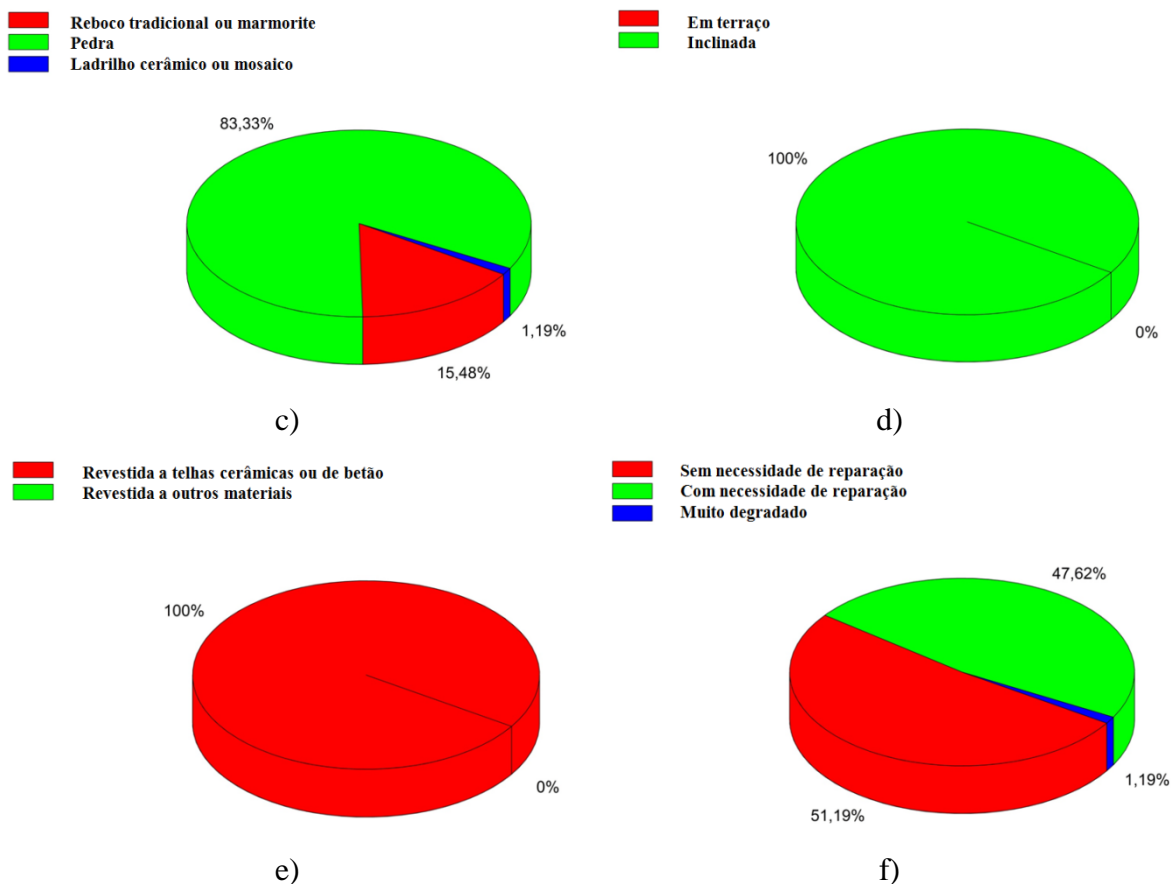


Figura 3.32 – Dados retirados dos censos de 2011 dos edifícios existentes em Carracedo de Montenegro construídos até 1945 (INE 2013): a) Construções de acordo com o número de pisos; b) Tipo de estrutura; c) Tipo de revestimento; d) Tipo de cobertura; e) Tipo de revestimento em coberturas inclinadas; f) Estado de conservação.

No que concerne a Carracedo de Montenegro a maior parte dos edifícios construídos até 1945 possui um ou dois pisos. Verifica-se que 77,4% dos edifícios tem paredes de alvenaria e 83,33% dos edifícios são revestidos com pedra ou possuem pedra à vista. Relativamente à cobertura, todos os edifícios possuem cobertura inclinada e revestimento em telha cerâmica ou de betão. Outro dado importante diz respeito ao estado de conservação destes edifícios, sendo que, 47,6% tem necessidades de reparação e 1,2% encontram-se muito degradados.

### 3.4.4 Castelo Maior (Beiras)

Na Figura 3.33 apresenta-se a análise efetuada ao edificado construído antes de 1945 na freguesia de Castelo Maior com base nos dados dos Censos de 2011 (INE, 2013).

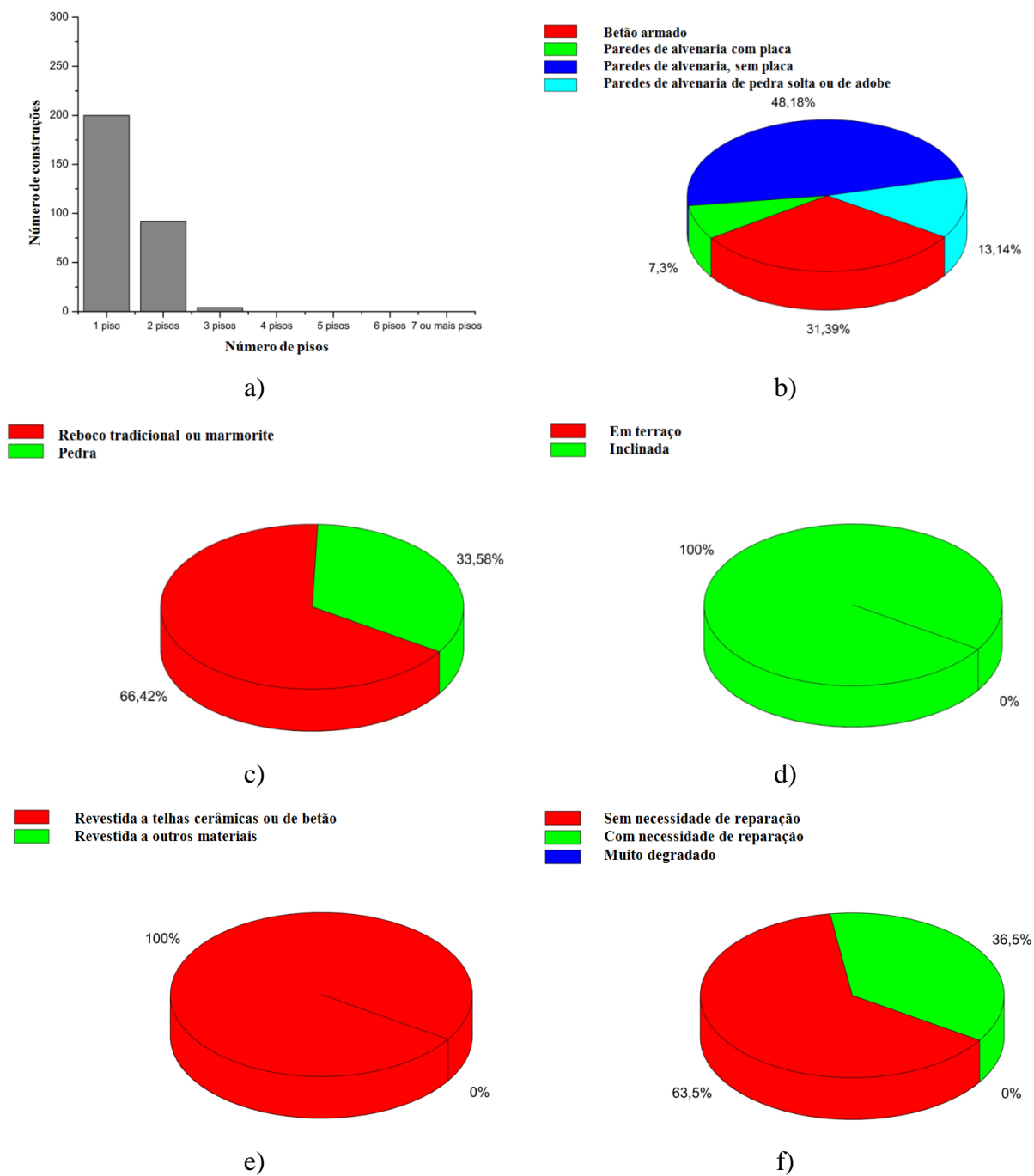
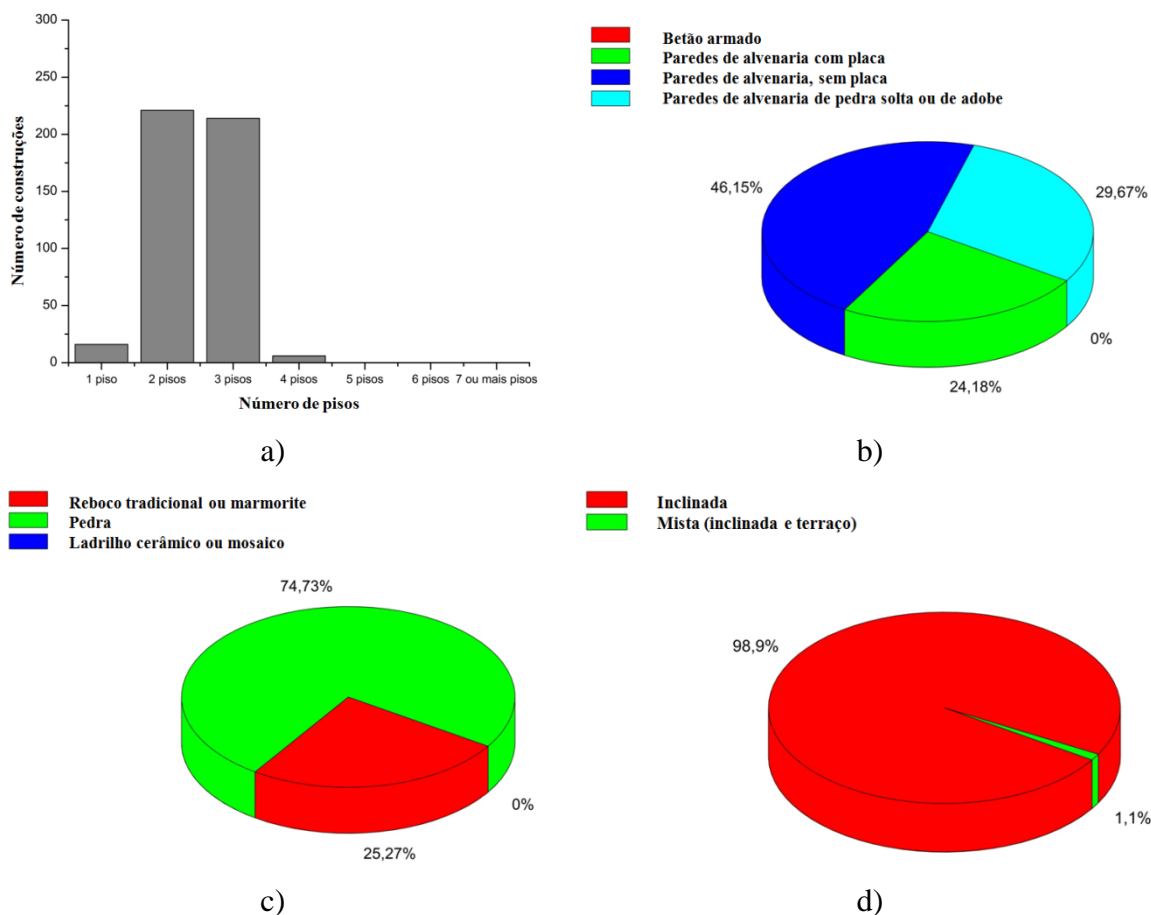


Figura 3.33 – Dados retirados dos censos de 2011 dos edifícios existentes em Castelo Maior construídos até 1945 (INE, 2013): a) Construções de acordo com o número de pisos; b) Tipo de estrutura; c) Tipo de revestimento; d) Tipo de cobertura; e) Tipo de revestimento em coberturas inclinadas; f) Estado de conservação.

Em Castelo Maior quase a totalidade dos edifícios construídos até 1945 possui um ou dois pisos. Regista-se que 68,6% dos edifícios tem paredes de alvenaria sendo que o reboco tradicional ou a marmorite existe em 66,4% dos edifícios tendo os restantes pedra à vista. Todos os edifícios possuem cobertura inclinada e revestimento em telha cerâmica ou de betão. No que diz respeito ao estado de conservação, 36,5% dos edifícios tem necessidades de reparação e não são declarados edifícios muito degradados.

### 3.4.5 Piódão (Beiras)

Na Figura 3.34 apresenta-se a análise efetuada ao edificado construído antes de 1945 na freguesia de Piódão com base nos dados dos Censos de 2011 (INE, 2013).



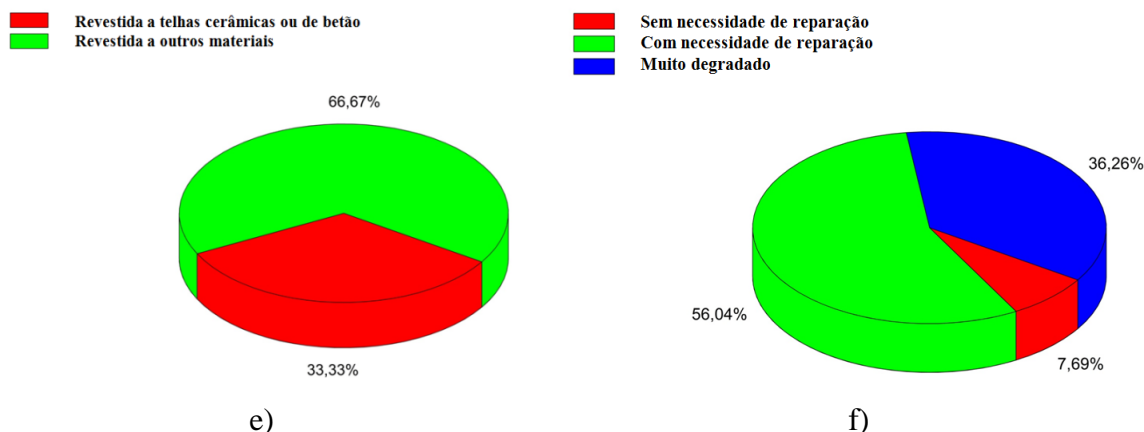


Figura 3.34 – Dados retirados dos censos de 2011 dos edifícios existentes em Piódão construídos até 1945 (INE, 2013): a) Construções de acordo com o número de pisos; b) Tipo de estrutura; c) Tipo de revestimento; d) Tipo de cobertura; e) Tipo de revestimento em coberturas inclinadas; f) Estado de conservação.

Analisando os dados de Piódão conclui-se que a maior parte dos edifícios construídos até 1945 possui dois ou três pisos. Conclui-se também que todos os edifícios possuem paredes de alvenaria, que 74,7% dos edifícios são revestidos com pedra ou possuem pedra à vista sendo que os restantes possuem reboco tradicional ou marmorite. A cobertura inclinada é a mais comum, existindo em 98,9% dos edifícios. 66,7% das coberturas inclinadas possuem revestimento em telha cerâmica ou de betão. No que concerne ao estado de conservação destes edifícios, 56% tem necessidades de reparação e 36,3% encontram-se muito degradados. Sendo Piódão uma aldeia integrante da marca turística “Aldeias do xisto”, de grande valor cultural e patrimonial no interior de Portugal, é de salientar o facto de apenas 7,7% do edificado ter sido identificado nos censos de 2011 na categoria dos edifícios sem necessidade de reparações.

### 3.4.6 Mértola (Alentejo)

Na Figura 3.35 apresenta-se a análise efetuada ao edificado construído na freguesia de Mértola antes de 1945 com base nos dados dos Censos de 2011 (INE, 2013).

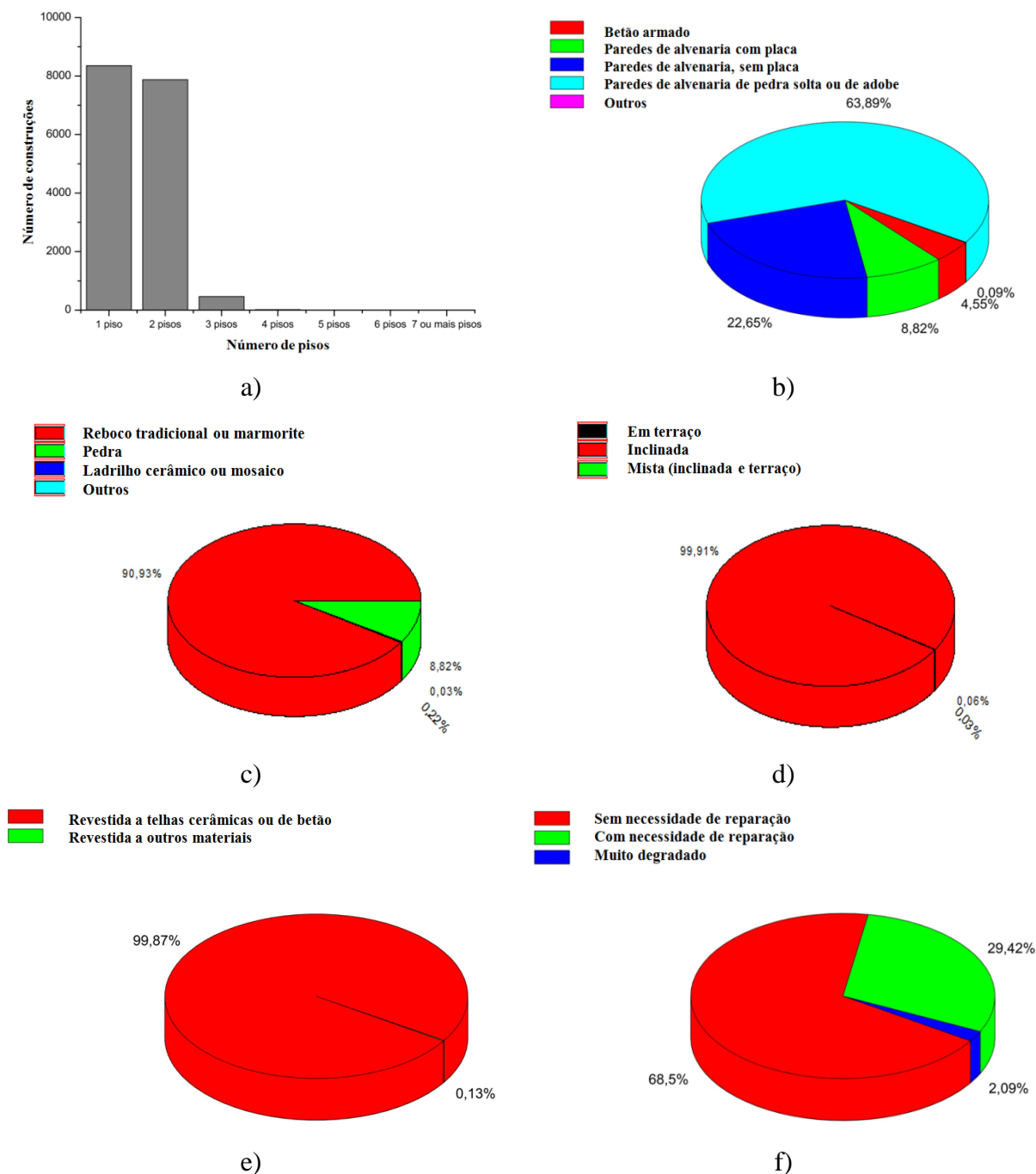


Figura 3.35 – Dados retirados dos censos de 2011 dos edifícios existentes em Mértola construídos até 1945 (INE, 2013): a) Construções de acordo com o número de pisos; b) Tipo de estrutura; c) Tipo de revestimento; d) Tipo de cobertura; e) Tipo de revestimento em coberturas inclinadas; f) Estado de conservação.

Relativamente a Mértola conclui-se que a maior parte dos edifícios construídos até 1945 possui um ou dois pisos. Também se conclui que 95,4% dos edifícios tem paredes de alvenaria que confirma um claro domínio da construção tradicional. O reboco tradicional ou a marmorite existe em 90,9% dos edifícios. A cobertura da quase totalidade dos edifícios é

inclinada e possui revestimento em telha cerâmica ou de betão. Considerando os dados relativos ao estado de conservação dos edifícios desta localidade, conclui-se que 29,4% apresenta necessidades de reparação e 2,1% encontram-se muito degradados.

### **3.4 Danos comuns nas alvenarias de xisto**

As alvenarias inevitavelmente sofrem dano com o tempo (Oliveira, 2003). Este dano pode estar associado intrinsecamente aos materiais ou aos elementos estruturais. Independentemente da natureza do dano, este poderá em certas circunstâncias afetar o comportamento global da construção, ou até comprometer o seu desempenho e segurança estrutural.

De uma forma mais particular, os danos relacionados com as alvenarias de pedra podem ser de três tipos: deformação, fissuração e deslocação. De acordo com Barichello (2004), as deformações surgem quando se regista uma variação da forma geométrica do elemento estrutural sem a presença de comportamento não linear material. A fissuração sucede quando se ultrapassa o limite elástico do material. No caso da deslocação, esta pode ser registada de várias formas; como deslocação vertical, em rotação ou com a combinação de ambos.

Carocci (2008) refere que um estudo sistemático dos elementos estruturais leva naturalmente à aquisição de informação sobre os agentes da degradação e as formas da sua manifestação mais comuns em cada região, bem como a identificação do modo de reparação ou reforço mais eficaz, com base no conhecimento do comportamento das estruturas de alvenaria. Assim, pretende-se neste ponto apresentar os principais danos observados nas construções tradicionais em alvenaria de xisto. As zonas onde foram observadas os danos e anomalias aqui discutidos referem-se às mesmas zonas analisadas no ponto anterior, nomeadamente as regiões do Minho, Trás-os-Montes, Beiras e Alentejo. Serão apresentados os principais danos relacionados com o material xisto, bem como com os elementos estruturais de alvenaria de xisto.

#### **3.4.1 Alterabilidade das rochas**

A alteração das rochas está relacionada com as modificações causadas pelos agentes externos, podendo-se considerar o estado de um elemento pétreo como degradado quando as alterações físicas ou químicas sofridas originam um elemento diferente do inicial. De uma forma geral, a transformação das rochas que leva à degradação é o processo natural de adaptação ao meio ambiente.

Aires-Barros (2001) define que a alteração é um processo de transformação dos minerais das rochas em que a entropia do sistema aumenta com o estabelecimento da desordem sobre a ordem nas fases desse sistema pela destruição das redes cristalinas dos minerais e a movimentação dos seus iões constituintes que se deslocam para novas posições em estruturas mais abertas. Por sua vez, Carvalho (1996) refere que a alteração das rochas usada como sinónimo de meteorização diz respeito às modificações causadas nestas pelos agentes externos, sobretudo os relacionados com as condições de humidade e de temperatura ambientais. Basicamente, durante o processo de degradação, os minerais primários das rochas tendem a adaptar-se ao novo ambiente, surgindo novos minerais, designados por secundários. Assim sendo, as principais ações químicas podem ser definidas pela redução, hidrólise, oxidação e dissolução. Por outro lado, as ações físicas podem ser definidas por expansão térmica, expansão por ciclos gelo/degelo, expansão por descompressão, ações mecânicas da água e vento, ou ações mecânicas orgânicas ou biológicas. É claro que para a compreensão do processo de degradação de uma rocha é necessário considerar outros fatores capazes de influenciar o processo, tais como, o tipo de rochas, as características da mesma ou o ambiente com o qual interage.

De uma forma geral, a alteração das rochas pode ser originada por ações denominadas secundárias, pela alteração meteórica ou pela alteração devida a parâmetros termo-higrométricos. As alterações secundárias ocorrem na primeira fase de alteração das rochas, tendo como principais reperfutores as ações físico-químicas originadas pelo meio ambiente. Estas ações vão originar o primeiro estado de deterioração, ou seja, basicamente vão provocar a primeira alteração da rocha, expondo a sua estrutura mineral ao ambiente.

O principal agente atuador sobre os elementos pétreos provocador de alterações secundárias é a água alterada pelos agentes existentes na atmosfera, tais como o oxigénio ou dióxido de carbono. Estes elementos, através da água, vão reagir com os minerais dos elementos pétreos suscitando a alteração secundária.

As alterações meteóricas, tal como referido anteriormente, definem a obtenção de um novo estado de equilíbrio com o ambiente. Estas alterações surgem através da origem de novos minerais e, por sua vez, de uma nova estrutura mineralógica da rocha original que tinha sido perdida no momento em que a rocha foi exposta aos agentes físico-químicos do meio ambiente, ou seja às alterações secundárias.



O fator tempo é crucial na meteorização, dado que estas alterações ocorrem a uma velocidade de tal modo impercetível, que a sua deteção e posterior análise só é efetuada na fase final do fenómeno. De facto, pode-se concluir que a alteração meteórica é uma nova metamorfose que a rocha original sofre num dado período de tempo originando uma nova estrutura geológica.

Associado ao fator tempo, aparecem outros fatores como o vento, a temperatura, a pressão atmosférica ou a humidade. Fatores que influenciam diretamente a velocidade de ocorrência da alteração meteórica das rochas. Assim, estes fatores, que influenciam o período temporal, interagem com a estrutura durante o período de vida desta e podem ser denominados por parâmetros termo-higrométricos, também eles causadores de alterações nos elementos pétreos. A compreensão dos parâmetros termo-higrométricos existentes numa dada localização de uma construção pode ajudar à compreensão das alterações dos elementos pétreos, dado que é fácil a caracterização do microclima local.

Conclui-se então que a alteração e alterabilidade das rochas dá-se devido a fenómenos físicos, químicos e biológicos, que individualmente ou combinados entre si suscitam reações que culminam em danos cientificamente denominados por decaimento. Tal como refere Aires-Barros (2001), a distinção entre os diversos tipos de decaimento é normalmente bastante difícil, pois os fenómenos de índole química têm efeitos físicos, uma transformação física desencadeia reações químicas e as biológicas repercutem-se em modificações físicas e químicas.

No caso particular das estruturas de alvenaria de xisto, a análise destes fenómenos é bastante importante, não só pela estrutura geológica do xisto, mas também pelas técnicas construtivas aplicadas na elaboração destas construções. De facto, a maioria das construções tradicionais em xisto existentes no território nacional não possuem qualquer tipo de reboco, que permitiria uma maior proteção aos mecanismos e agentes de decaimento. Adicionalmente, a estrutura das paredes encontra-se sujeita à proliferação dos agentes biológicos devido aos espaços abertos e ao tipo de ligante tradicionalmente aplicado. Tal situação, aliada à estrutura mineralógica do xisto e à localização geográfica deste tipo de edifícios em Portugal, leva a que surjam danos característicos destas construções, tal como a erosão do xisto, que resulta da ação conjunta dos agentes de decaimento físicos e químicos, e que será alvo de uma análise aprofundada.

### 3.4.2 Danos relacionados com os elementos pétreos

De uma forma geral, os danos nos elementos pétreos das estruturas podem ter origens físicas, químicas ou biológicas. Verifica-se, no entanto, que estes três fenómenos são bastante difíceis de distinguir. Segundo Aires-Barros (2001), os efeitos somam-se, convergem e as causas entrecruzam-se. Os fenómenos de índole química têm efeitos físicos, uma transformação física desencadeia reações químicas e as ações biológicas repercutem-se em modificações físicas e químicas.

Como já foi referido anteriormente, na sua maioria as construções em xisto não possuem reboco, nem qualquer tipo de revestimento, permanecendo a estrutura de alvenaria de xisto exposta ao ambiente durante todo o período de vida útil da construção. Esta exposição ao ambiente é uma das principais causas para o aparecimento de vários danos não estruturais relacionados com a deterioração do material, que com o passar do tempo podem até originar danos estruturais ou, pelo menos, criar uma maior suscetibilidade para a ocorrência dos mesmos.

Um dos danos mais graves em estruturas tradicionais de xisto é a erosão da pedra. A erosão do xisto surge habitualmente nos pisos térreos dos edifícios, normalmente nas paredes exteriores dos compartimentos onde se encontravam animais. Este dano tem origem química relacionada com os dejetos dos animais, aliada às diferenças de temperatura existente entre o interior e o exterior da construção (ver Figura 3.36).



Figura 3.36 – Erosão do xisto numa habitação na zona de Arganil.

Segundo Aires- Barros (2001), no processo de cristalização de sais em meios porosos, os sais acumulam-se nas paredes dos edifícios devido à presença de iões solúveis provenientes da alteração das rochas, solos e outros materiais usados nas construções. Também podem provir da atmosfera, mais ou menos contaminada, como podem resultar de metabolismo orgânico.

Estes íons podem ser transportados em soluções aquosas diluídas e penetrar no interior dos materiais e circular ou percolar através de poros, fissuras, fraturas, etc.

De acordo com Bell (2007), os sais podem causar eflorescências ao cristalizar na superfície das rochas. Por sua vez, as criptoflorescências podem provocar destacamentos de material, devido à ocorrência da cristalização no interior do material. Bell (2007) explica que as pressões produzidas pela cristalização de sais em pequenos poros são apreciáveis e, dependendo do tipo de sais, podem ser suficientes para causar a degradação, como por exemplo; a halite ( $\text{NaCl}$ ) que exerce uma pressão de 200MPa, a gipsite ( $\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) que causa uma pressão de 100MPa e o anidrido ( $\text{CaSO}_4$ ) que desenvolve uma pressão de 120MPa.

Assim, tendo em consideração a estrutura laminar do xisto aliada a pequenas fraturas que existem normalmente nas rochas, este material natural é um meio suscetível de propagação de sais resultantes de metabolismos orgânicos. Aires-Barros (2001) refere ainda que estes depósitos salinos não são estáveis, transformando-se com o tempo em função da temperatura e humidade do ar. Sendo assim, o microclima condiciona a atividade dos sais solúveis que se concentram e acumulam sempre que a água se evapora. Também se cristalizam quando a humidade relativa da atmosfera envolvente diminui. Alguns sais dissolvem-se e cristalizam periodicamente conforme as oscilações da humidade e temperatura do ar. Estes fenómenos de cristalização, por vezes mesmo cíclicos, contribuem para a alteração das rochas devido às pressões geradas por cristalização exercidas sobre as paredes dos poros e canalículos das rochas.

Por outro lado, o gelo é um dos fenómenos principais na deterioração das rochas utilizadas na construção. A porosidade, o tamanho dos poros e o grau de saturação são os principais fatores a ter em consideração no que concerne à suscetibilidade das rochas aos ciclos gelo/degelo. De acordo com Bell (2007), à medida que a água congela aumenta de volume dando azo ao aumento da pressão nos poros. Esta ação é reforçada pela deslocação da água nos poros quando se cria uma frente gelada. Quando o gelo é formado, a pressão aumenta rapidamente com a diminuição da temperatura, sendo que, a uma temperatura de aproximadamente  $-22^\circ\text{C}$ , o gelo pode exercer uma pressão de 200MPa. De facto, o tamanho de poro crítico em termos de durabilidade ao gelo/degelo parece ser de cerca de 0,005mm. Assim sendo, e não considerando outras propriedades, rochas com grandes poros permitem melhor circulação da água e menor retenção desta o que faz com que seja menos suscetível à formação de gelo dentro dos poros. Bell (2007) define que rochas de grão fino que têm uma absorção de água superior a 5% são mais suscetíveis aos ciclos gelo/degelo, enquanto aquelas que têm uma

absorção inferior a 1% têm maior durabilidade. Devido à sua importância, neste trabalho foram realizados ensaios de absorção de água sobre amostras de xisto recolhidas em cinco regiões portuguesas, cujos resultados serão discutidos no capítulo 4.

A erosão do xisto apresenta-se normalmente no piso térreo em zonas da fachada mais expostas aos raios solares e caracteriza-se pela erosão e deformação das pedras de xisto criando um formato arredondado e alveolar dos elementos constituintes da parede da fachada, tal como se apresenta na Figura 3.37. É interessante observar que este tipo de dano não foi detetado em nenhuma construção visitada da região do Alentejo, sendo observado apenas nas regiões do Minho, Trás-os-Montes e Beiras o que comprova a influência da variação de temperatura na ocorrência deste fenómeno.

Por outro lado, a exposição ao calor permite a expansão dos diversos constituintes dos xistos podendo causar a esfoliação das superfícies. Sendo os xistos constituídos por uma grande diversidade de minerais, este é um fenómeno que pode causar muitos danos. De facto, tal como refere Bell (2007), o quartzo é um dos minerais mais expansivos, expandindo cerca 3,7% entre a temperatura ambiente e os 570°C. Entre os vários minerais existentes nos xistos, o quartzo é comum, principalmente nos xistos da região de Trás-os-Montes o que cria maior suscetibilidade a este fenómeno.



Figura 3.37 – Erosão de xisto em habitações de Trás-os-Montes.

Outro dano comum relacionado com o elemento pétreo em análise é a fratura das pedras de xisto, tal como se pode observar na Figura 3.38. Este dano pode estar associado a elevados esforços de compressão ou flexão na pedra devido a concentração de tensões localizadas. Normalmente, os esforços podem ser oriundos de cargas excessivas nas paredes, ou de pressões localizadas provocadas por elementos, de origem química ou biológica, estranhos à

alvenaria. Em qualquer das situações, a deslocação dos elementos da alvenaria origina a fendilhação da pedra, normalmente com direção perpendicular ao plano de anisotropia.



Figura 3.38 – Fratura de pedras de xisto (Carrazedo de Montenegro).

### 3.4.3 Destacamento ou deterioração do reboco

Como foi referido anteriormente, não é muito comum a existência de reboco em construções de xisto em Portugal, podendo, no entanto, ser encontrado em construções de maior importância ou valor (construções senhoriais ou religiosas, por exemplo). A deterioração do reboco, quando este existe, é um dano comumente detetado nestas construções, originado tanto por falta de manutenção como por movimentos da própria estrutura de alvenaria, tendo como situação mais gravosa o destacamento do reboco que expõe a estrutura às agressões do meio ambiente.

Tendo o reboco como uma das funções a proteção e revestimento da estrutura de alvenaria, quando este se encontra debilitado ou mesmo ausente, pode dar azo ao surgimento de danos estruturais relacionados com a exposição ao meio ambiente, como por exemplo o aparecimento de vegetação e microrganismos ou mesmo erosão do ligante e até degradação do xisto (ver Figura 3.39).



Figura 3.39 – Deterioração e destacamento do reboco (Vilar de Mouros).



### **3.4.4 Alteração ou ausência da argamassa de assentamento**

Na construção tradicional em xisto, o ligante mais comum era a argamassa de terra, sendo que também em pequenas construções como muros a alvenaria era construída com junta seca (ver Figura 3.27). Menos frequentemente era aplicado um ligante à base de cal, ou em casos de construções mais recentes ou em intervenções recentes de recuperação ou reabilitação é ainda possível encontrar argamassas de cimento.

Os danos observados mais comuns associados com a argamassa ligante estão relacionados com a alteração das características iniciais da argamassa. No entanto, esta situação, quando se trata de argamassas tradicionais de terra, não é particularmente gravosa, pois estas argamassas têm já uma baixa resistência mecânica, logo uma alteração nas propriedades da argamassa poderá não ter um impacto significativo nas propriedades mecânicas da estrutura das paredes de alvenaria de xisto.

Um dano associado às construções ou intervenções mais recentes, mas não menos gravoso, é a ocorrência de sais oriunda da aplicação de argamassas de cimento que por reação química com a água criam-se manchas brancas sobretudo nas paredes não rebocadas.

### **3.4.5 Fendilhação ou deformação de elementos em aberturas**

Em edificações de xisto as aberturas são uma das zonas mais sensíveis da construção, tendo em conta o diminuto tamanho dos elementos de xisto em algumas construções e a necessidade de uma adequada distribuição de esforços nos paramentos que constituem as paredes. Para um bom funcionamento dos paramentos nas zonas das aberturas, são normalmente usados outros materiais para a construção das padieiras, como a madeira ou o granito. Estes elementos, quando elaborados em madeira, podem sofrer deformações originadas por sobrecargas excessivas (ver Figura 3.40 a)), ou por degradação da própria madeira. Quando as padieiras são construídas em granito é comum o aparecimento de fissuras (ver Figura 3.40 b)) ou mesmo colapso originado por solicitações elevadas, na sua maioria derivadas de deformações da estrutura de suporte.



Figura 3.40 – Danos em padieiras: a) flexão em padieira de madeira (Gimonde); b) fissura em padieira de granito (Vilar de Mouros).

### 3.4.6 Fissuração nas paredes

De acordo com Tubi (2006), as fissuras são consequência de uma deformação de partes da parede. As principais causas de fissuração em paredes de xisto são: danos provocados por esforços de corte vertical, danos provocados por trações geralmente horizontais e danos provocados por esmagamento. As duas primeiras lesões podem facilmente ser confundidas, visto ambas poderem ter origem em problemas nas fundações. No entanto, as primeiras podem também ter origem em diminuições diferenciais da estrutura da parede, enquanto as segundas podem ter origem em rotações do edifício, situações estas já mencionadas anteriormente e definidas por Baruchello (2004).

Relativamente aos danos provocados por esmagamento, segundo Baruchello (2004) estes podem derivar de tensões de compressão excessivas. Sendo que as principais causas resultam do insuficiente dimensionamento, da degradação, da má qualidade originária da argamassa ligante, das sobrecargas excessivas, do aumento das cargas por alteração de utilização ou por sobrelevação da estrutura.

A presença de fissuras diagonais nos paramentos de construções em xisto tem normalmente origem no mau funcionamento das fundações (ex: assentamentos ou outros fenómenos similares), situação comum em algumas destas construções implantadas em declives (ver Figura 3.41).



Figura 3.41 – Fendas diagonais (Carrazedo de Montenegro).

O mau funcionamento ou assentamentos das fundações das construções de alvenaria de pedra são dos problemas mais correntes. Pode-se considerar que no caso das construções de alvenaria de xisto este dano torna-se mais gravoso, principalmente em construções executadas com paredes de três paramentos, onde são aplicados materiais de menor dimensão.

Segundo Tubi (2006), os assentamentos podem ter origem no insuficiente dimensionamento das fundações ou por instabilidade do terreno. No caso das construções populares o dimensionamento não era considerado formalmente e, de uma forma geral, havia algum desconhecimento relativo aos solos de fundação e às suas propriedades. As alterações no meio circundante às construções tradicionais, quer seja por implantação de construções novas (sistemas mais rígidos) confinadas com as antigas, quer seja por vibrações provocadas pelo tráfego ou pela implantação de novas infraestruturas, podem afetar severamente o funcionamento da estrutura das construções tradicionais, originando danos que se apresentam, por exemplo, sob a forma de fissuras (ver Figura 3.42), ou mesmo, levar ao colapso parcial ou total de paramentos das paredes.



Figura 3.42 – Diversas fissuras nas paredes originadas pela alteração do meio circundante à construção (Bragança).



O aumento de cargas concentradas, provenientes do apoio de um elemento estrutural, como uma viga de pavimento ou de cobertura ou de muros, podem originar fendilhação nas zonas inferiores aos apoios.

### 3.4.7 Colapso parcial de elementos

Um dos tipos de dano mais comuns em estruturas de alvenaria de xisto evidencia-se sobretudo em paredes construídas com dois ou três paramentos e com recurso a pedras de xisto de pequena dimensão. Tubi (2006) denomina este fenómeno por impulso “hidráulico” do preenchimento do espaço intermédio entre dois paramentos constituintes da parede, que se caracteriza pela “barriga” formada num ou nos dois paramentos em simultâneo. Os impulsos são provocados pelos assentamentos dos materiais de preenchimento devido a vibrações, infiltrações de água ou outras causas. Da análise dos exemplos das construções da zona de Trás-os-Montes, onde era comum a construção de paredes de dois ou três paramentos, é possível observar o colapso do paramento exterior da parede (ver Figura 3.43 a)) e a “barriga” (Figura 3.43 b)).



a)



b)

Figura 3.43 – Danos em paredes duplas: a) colapso do paramento exterior (Santa Maria de Émeres);  
b) barriga na zona da empena e fachada principal (Santa Maria de Émeres).

Outra causa possível para o colapso de paramentos exteriores está diretamente relacionada com a capacidade limitada da parede para sustentar cargas através de apenas um dos seus paramentos. Quando as cargas dos diferentes elementos estruturais não se encontram bem distribuídas e descarregam a sua ação essencialmente sobre um dos paramentos da parede, normalmente o paramento interior, ou descarregam sobre o material de preenchimento, existe a tendência para o desenvolvimento de impulsos horizontais sobre os paramentos, originando a referida “barriga”.

A altura das paredes e a espessura das mesmas, principalmente quando os paramentos também são bastante esbeltos, podem ser fatores fulcrais para a promoção, perante eventuais cargas elevadas, de mecanismos de flexão nos paramentos constituintes das paredes que, como se ilustra na Figura 3.44, podem ser de duas formas: com afastamento relativo dos dois paramentos (ver Figura 3.44 a)) ou através da flexão de ambos os paramentos na mesma direção (ver Figura 3.44 b)).



Figura 3.44 – Flexão de paredes com dois paramentos: a) afastamento dos paramentos exteriores; b) flexão de ambos os paramentos na mesma direção (Tubi, 2006).

O colapso total de paredes surge muitas vezes associado às estruturas horizontais, de pavimento ou cobertura, que através de movimentos horizontais ou de rotação provocam impulsos sobre as paredes de fachada que no limite originam a ocorrência do colapso (ver Figura 3.45 a)).

As coberturas têm em muitas situações particular responsabilidade neste tipo de colapso, principalmente quando se trata de coberturas impulsivas que tendem a promover o colapso das paredes de fachada ou das zonas de cumhal da construção (ver Figura 3.45 b)), colapsos estes comuns na generalidade das construções de alvenaria de pedra.



a)



b)

Figura 3.45 – Colapso: a) Parede de fachada (Vilar de Mouros); b) Cunhal (Carrazedo de Montenegro).

### 3.4.8 Colapso total da construção ou ruína

Como resultado da ação da natureza sobre a matéria, a ruína arquitetónica tem sido objeto de várias leituras e significados que vêm assumindo frequentemente conteúdos antagónicos. Condição necessária para a valorização da qualidade patrimonial, a existência do objeto no tempo garante a capacidade ou a qualidade evocativa de um monumento, ao mesmo tempo que provoca a perda ou degradação da sua materialidade. Em Portugal, o significado e entendimento da ruína como objeto histórico mas também artístico (ver Figura 3.46), tem assumido várias valências de acordo com as suas características cronológicas e arquitetónicas (Tomé, 2002).



a)



b)

Figura 3.46 – Exemplos de estruturas de elevado valor patrimonial ou cultural em ruína: a) ponte sobre o rio Guadiana em Mértola; b) aldeias do xisto em Arganil.

Em Portugal encontra-se muitos exemplos de construções em xisto, populares ou monumentais, em estado de total ruína (ver exemplos na Figura 3.47). Felizmente, com a proliferação da marca turística das aldeias do xisto e com a comprovação do valor patrimonial

deste tipo de construção como imagem da cultura Portuguesa, tem vindo a ser implementados restauros e reabilitações de muitas das construções de xisto.



Figura 3.47 – Construções de xisto em estado de ruína (Santa Maria de Émeres).

Assim, para suportar essas intervenções de reabilitação, é reconhecidamente necessário um conhecimento profundo dos materiais, das soluções construtivas e do funcionamento mecânico deste tipo de alvenaria nas construções de xisto para evitar o avanço da sua degradação e eventual ruína deste vasto património construído em xisto.

## Capítulo 4

# CARACTERIZAÇÃO MATERIAL DO XISTO

A durabilidade de uma rocha é medida de acordo com a sua vida útil e, desta forma, com a capacidade de manter o seu tamanho, forma, resistência e aparência original durante um certo período de tempo (Bell, 2007).

As construções em alvenaria de xisto possuem características particulares devido às propriedades do material usado na sua construção. O conhecimento das propriedades físico-químicas e mecânicas do material é fundamental para o desenvolvimento de ações de construção ou recuperação das construções com maior grau de precisão.

A textura e a porosidade de uma rocha afeta a potencial degradação, e a capacidade de expansão, congelamento e dissolução que esta pode sofrer. Por exemplo, rochas de grão fino são mais facilmente degradáveis do que as de grão mais grosseiro. A retenção de água numa rocha com pequenos poros é maior do que numa rocha com grandes poros e assim estas últimas são mais propensas à degradação pela ação do gelo (Bell, 2007).

As construções tradicionais de alvenaria de xisto encontram-se distribuídas em Portugal em zonas onde, por norma, o subsolo contém xisto. Através do levantamento tipológico realizado no capítulo 3 identificou-se que as construções em xisto encontram-se sobretudo nas regiões do Minho, Trás-os-Montes, Beiras e Alentejo. Sabendo que as tipologias variam com o tipo de xisto extraído localmente, para uma melhor compreensão da mecânica das estruturas de

xisto torna-se necessário o estudo dos diferentes xistos utilizados na construção nas diferentes regiões de Portugal.

Para tal, foram seleccionadas as zonas onde se podem encontrar, com expressão mais significativa, construções tradicionais em xisto. Numa primeira fase foram contactadas as empresas com licença de extração de xisto concluindo-se que, devido à escassez de locais de extração, não seria possível a obtenção de amostras representativas do xisto usado nas alvenarias da construção tradicional.

Por cedência das empresas de extração, foram obtidas amostras para ensaio em Vila Nova de Foz Côa e Sobral de São Miguel, permitindo analisar os xistos da região das Beiras (ver Figura 4.1). Relativamente ao Norte de Portugal, as amostras foram extraídas em terrenos nas imediações de zonas onde existe construção tradicional em xisto, especificamente para este estudo. Assim, na região do Minho foram recolhidas amostras na Serra de Arga e em Barqueiros e na região de Trás-os-Montes as amostras foram recolhidas em Carrazedo de Montenegro (ver Figura 4.1). Devido à reduzida expressão da construção em xisto na região do Alentejo, a sua caracterização não foi considerada neste estudo.

Assim, no âmbito desta tese foram analisadas amostras de xisto de cinco zonas.



Figura 4.1 – Locais de extração do xisto ensaiado.



A escassez de documentação relacionada com o xisto do território português justifica a elaboração de ensaios, destrutivos e não destrutivos, aos diferentes xistos usados na construção tradicional em Portugal por forma a se obter as propriedades deste material.

A correta e precisa preparação dos provetes para ensaio é essencial para a coerência dos resultados. De facto, devido à sua foliagem o xisto torna-se muito difícil de cortar, não só pela fragilidade associada a este, lascando muito facilmente, mas também pela diversidade da disposição dos seus planos de anisotropia.

Como mencionado no capítulo 2, derivado do processo da formação geológica dos xistos, estes podem apresentar uma xistosidade com orientação paralela regular ou paralela prismática. Este facto obriga a que seja necessário particular cuidado na execução do corte dos provetes no decorrer da preparação destes para ensaio. Assim, para este estudo, apesar da elevada heterogeneidade do xisto, procurou-se obter provetes regulares entre eles e com um plano de anisotropia paralelo a uma das faces dos provetes (ver Figura 4.2).

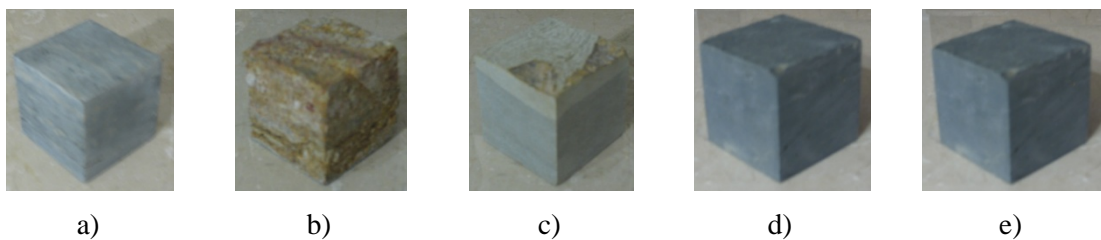


Figura 4.2 – Provetes: a) Vila Nova de Foz Côa; b) Serra de Arga; c) Carrazedo de Montenegro; d) Sobral de São Miguel; e) Barqueiros.

A obtenção de provetes com um plano de anisotropia paralelo a uma das faces dos provetes permite considerar apenas duas direções de ensaio, a direção normal ao plano de anisotropia e a direção paralela ao plano de anisotropia (ver Figura 4.3) e desta forma efetuar uma análise simplificada dos resultados dos ensaios.















Figura 4.3 – Direções de ensaio: a) Normal ao plano de anisotropia; b) Paralela ao plano de anisotropia (adaptado de EN 1926:2006).

Os planos de anisotropia existentes no xisto devem ser considerados na sua caracterização, tal como referem Hundson e Harrison (1997), as rochas anisotrópicas podem ter diferentes propriedades em cada direção como o módulo de deformação, resistência, permeabilidade, etc.

Neste capítulo, e com o intuito de facilitar a apresentação e interpretação dos resultados dos ensaios, estipulou-se uma nomenclatura para os diferentes provetes ensaiados com recurso a siglas e cores. Com a nomenclatura adotada é possível identificar a zona de extração do provete, assim como a direção de ensaio do mesmo relativamente ao plano de anisotropia do xisto. De seguida apresenta-se uma tabela com as siglas adotadas na nomenclatura dos provetes ensaiados.

Tabela 4.1 – Nomenclatura dotada para os provetes.

Tipo de xisto	Sigla	Símbolo		Cor
		Normal 	Paralelo 	
Vila Nova de Foz Côa	FC			Verde
Serra de Arga	SA			Azul
Carrazedo de Montenegro	CM			Rosa
Sobral de São Miguel	SM			Castanho
Barqueiros	BA			Vermelho

Para a análise do xisto foram realizados diversos ensaios, nomeadamente: microscopia eletrónica, determinação da absorção de água à pressão atmosférica, determinação da absorção de água por capilaridade, ultrassons, determinação da resistência superficial à compressão com esclerómetro de Schmidt, determinação da resistência à compressão axial, determinação da resistência à carga de ponta e determinação da resistência à cristalização de sais.

No que concerne à ordem de realização dos ensaios, considerando a heterogeneidade dos provetes de xisto, os ensaios de absorção de água à pressão atmosférica, de absorção de água por capilaridade, ultrassons e resistência mecânica à compressão uniaxial foram todos



realizados com os mesmos provetes e pela respetiva ordem. Assim, será possível efetuar a comparação de resultados entre ensaios restringindo apenas às variáveis a analisar.

Devido a tratar-se de ensaios destrutivos, os ensaios de resistência de carga de ponta e resistência à cristalização de sais foram realizados com diferentes provetes dos utilizados nos restantes ensaios. Para além destes aspetos, os ensaios de esclerómetro de Schmidt e de resistência à cristalização divergem dos restantes ensaios também devido às diferentes dimensões dos provetes utilizados.

Nos pontos seguintes serão apresentados e analisados os resultados obtidos em cada ensaio para as várias amostras de xisto sendo, no final do capítulo, comparados os resultados entre ensaios que permitiram correlacionar as diferentes propriedades dos xistos estudados.

#### **4.1 Microscopia ótica**

Os ensaios de microscopia ótica permitem observar os elementos pétreos a uma escala inferior ao observável a olho nu, permitindo a caracterização qualitativa da estrutura e textura desses elementos. Esta metodologia possibilita uma análise com detalhe e rigor através da obtenção de fotos ampliadas e do arquivamento de dados em sistema informático.

Existem várias metodologias para a execução de ensaios de microscopia ótica, sendo que na sua maioria é necessário a extração de amostras, o que torna este tipo de ensaio num ensaio destrutivo. No entanto existem metodologias de ensaio microscópico que permitem efetuar o ensaio de forma pouco intrusiva, como é o caso da microscopia eletrónica de varrimento ou das microanálises por raio X (Aires-Barros, 2001).

No caso da análise do xisto, a microscopia ótica possibilita a observação dos planos de foliagem e a predominância destes no elemento. Outro aspeto observável é dimensão dos minerais contidos no xisto. Na Figura 4.4 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de microscopia ótica realizados aos cinco tipos de xisto em estudo. As imagens microscópicas apresentadas foram ampliadas seis vezes.

No que diz respeito à foliagem, observa-se que o xisto SA é o xisto que apresenta uma estrutura com foliagem mais bem definida. Nos xistos FC, CM e SM também é possível observar uma ligeira foliação apesar de não ser tão definida como no caso do xisto SA. No xisto BA não é possível observar os planos de foliação, no entanto os minerais são facilmente observáveis comparativamente com os restantes xistos.

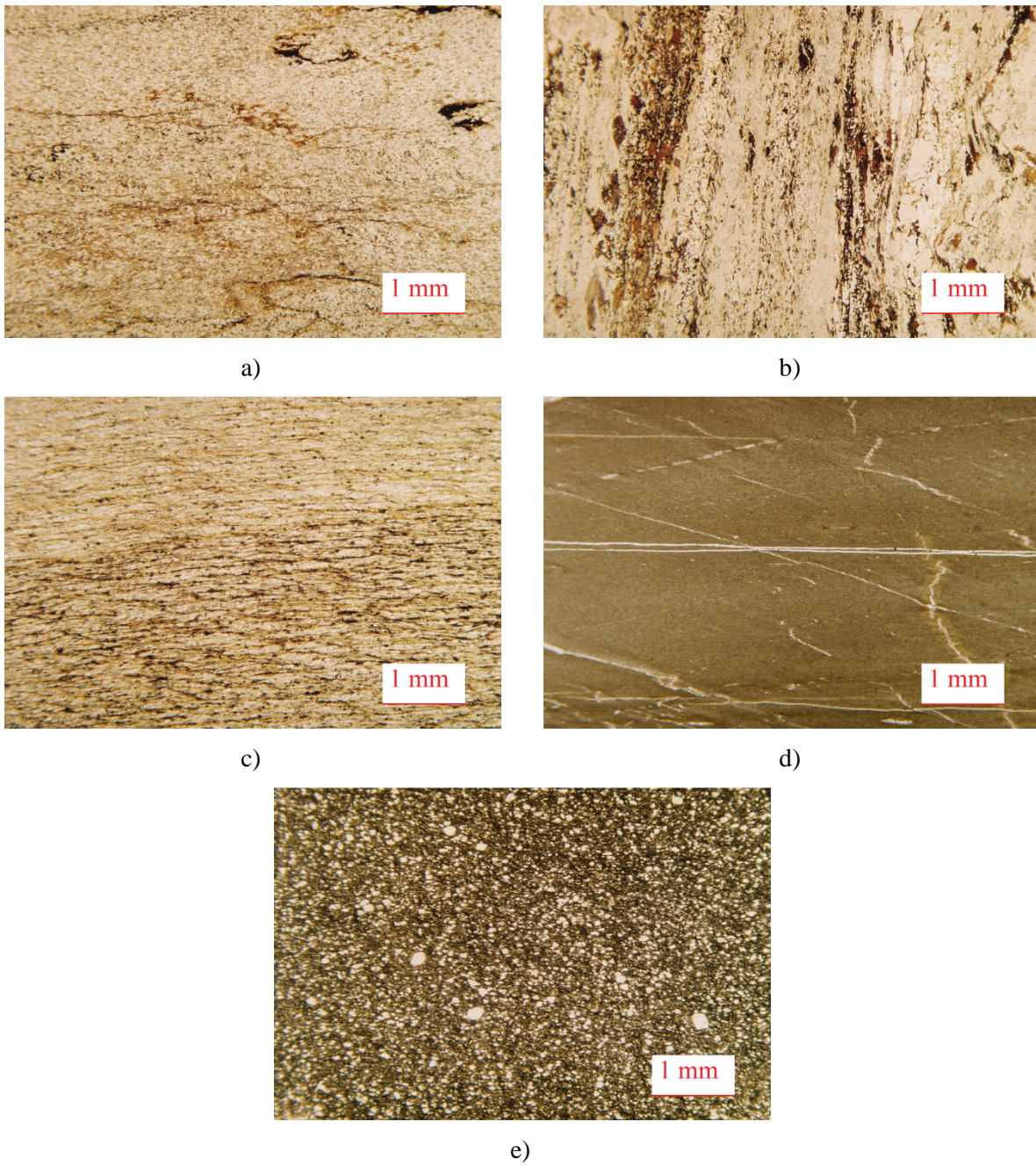


Figura 4.4 – Imagens de microscopia ótica com ampliação 6x: a) FC; b) SA; c) CM; d) SM; e) BA.

Para melhor confirmação dos planos de foliagem dos xistos FC, CM, SM e BA e respetiva comparação entre xistos, apresenta-se na Figura 4.5 imagens de microscopia ótica com ampliação de cinquenta vezes.



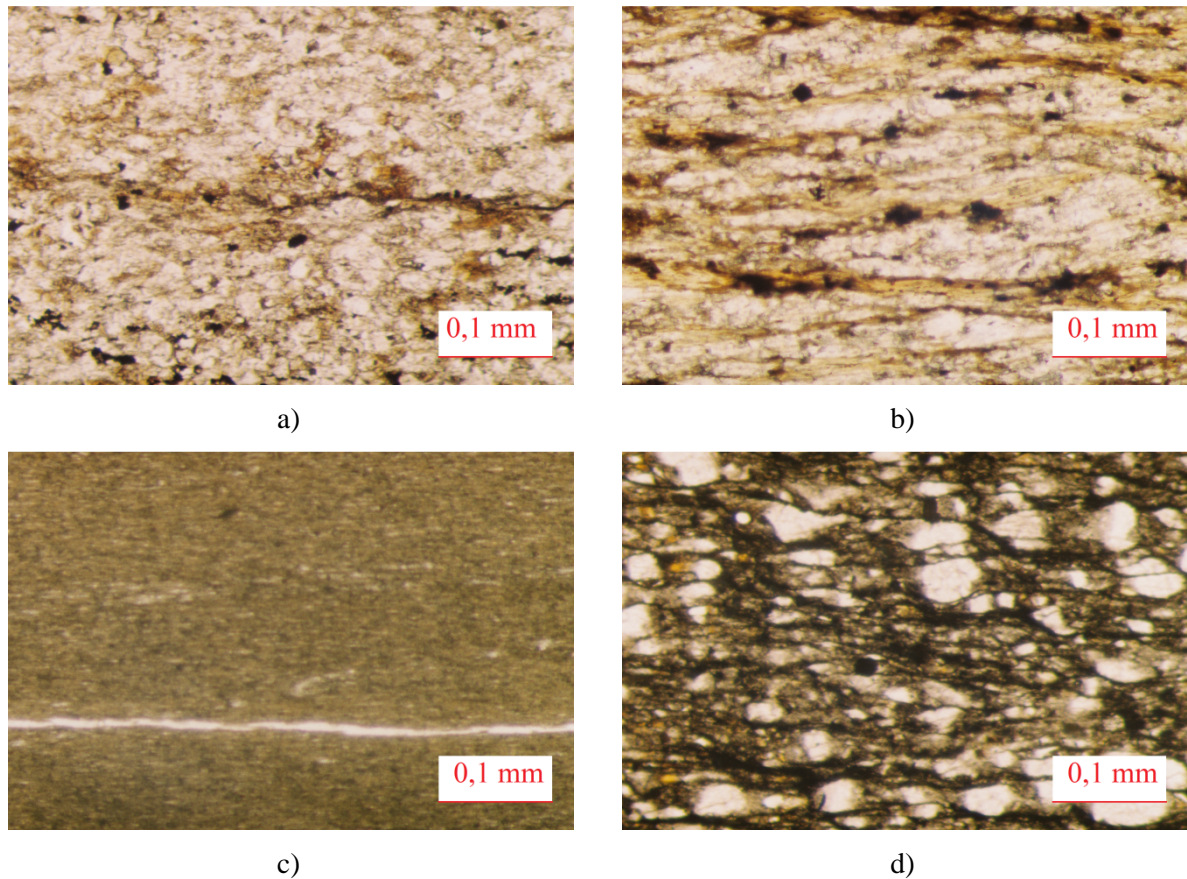


Figura 4.5 – Imagens de microscopia ótica com ampliação 50x: a) FC; b) CM; c) SM; d) BA.

Com a ampliação de cinquenta vezes, é possível observar os minerais em todos os xistos sendo que o xisto BA é o xisto que possui minerais de maior dimensão (aproximadamente 0,05mm) enquanto o xisto SM é o xisto que possui minerais de menor dimensão (aproximadamente 0,001mm). Em todos os xistos observam-se os planos de foliação. No xisto BA denota-se que a foliação é influenciada pelos minerais de maior dimensão. O xisto SM possui planos de foliação bem definidos mas bastante compactos entre eles. A estrutura de foliação dos xistos FC e CM é semelhante sendo que o xisto CM possui maior foliação.

## 4.2 Absorção de água à pressão atmosférica

A determinação da absorção de água à pressão atmosférica consegue-se através de ensaio simples, de acordo com a norma EN 13755:2005, realizado pelo menos em 6 provetes. Estes provetes, após secos em forno à temperatura de  $70 \pm 5$  graus centígrados até atingir massa constante, são imersos em água corrente em três fases nomeadamente: na primeira fase, até metade da altura dos provetes; na segunda fase, após  $60 \pm 5$  minutos, até três quartos da altura dos provetes; e na última fase, após  $120 \pm 5$  minutos, até 2,5cm acima da altura dos provetes (ver Figura 4.6).



Figura 4.6 – Ensaio de absorção de água à pressão atmosférica.

Para a maioria das rochas portuguesas, a massa constante de saturação dos provetes é obtida após imersão aproximadamente durante 72 horas. No entanto, dadas as características específicas dos xistos devem-se efetuar várias pesagens até que seja atingida uma variação inferior a 0,1% entre duas pesagens sucessivas num intervalo de  $24 \pm 2$  horas.

Na realização dos ensaios de absorção de água à pressão atmosférica dadas as amostras de xisto em estudo foram utilizados 10 provetes de dimensões  $50 \times 50 \times 50 \text{mm}^3$ . Como os ensaios de absorção de água à pressão atmosférica são realizados com a imersão completa dos provetes não foi considerada a influência da direção dos planos de foliagem dos provetes durante a realização do ensaio.

Na Tabela 4.2 apresentam-se os principais resultados obtidos no ensaio de absorção de água à pressão atmosférica sob os cinco tipos de xisto em estudo.

Tabela 4.2 – Resultados obtidos nos ensaios de absorção de água à pressão atmosférica (Ab).

Tipo de xisto	FC	SA	CM	SM	BA
Média (%)	0,57	2,99	1,48	3,55	1,82
CV (%)	8	57	18	54	89
Valor máximo (%)	0,64	5,33	1,71	7,32	3,61
Valor mínimo (%)	0,51	1,45	1,04	2,77	1,30

Na Figura 4.7 apresentam-se os gráficos com a percentagem de absorção de água e evolução da absorção de água ao longo do tempo da realização do ensaio. Nestes é possível concluir que o xisto FC apresenta a menor absorção de água e que o xisto com maior absorção é o SM. De acordo com Bell (2007), as rochas com absorção de água inferior a 1% possuem maior durabilidade. Apenas o xisto FC obteve percentagem inferior a 1%, sendo o xisto com maior durabilidade entre os xistos ensaiados. Por outro lado, segundo o mesmo autor, as rochas com percentagem de absorção de água superior a 5% são suscetíveis aos ciclos gelo/degelo. Como

nenhum dos xistos obteve percentagens superiores a 5% é considera-se que os xistos em estudo são resistentes aos ciclos gelo/degelo.

No que concerne ao tempo necessário para atingir a saturação, não foram detetadas diferenças significativas, tendo sido obtida a saturação em todos os provetes sensivelmente no mesmo período de tempo, até 48 horas após o início do ensaio. Pelo gráfico da Figura 4.7 b) é possível concluir que a velocidade de absorção é maior para os xistos SM e menor para os xistos FC.

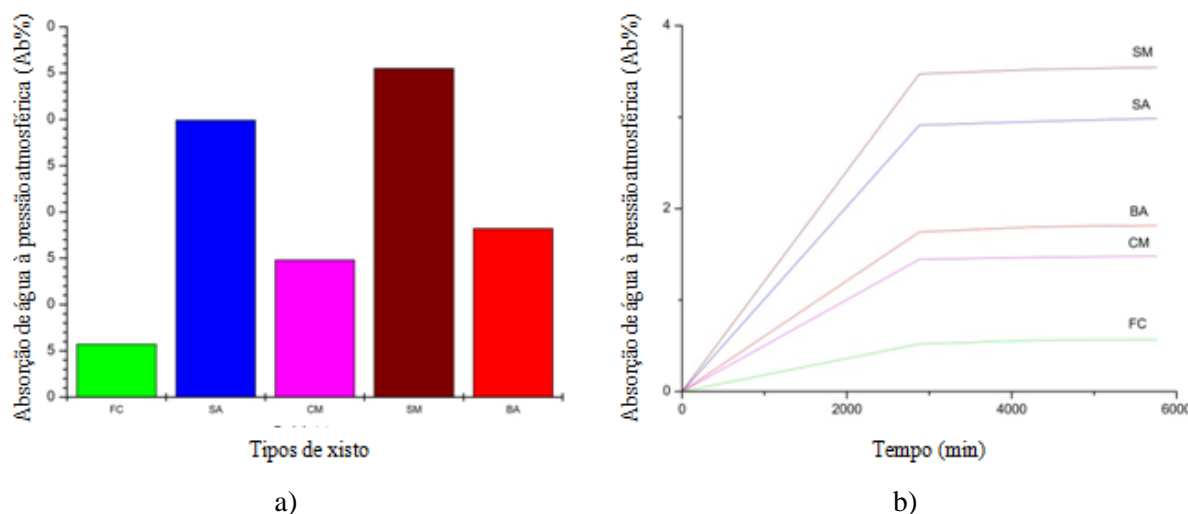


Figura 4.7 – Absorção de água à pressão atmosférica: a) Percentagem de absorção máxima por tipo de xisto; b) Percentagem de absorção em relação ao tempo de absorção.

Para além do tempo de saturação deve-se analisar também a porosidade e a densidade das rochas, duas propriedades diretamente relacionadas com a absorção. No que concerne à densidade dos xistos ensaiados, foram obtidos os seguintes resultados:  $\gamma_{FC} = 2,76\text{g/cm}^3$ ;  $\gamma_{SA} = 2,53\text{g/cm}^3$ ;  $\gamma_{CM} = 2,66\text{g/cm}^3$ ;  $\gamma_{SM} = 2,82\text{g/cm}^3$ ;  $\gamma_{BA} = 2,61\text{g/cm}^3$ .

De acordo com Bell (2007), a porosidade é influenciada por um lado pela composição mineral e por outro pelos espaços vazios. Nos xistos ensaiados foram obtidos os seguintes resultados relativamente à porosidade:  $\delta_{FC} = 1,6\%$ ;  $\delta_{SA} = 7,4\%$ ;  $\delta_{CM} = 3,9\%$ ;  $\delta_{SM} = 10\%$ ;  $\delta_{BA} = 4,7\%$ . O mesmo autor propõe uma classificação das rochas considerando a porosidade. Na Tabela 4.3 apresenta-se a proposta de classificação das rochas considerando a porosidade.

Tabela 4.3 – Classificação da porosidade (adaptado de Bell, 2007).

Classe	Porosidade (%)	Descrição
1	Mais de 30	Muito alta
2	30 – 15	Alta
3	15 – 5	Media
4	5 – 1	Baixa
5	Menos de 1	Muito baixa

A partir da porosidade média obtida nos ensaios de cada xisto em estudo, e considerando a proposta de classificação de Bell (2007) é possível classificar quanto à porosidade os diferentes tipos de xisto. Na Tabela 4.4 é apresentada a classificação de cada xisto em estudo. O xisto FC é o menos poroso sendo resistente à classe 4, enquanto que, o xisto SM é o mais poroso entre os xistos ensaiados resistindo à classe 3. Verifica-se, no entanto, que o xisto SM, apesar de ser o mais poroso, é o que regista a densidade mais elevada. Tal deve-se aos espaços vazios estarem sobretudo localizados entre os planos de foliagem. Os resultados dos ensaios que se apresentam neste capítulo confirmam tal facto.

Tabela 4.4 – Classificação da porosidade dos xistos ensaiados.

Tipo de xisto	Classe	Descrição
FC	4	Baixa
SA	3	Média
CM	4	Baixa
SM	3	Média
BA	4	Baixa

Na Tabela 4.5 apresentam-se resultados de ensaios de absorção de água à pressão atmosférica de várias rochas. Perante estes resultados constata-se que os xistos SA e SM obtiveram uma percentagem de absorção de água superior ao intervalo de resultados do xisto estudado por Noronha *et al.* (2011). Observa-se ainda que nenhum dos xistos deste estudo obteve uma percentagem de absorção de água inferior ao intervalo de resultados do estudo de Noronha *et al.* (2011). Relativamente às outras rochas, os xistos estudados obtiveram percentagens de absorção de água superiores a todas as rochas com a exceção dos valores mais elevados de absorção dos arenitos. O xisto FC obteve uma percentagem de absorção de água inferior a todas as rochas indicadas na tabela.

Tabela 4.5 – Absorção de água à pressão atmosférica de diferentes rochas.

Tipo de rocha	Absorção de água (%)
Xisto <sup>1</sup>	[0,10 – 2,30]
Granito <sup>2</sup>	[0,20 – 0,50]
Basalto <sup>2</sup>	[0,10 – 0,30]
Arenito <sup>2</sup>	[0,20 – 9,00]
Calcário <sup>2</sup>	[0,20 – 0,60]
Marmore <sup>2</sup>	[0,20 – 0,60]
Quartzito <sup>2</sup>	[0,20 – 0,50]

<sup>1</sup>Noronha *et al.* (2011), <sup>2</sup>Reis (2010).

Relativamente à densidade e à porosidade, na Tabela 4.6, apresentam-se valores de densidade e porosidade para o xisto estudado por Noronha *et al.* (2011), assim como, para diversas rochas.

Tabela 4.6 – Densidade e porosidade de diferentes rochas.

Tipo de rocha	Densidade (Mgm <sup>-3</sup> )	Porosidade (%)
Xisto <sup>1</sup>	[2,51 – 2,88]	[0,30 – 2,30]
Granito <sup>2</sup>	[2,60 – 2,80]	[0,40 – 1,50]
Basalto <sup>2</sup>	[2,90 – 3,00]	[0,30 – 0,90]
Arenito <sup>3</sup>	[1,30 – 3,60]	[0,50 – 40,00]
Calcário <sup>2</sup>	[2,60 – 2,80]	[0,60 – 2,00]
Mármore <sup>2</sup>	[2,70 – 2,80]	[0,50 – 3,00]
Tufo calcário <sup>2</sup>	[1,10 – 1,70]	[25,00 – 60,00]

<sup>1</sup>Noronha *et al.* (2011), <sup>2</sup>Manuale di Progettazione Edilizia (2007), <sup>3</sup>Kobranova (1989).

Perante os resultados apresentados na Tabela 4.6 conclui-se que os valores da densidade de todos os xistos analisados neste estudo enquadram-se no intervalo de resultados dos xistos. Apenas o xisto FC obteve uma percentagem de porosidade que se enquadra nos resultados obtidos por Noronha *et al.* (2011). Todos os restantes xistos obtiveram valores de porosidade superiores. Na comparação com as restantes rochas constata-se que, de uma forma geral, os xistos estudados tem valores de densidade relativamente na mesma ordem dos referidos para o granito, o calcário e o mármore. No que concerne à porosidade, o tufo calcário e, de uma forma geral, o arenito apresentam um intervalo de valores sensivelmente superiores aos obtidos nos xistos deste estudo. Todas as restantes rochas apresentam intervalos de valores de porosidade inferiores aos registados nos xistos em estudo.



### 4.3 Absorção de água por capilaridade

O ensaio para a determinação da absorção de água por capilaridade consiste na verificação da absorção de água na base do provete e respetiva ascensão por capilaridade por meio de pesagens sucessivas durante intervalos controlados de tempo nomeadamente de 30, 60, 180, 480, 1440, 2880 e 4320 minutos. Tal como no ensaio de absorção de água à temperatura atmosférica para a execução deste ensaio foram colocados 10 provetes de dimensões  $50 \times 50 \times 50 \text{mm}^3$  num recipiente com água, de acordo com o especificado na norma EN 1925:2006, de forma que os provetes fiquem em contato com a água até uma altura de aproximadamente 0,3cm (ver Figura 4.8).



Figura 4.8 – Ensaio de absorção de água por capilaridade.

O coeficiente de absorção de água por capilaridade ( $A$ ) é determinado tendo em consideração o acréscimo de massa de água ( $m$ ) e o tempo ( $t$ ) decorrido desde o início do ensaio.

$$A = \frac{m}{\sqrt{t}} \quad (4.1)$$

Para cada tipo de xisto foram colocados 10 provetes, considerando ambas as orientações de ascensão capilar normal e paralela aos planos de anisotropia. As diferenças registadas entre planos de anisotropia estão relacionadas com a maior ou menor definição entre planos de xistosidade, assim como com as propriedades já mencionadas no ponto anterior, nomeadamente a densidade e a porosidade (ver Figura 4.9). O xisto FC é um xisto bastante denso com uma estrutura de xistosidade prismática, facto que permite as variações muito reduzidas registadas entre os dois planos de anisotropia, principalmente o valor superior obtido na direção normal. Por outro lado, o xisto SA obtém a menor diferença de resultados entre planos devido à irregularidade da sua xistosidade e aos planos de anisotropia pouco definidos.



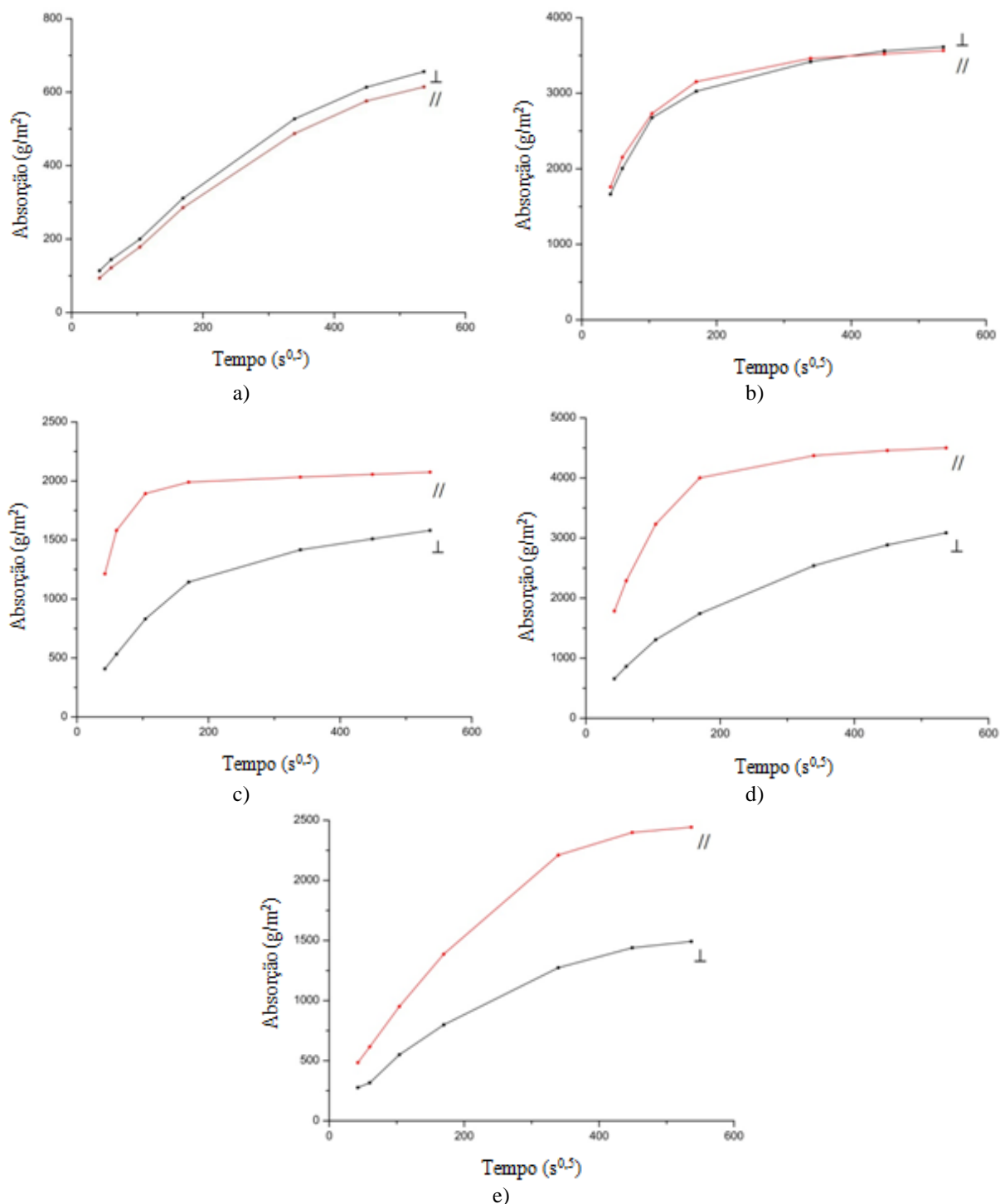


Figura 4.9 – Coeficiente de absorção de água por capilaridade para ambas as direções: a) FC; b) SA; c) CM; d) SM; e) BA.

Apesar de ambos os xistos FC e SA terem diferenças pequenas entre planos de anisotropia, estes são distintos em termos de coeficiente de absorção. Na comparação entre todos os xistos, o xisto FC é o que obtém menores valores, tanto na direção normal como na direção paralela. Já o xisto SA é o que tem maior coeficiente de absorção na direção normal e o segundo maior na direção paralela.

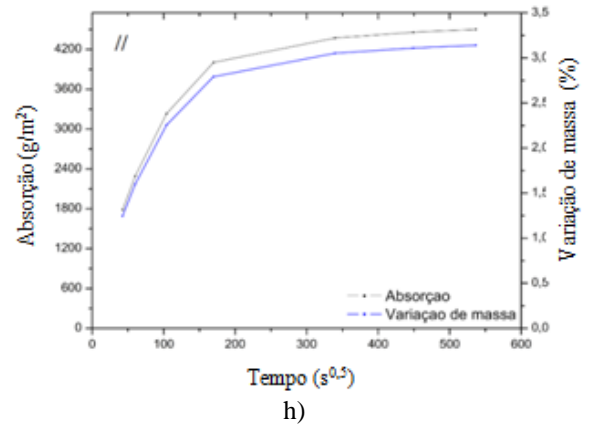
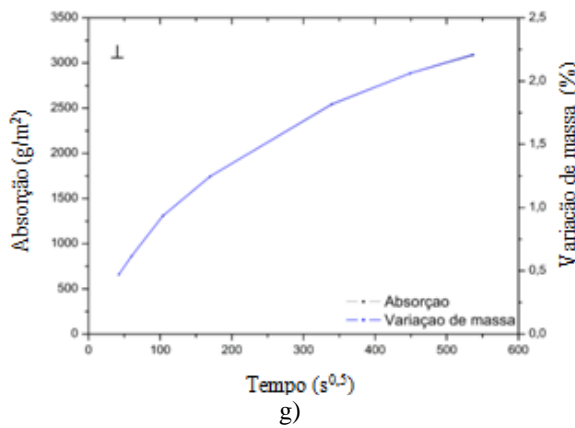
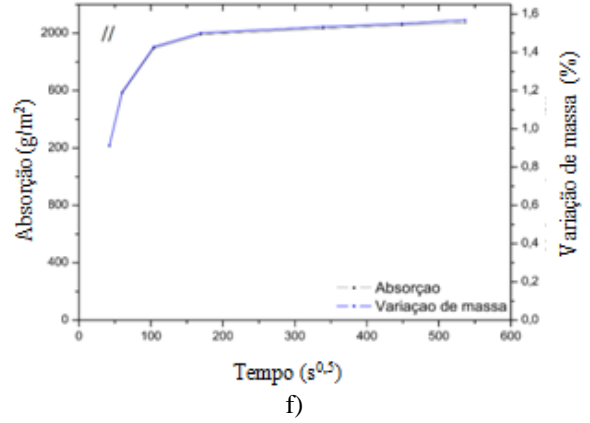
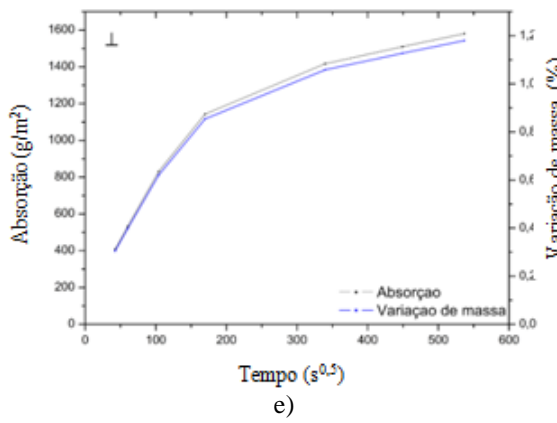
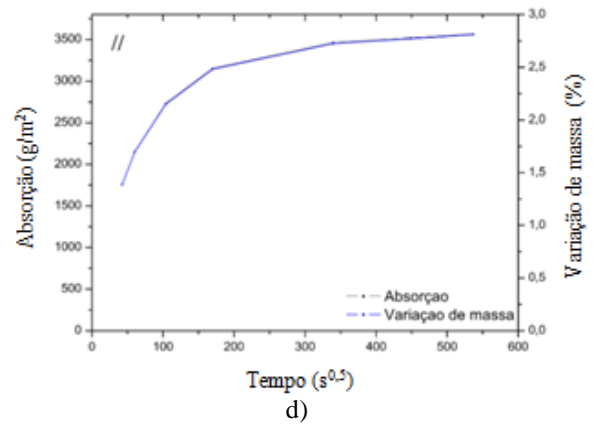
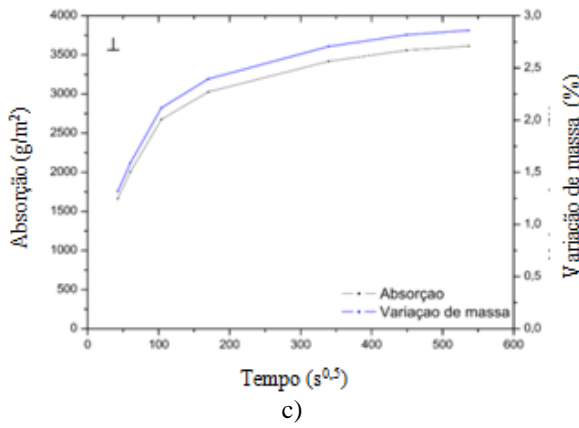
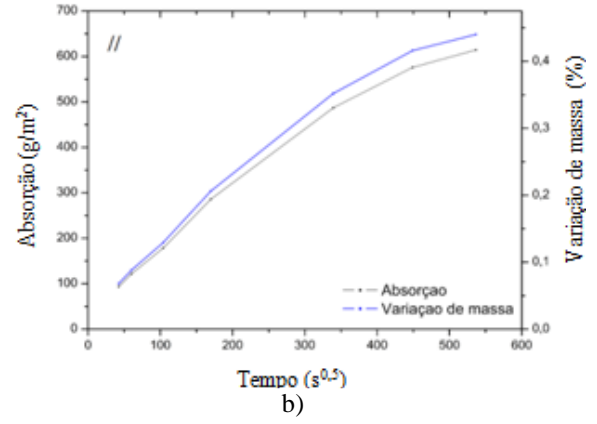
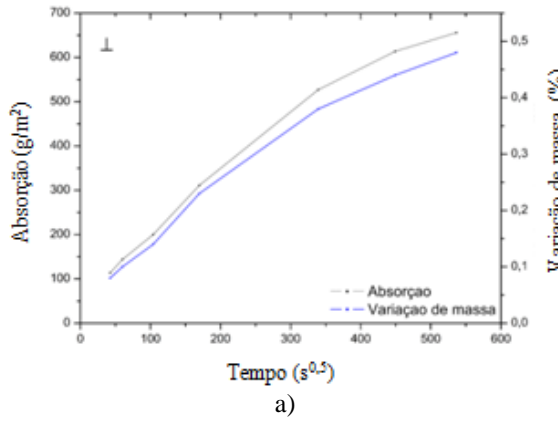
O xisto SM é o que regista um maior coeficiente de absorção de água na direção paralela, obtendo o segundo maior coeficiente de absorção na direção normal. De forma resumida o coeficiente de absorção por capilaridade é muito menor em ambas as direções no xisto FC comparativamente com os restantes tipos de xisto, e maior nos xistos SM e SA. O resumo dos resultados obtidos para cada tipo de xisto e para as respetivas orientações dos planos de anisotropia é apresentado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resultados obtidos nos ensaios de absorção de água por capilaridade.

Tipo de xisto	FC		SA		CM		SM		BA	
	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//
Coef. absorção (g/m <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> )	1,8	1,7	17,8	18,6	6,7	11,7	10,3	23,6	4,7	8,2
Absorção máxima (g/m <sup>2</sup> )	656,0	614,4	3612,6	3565,6	1580,8	2075,2	3087,2	4501,6	1492	2442,4
Absorção mínima (g/m <sup>2</sup> )	346,8	347,7	324,9	326,5	338,7	336,5	357,2	369,6	332,7	330,7

Observa-se que o xisto FC é o único xisto que obteve um coeficiente de absorção por capilaridade na direção normal superior à direção paralela. No entanto, este, em conjunto com o xisto SA, são os que registam uma menor diferença entre as duas direções de anisotropia com uma diferença entre planos de 5,5% para o xisto FC e 4,3% para o xisto SA. Os restantes tipos de xisto registam diferenças muito mais acentuadas entre planos de anisotropia, sendo superiores a 50% nos casos dos xistos SM e CM, sendo como esperado que a direção de ascensão capilar paralela à direção de foliagem obtém maior coeficiente de capilaridade.

Nos gráficos da Figura 4.10 observa-se a variação da absorção de água por capilaridade e a variação de massa até à obtenção de massa constante (variação não superior a 0,1%) para todos os xistos ensaiados ao longo do tempo.



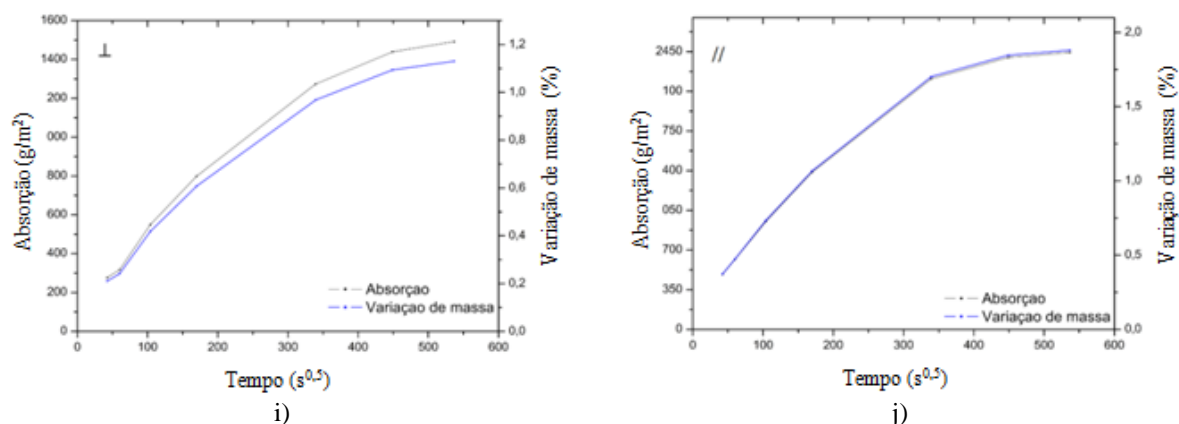


Figura 4.10 – Absorção de água por capilaridade: a) FC direção normal; b) FC direção paralela; c) SA direção normal; d) SA direção paralela; e) CM direção normal; f) CM direção paralela; g) SM direção normal; h) SM direção normal; i) BA direção normal; j) BA direção paralela.

O xisto SM é o que regista um maior coeficiente de absorção de água na direção paralela, obtendo o segundo maior coeficiente de absorção na direção normal. De forma resumida o coeficiente de absorção por capilaridade é muito menor em ambas as direções no xisto FC comparativamente com os restantes tipos de xisto, e maior nos xistos SM e SA. Comparativamente com os valores do coeficiente de absorção por capilaridade das rochas apresentadas na Tabela 4.8, os xistos estudados obtiveram valores de coeficiente de absorção de água muito superiores indicando elevada suscetibilidade para a migração capilar.

Tabela 4.8 – Coeficiente de absorção de água por capilaridade de diferentes rochas.

Tipo de rocha	Coef. de absorção ( $\text{g/m}^2\text{s}^{0,5}$ )
Granito <sup>1</sup>	0,02
Calcário <sup>2</sup>	0,34
Arenitos <sup>3</sup>	0,47

<sup>1</sup>Begonha (1997), <sup>2</sup>Figueiredo *et al.* (2010), <sup>3</sup>Alves (1996).

#### 4.4 Velocidade de propagação de sons

Com o ensaio de ultrassons determina-se o comprimento de onda e o tempo de propagação de onda num dado provete. Tal como referido na norma ASTM E797-05, a velocidade de propagação de onda no material é função das suas propriedades físicas. No caso dos ensaios sobre os provetes de xisto, os resultados da velocidade de propagação de onda permitem estimar a densidade do material e a existência de vazios no seu interior.

Para a realização do ensaio foram preparados 10 provetes de dimensão 50x50x50mm<sup>3</sup> para cada tipo de xisto. Em cada provete, foram realizadas as medições diretas entre faces opostas (ver Figura 4.11), para as três direções, ou seja duas paralelas ao plano de anisotropia e uma normal. Para uma maior representatividade do ensaio, em cada direção foram realizadas três medições, tendo sido adotado como resultado a média dessas medições.

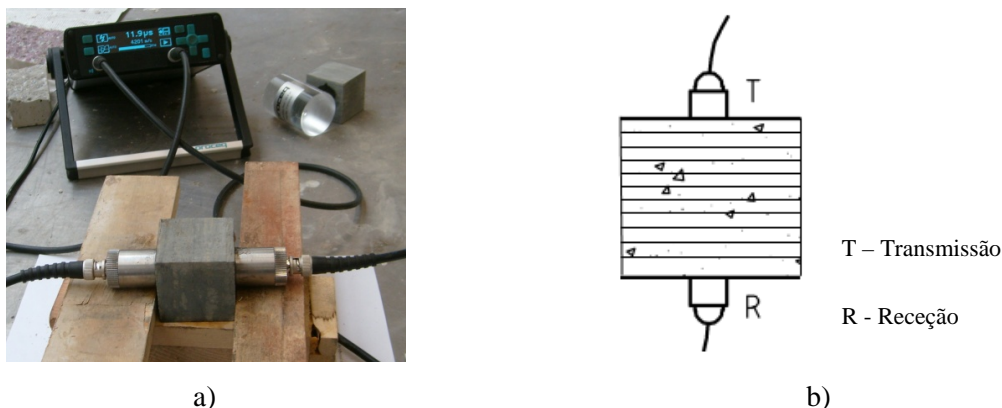


Figura 4.11 – Ultrassons: a) Realização do ensaio; b) Esquema do ensaio de ultrassons na direção normal ao plano de anisotropia (adaptado de EN 12504-4).

Na Tabela 4.9 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de ultrassons, para as amostras dos diferentes tipos de xisto, para a direção normal e para as duas direções paralelas (S1 e S2).

Tabela 4.9 – Resultados obtidos em ensaio de ultrassons.

Tipo de xisto	FC			SA			CM		
Direção	⊥	// S1	// S2	⊥	// S1	// S2	⊥	// S1	// S2
Média (m/s)	3692,4	4428,8	5712,4	2280,9	2968,2	3782,7	1456,2	2695,3	4121,4
CV (%)	12,0	3,4	2,5	40,7	17,0	18,2	36,8	10,7	23,6
Valor máximo (m/s)	4237,0	4587,0	5952,0	3458,7	3740,3	4588,3	2380,0	3086,0	5617,0
Valor mínimo (m/s)	2958,0	4201,0	5617,0	813,0	2362,0	2460,7	999,7	2242,0	3204,7

Tipo de xisto	SM			BA		
Direção	⊥	// S1	// S2	⊥	// S1	// S2
Média (m/s)	626,0	5188,8	5267,5	2384,7	4822,4	5255,4
CV (%)	35,5	2,7	2,0	16,5	4,9	8,1
Valor máximo (m/s)	1028,0	5319,0	5338,0	2883,3	5050,0	5638,3
Valor mínimo (m/s)	365,0	5050,0	5067,3	1791,7	4398,0	4587,0

Como era esperado a velocidade de propagação de onda é maior na direção dos planos de anisotropia que na direção normal, para todas as amostras ensaiadas. No gráfico da Figura 4.12 apresentam-se as relações entre as velocidades.

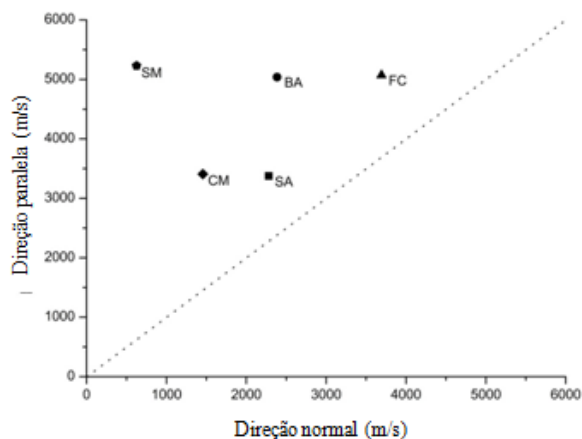


Figura 4.12 – Comparação entre direção normal e a média das direções paralelas S1 e S2.

No que concerne à velocidade de propagação na direção normal o xisto SM é o que apresenta menor valor médio enquanto o xisto FC apresenta a maior velocidade de propagação de onda. Por outro lado, a maior velocidade de propagação de onda na direção paralela foi obtida para o xisto SM, sendo que os xistos FC e BA obtêm valores médios da mesma ordem de grandeza. A menor velocidade média de propagação de onda na direção paralela foi obtida no xisto SA. Estes resultados indicam que, considerando as duas direções de anisotropia, o xisto FC é o mais denso de entre os xistos ensaiados. O xisto SM é o que tem a maior diferença entre os dois planos de anisotropia o que comprova a existência de espaços vazios entre a foliagem, que reduzem a velocidade de propagação de onda quando o ensaio é realizado na direção normal aos planos de xistosidade.

Na Tabela 4.10 apresentam-se o intervalo de valores da velocidade de propagação de ultrassons de ensaios realizados em xisto, granito e calcário.

Tabela 4.10 – Velocidade de propagação de sons em diferentes rochas.

Tipo de Rocha	Velocidade do som (m/s)
Xisto <sup>1</sup>	[1883 – 5449]
Granito <sup>2</sup>	[1956 – 4804]
Calcário <sup>3</sup>	[2800 – 4800]

<sup>1</sup>Pinho (2003), <sup>2</sup>Vasconcelos *et al.* (2008), <sup>3</sup>Bell (2007).

Observa-se que apenas a velocidade de propagação de onda do xisto FC na direção paralela S2 supera o intervalo de resultados obtidos por Pinho (2003). Por outro lado, os xistos CM e SM são os únicos que obtêm valores, apenas na direção normal, inferiores ao intervalo dos resultados de Pinho (2003), se bem que os valores do xisto SM encontram-se muito próximos do valor mais baixo.

Comparativamente com o granito, na direção de ensaio normal ao plano de anisotropia, apenas os xistos CM e SM obtêm valores inferiores, enquanto nenhum dos xistos obtêm valores superiores. Na direção paralela, nenhum dos xistos ensaiados obteve valores inferiores ao intervalo de valores apresentados. Os xistos FC, SM e BA obtêm valores superiores ao intervalo de valores apresentados para o granito. Relativamente ao calcário, a diferença em relação aos valores do granito regista-se no limite inferior do intervalo de valores. Assim sendo, na direção normal ao plano de anisotropia, apenas o xisto FC obtêm valores superiores ao mínimo do intervalo de valores da propagação de ultrassons no calcário.

#### **4.5 Dureza superficial com esclerómetro de Schmidt**

O ensaio com o esclerómetro de Schmidt é utilizado comumente para determinar a dureza superficial do betão, podendo, no entanto, o mesmo ensaio ser aplicado em elementos pétreos. Segundo Viles *et al.* (2010), o esclerómetro de Schmidt permite a análise através da determinação da dureza superficial dos elementos pétreos constituintes das alvenarias estruturais.

Este ensaio passa pela medição do recuo do batente do esclerómetro quando este é acionado por uma mola após a compressão do esclerómetro na superfície do elemento pétreo. O índice de recuo permite avaliar a dureza superficial da rocha ou determinar regiões superficiais degradadas.

A rapidez e a forma prática como se efetua o ensaio são as principais vantagens. No entanto, deve-se ter em atenção que os resultados obtidos são referentes à superfície do elemento em análise e não a toda a estrutura, situação que pode provocar erros de medição, caso a superfície esteja demasiado degradada ou deteriorada na zona de ensaio.

Tal como Bell (2007) refere, o esclerómetro de Schmidt não é um método satisfatório para a determinação da resistência de pedras muito moles ou muito duras, mas há uma boa correlação entre o ensaio de dureza superficial e o ensaio destrutivo de resistência mecânica à compressão uniaxial de provetes.



No âmbito deste estudo foram testadas diversas abordagens de ensaio, desde a utilização de provetes livres a provetes confinados, sendo que em nenhuma das situações foram obtidos resultados satisfatórios. Uma das soluções possíveis passa por realizar os ensaios *in-situ* diretamente no maciço rochoso. Hundson e Harrison (1997) referem que, quando o bloco *in-situ* tem dimensões grandes o resultado obtido com o esclerómetro de Schmidt está efetivamente relacionado com as propriedades superficiais da rocha intacta.

Por forma a ultrapassar as dificuldades, os provetes de xisto foram confinados num solo. Os provetes usados na determinação da resistência superficial à compressão têm dimensão 50x50x300mm<sup>3</sup> e foram ensaiados nas duas direções dos planos de anisotropia para permitir comparar os resultados com os ensaios de compressão uniaxial e de carga de ponta, que se apresentam de seguida.

Na realização do ensaio, o esclerómetro utilizado foi previamente calibrado e testado em elementos de betão. O ensaio foi realizado com um ângulo de 90 graus em relação à face do provete permitindo a obtenção direta do índice esclerométrico. Os índices esclerométricos médios obtidos no ensaio são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Resultados obtidos em ensaio com esclerómetro de Schmidt.

Tipo de xisto	FC		SA		CM		SM		BA	
	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//
Média	30,0	30,6	11,6	10,4	20,4	21,4	18,0	13,6	20,4	16,8
CV (%)	4,1	2,9	4,7	5,3	11,3	7,8	20,4	12,3	26,31	20,79
Valor máximo	31,0	31,0	12,0	11,0	23,0	24,0	22,0	15,0	28,0	23,0
Valor mínimo	28,0	29,0	11,0	10,0	18,0	20,0	13,0	11,0	16,0	15,0

Observa-se que o maior índice foi obtido para o xisto FC sendo o menor índice obtido para o xisto SA. Relativamente aos planos de anisotropia, com exceção dos xistos SM e BA, os restantes xistos não registam uma diferença significativa entre os dois planos de anisotropia. Através da Figura 4.13 é possível observar as pequenas diferenças entre os índices esclerométricos para as duas direções.

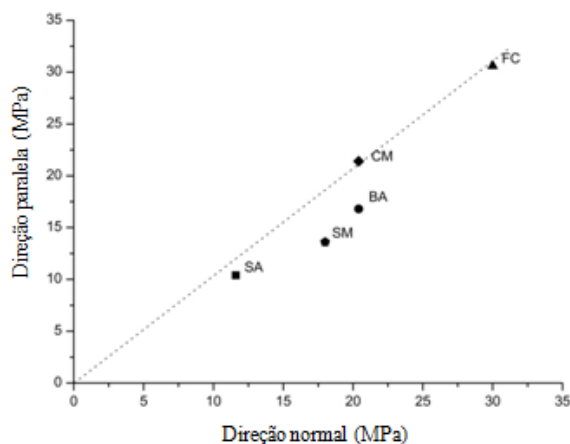


Figura 4.13 – Dureza superficial.

Constata-se que os xistos FC e CM foram os que obtiveram maior índice esclerométrico na direção paralela, e que estes também registaram a menor diferença entre índices para planos de anisotropia. Estes resultados serão comparados adiante com os resultados obtidos no ensaio de resistência mecânica à compressão axial e no ensaio de carga de ponta, que permitem estimar com maior precisão a resistência mecânica dos diferentes xistos.

Na Tabela 4.12 são apresentados resultados da dureza superficial de diferentes rochas. Comparativamente com os resultados dos ensaios de dureza obtidos para os xistos analisados neste estudo, é possível concluir que apenas o xisto SA obteve valores inferiores às rochas apresentadas. Os restantes xistos apresentam valores semelhantes aos apresentados para os arenitos e calcários, sendo que o granito, o basalto e a ardósia apresentam resultados superiores aos obtidos nos xistos deste estudo.

Tabela 4.12 – Dureza superficial de diferentes rochas.

Tipo de Rocha	Índice de dureza superficial
Granito <sup>1</sup>	[62,50 – 71,60]
Basalto <sup>2</sup>	61
Arenito <sup>2</sup>	[22,00 – 52,00]
Calcário <sup>2</sup>	[14,00 – 51,00]
Ardósia <sup>2</sup>	42

<sup>1</sup>Vasconcelos *et al.* (2005), <sup>2</sup>Bell (2007).

## 4.6 Resistência à compressão axial

O ensaio de compressão axial permite a obtenção da resistência mecânica dos diferentes xistos. Segundo a norma EN 1926:2006, o ensaio de resistência à compressão uniaxial permite avaliar o desempenho de provetes colocados entre dois pratos paralelos e sujeitos a uma carga uniaxial (ver Figura 4.14). Devido à textura irregular dos xistos, os elementos a serem testados foram cuidadosamente preparados para que as faces que ficam em contacto com os pratos da máquina fiquem sujeitas a uma carga o mais uniforme possível.



Figura 4.14 – Ensaio de resistência à compressão uniaxial.

Na determinação da resistência à compressão uniaxial foram ensaiados 10 provetes com dimensões  $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$  de cada um dos tipos de xisto em estudo, sendo que 5 foram ensaiados com a carga na direção normal ao plano de anisotropia e os outros 5 com a carga na direção paralela ao plano de anisotropia.

Os resultados obtidos nos ensaios de determinação da resistência mecânica à compressão axial são apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Resultados obtidos em ensaio de compressão axial.

Tipo de xisto	FC		SA		CM		SM		BA	
Direção	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//
Média (MPa)	144,9	151,9	46,0	45,4	79,1	98,4	53,6	29,7	142,3	88,6
CV (%)	11,8	11,3	25,9	32,3	9,9	27,0	27,9	21,9	18,1	28,9
Valor máximo (MPa)	162,3	177,8	59,1	61,6	85,6	142,0	76,8	43,0	173,1	120,9
Valor mínimo (MPa)	123,5	133,2	33,2	26,3	65,8	71,2	38,9	25,1	113,4	68,0

Pela análise dos resultados obtidos verifica-se que os xistos FC e CM apresentam maior resistência na direção paralela comparativamente com a direção normal de anisotropia. A menor diferença entre planos de anisotropia regista-se no xisto SA, sendo que, o xisto FC também apresenta valores muito próximos entre planos, como se pode observar na Figura 4.15.

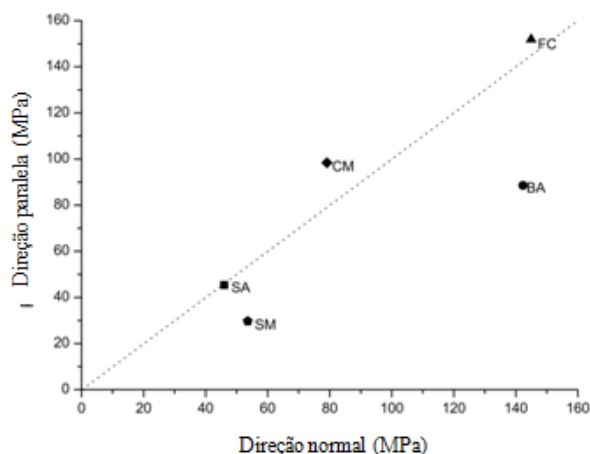


Figura 4.15 – Ensaios de resistência à compressão axial.

Comparando os valores obtidos nos diferentes tipos de xisto, constata-se que o xisto FC regista a resistência média mais elevada, tanto na direção normal como na direção paralela. No entanto, na direção normal o xisto BA regista um valor de resistência próximo ao xisto FC. O xisto SA é o que regista a menor resistência na direção normal, enquanto que o xisto SM regista a menor resistência na direção paralela.

Através da proposta de classificação da resistência mecânica à compressão de elementos pétreos proposta por Bell (2007), que se apresenta na Tabela 4.14, foram classificados quanto à resistência à compressão axial os diferentes xistos ensaiados. Na Tabela 4.15 apresentam-se as classificações obtidas por tipo de xisto e plano de anisotropia.

Tabela 4.14 – Classificação da resistência mecânica à compressão uniaxial (adaptado de Bell, 2007).

Sociedade de Geologia		IAEG (International Association of Engineering Geology)		ISRM (International Society for Rock Mechanics)	
Classe	Resistência (MPa)	Classe	Resistência (MPa)	Classe	Resistência (MPa)
Muito fraca	Menos de 1,25	Fraca	Menos de 15	Muito baixa	Menos de 6
Fraca	1,25 – 5,00	Moderada	15 – 50	Baixa	6 – 10
Moderadamente fraca	5,00 – 12,50	Alta	50 – 120	Moderada	20 – 60
Moderadamente alta	12,5 – 50	Muito alta	120 – 230	Alta	60 – 200
Alta	50 – 100	Extremamente alta	Mais de 230	Muito alta	Mais de 200
Muito alta	100 – 200				
Extremamente alta	Mais de 200				

Tabela 4.15 – Classificação da resistência mecânica à compressão uniaxial de xistos.

Tipo de xisto	FC		SA		CM	
Direção	⊥	//	⊥	//	⊥	//
Sociedade de Geologia	Muito alta	Muito alta	Moderadamente alta	Moderadamente alta	Alta	Alta
IAEG	Muito alta	Muito alta	Moderada	Moderada	Alta	Alta
ISRM	Alta	Alta	Moderada	Moderada	Alta	Alta

Tipo de xisto	SM		BA	
Direção	⊥	//	⊥	//
Sociedade de Geologia	Alta	Moderadamente alta	Muito alta	Alta
IAEG	Alta	Moderada	Muito alta	Alta
ISRM	Moderada	Moderada	Alta	Alta

Considerando a classificação obtida, os xistos enquadram-se, de acordo com a proposta do ISRM, entre rochas de resistência moderada a alta. De acordo com a classificação do IAEG, os xistos estudados situam-se entre rochas de moderada a muito alta resistência. E, de acordo com a proposta da Sociedade de Geologia, entre rochas com resistência moderadamente alta a muito alta.

Na Tabela 4.16 apresenta-se a resistência mecânica à compressão uniaxial dos xistos dos estudos de Noronha *et al.* (2011) e Burcio (2004). Apresentam-se também os valores da resistência mecânica à compressão uniaxial de diferentes rochas.

Tabela 4.16 – Resistência à compressão de diferentes rochas.

Tipo de Rocha	Resistência à compressão (MPa)
Xisto <sup>1</sup>	[31 – 221]
Granito <sup>2</sup>	[26,00 – 159,80]
Basalto <sup>3</sup>	[40,00 – 413,00]
Arenito <sup>3</sup>	[22,00 – 82,00]
Calcário <sup>3</sup>	[15,60 – 96,40]
Ardósia <sup>3</sup>	[72,30 – 96,40]
Marmore <sup>4</sup>	[48,90 – 65,7]

<sup>1</sup>Noronha *et al.* (2011) e Burcio (2004), <sup>2</sup>Vasconcelos *et al.* (2005), <sup>3</sup>Bell (2007), <sup>4</sup>Mogi (2007).

Na comparação dos resultados dos xistos analisados neste estudo observa-se que estes se enquadram no intervalo de resultados apresentados para os xistos da Tabela 4.16. No que concerne às restantes rochas, o intervalo de valores de resistência mecânica à compressão obtidos para os xistos é semelhante ao intervalo de resistências mecânicas apresentadas para o granito e o basalto.

#### 4.7 Resistência à carga de ponta

O ensaio de resistência à carga de ponta consiste na determinação da resistência de um provete a uma carga pontual uniaxial exercida por duas ponteiras metálicas de forma cônica sobre o provete. Este ensaio apresenta vantagens relativamente a outros ensaios de compressão, dado que para a sua execução não existe necessidade de preparação prévia do provete e dado o equipamento usado (ver Figura 4.16) é possível a sua execução tanto *in-situ* como em laboratório.



Figura 4.16 – Ensaio de carga pontual.

A ISRM (International Society for Rock Mechanics) publicou em 1985 os procedimentos para a determinação da resistência à carga de ponta, onde refere que com este ensaio, para além da determinação da tensão uniaxial e da resistência à compressão, é possível também obter a classificação de diferentes materiais pétreos.

De uma forma geral, este tipo de ensaio é efetuado em provetes cilíndricos de rochas, daí a metodologia sugerida pelo ISRM (1985) apresentar uma fórmula de cálculo genérica para provetes com 50 mm de diâmetro:

$$I_{s(50)} = \frac{P}{D^2} \quad (4.2)$$

Onde:  $I_s$  é o índice de carga de ponta;  $D$  o diâmetro e  $P$  a carga exercida sobre o provete. No entanto, para casos diferentes do genérico, existem metodologias que possibilitam a aplicação deste ensaio a provetes com diferentes diâmetros, ou mesmo com diferentes formas. No primeiro caso, deverá ser usada a seguinte fórmula:

$$I_{s(50)} = F \times I_s \quad (4.3)$$

Onde o  $F$  é um coeficiente de correção que pode ser obtido através de  $F = \left(\frac{De}{50}\right)^{0,45}$ , onde por sua vez  $De$  é o diâmetro equivalente. A ISRM (1985) refere que o coeficiente de correção também pode ser obtido através do gráfico apresentado na Figura 4.17:

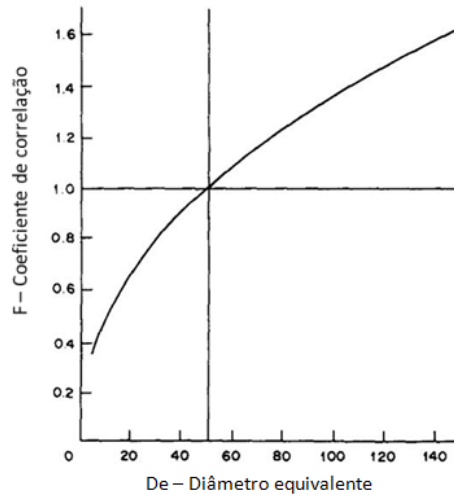


Figura 4.17 – Coeficiente de correção (adaptado de ISRM, 1985).

No caso de diâmetro muito próximo de 50mm, o coeficiente de correção poderá ser obtido com uma margem de erro mínima através da seguinte fórmula:

$$F = \sqrt{De/50} \quad (4.4)$$

Em situações em que seja impossível a obtenção de provetes cilíndricos, como no caso do xisto, será necessária a determinação do diâmetro equivalente através da comparação de uma secção do provete testado com uma secção de um provete cilíndrico, tal como se apresenta na Figura 4.18.

Como nos ensaios realizados foram utilizados provetes de dimensões  $50 \times 50 \times 50 \text{mm}^3$  o coeficiente de correção aplicado, de acordo com o referido pela ISRM (1985), foi unitário. Nestes ensaios foram testados 10 provetes de xisto de cada tipo de xisto em estudo, sendo que metade desses provetes foram ensaiados com a carga normal ao plano de anisotropia e a outra metade com a carga paralela ao plano de anisotropia.



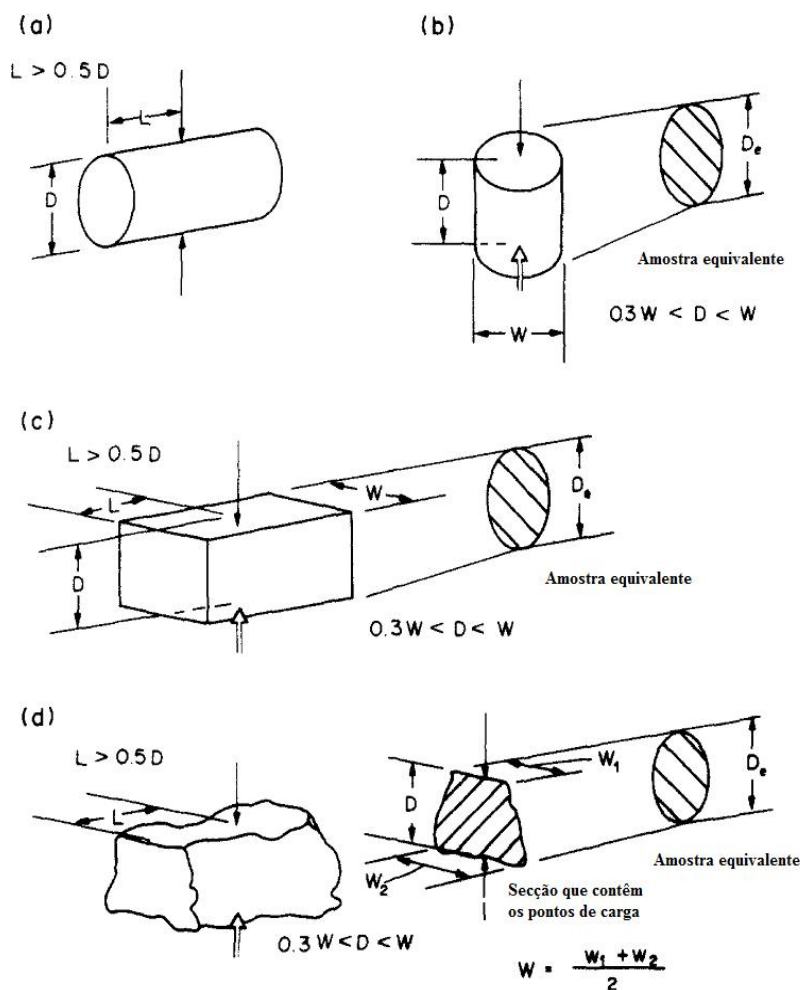


Figura 4.18 – Requisitos sobre as formas dos provetes: a) teste diametral; b) teste axial; c) teste sobre elemento regular; d) teste sobre elemento irregular (adaptado de ISRM, 1985).

Na Tabela 4.17 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de carga de ponta, nomeadamente o índice de carga de ponta médio para ambas as direções de planos de anisotropia dos provetes de cada tipo de xisto em estudo.

Tabela 4.17 – Resultados obtidos em ensaio de carga de ponta.

Tipo de xisto	FC		SA		CM		SM		BA	
	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//
Valor médio (MPa)	5,0	4,8	1,5	1,1	1,9	1,3	2,1	0,5	4,0	1,8
CV (%)	18,4	8,5	17,2	9,2	12,6	21,9	42,2	29,2	68,5	36,5
Valor máx. (Is)	6,2	5,5	1,7	1,2	2,2	1,6	3,5	0,7	8,1	2,5
Valor mín. (Is)	3,8	4,4	1,1	1,0	1,6	1,0	1,4	0,3	1,6	0,8

Dos resultados obtidos destacam-se os valores do xisto FC que são bastante superiores nas duas direções de anisotropia relativamente aos restantes tipos de xistos analisados. Os menores índices de carga de ponta são registados no xisto SA na direção normal ao plano de anisotropia e no xisto SM na direção paralela ao plano de anisotropia.

No gráfico da Figura 4.19 observa-se que todos os xistos ensaiados obtiveram um índice de carga de ponta superior na direção normal ao plano de anisotropia relativamente à direção paralela ao plano de anisotropia. A maior diferença de índices de carga de ponta entre planos de anisotropia foi registada no xisto SM com uma diferença relativa de 76%, enquanto a menor diferença, de 4%, registou-se no xisto FC.

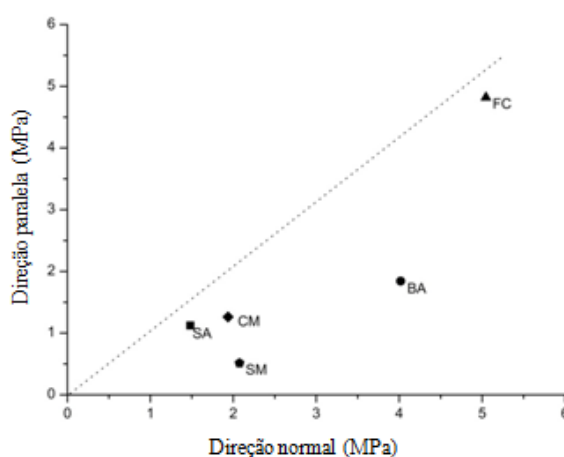


Figura 4.19 – Resultados dos ensaios de carga de ponta.

Bell (2007) propõe uma classificação para a tensão obtida em ensaios de carga de ponta, assim como, uma relação entre a tensão de carga de ponta e a resistência de compressão uniaxial. Na Tabela 4.18 é apresentado o sistema de classificação de ensaios de carga de ponta.

Tabela 4.18 – Classificação da resistência à carga de ponta (adaptado de Bell, 2007).

	Carga de ponta (MPa)	Equivalente para resistência de compressão uniaxial (MPa)
Resistência extremamente alta	Mais de 10	Mais de 160
Resistência muito alta	3 – 10	50 – 160
Resistência alta	1 – 3	15 – 60
Resistência média	0,3 – 1	5 – 16
Resistência baixa	0,1 – 0,3	1,6 – 5
Resistência muito baixa	0,03 – 0,1	0,5 – 1,6
Resistência extremamente baixa	Menos de 0,03	Menos de 0,5

Com recurso à proposta de classificação de Bell (2007), foram classificados os diferentes tipos de xistos considerando os planos de anisotropia. A classificação obtida é apresentada na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 – Classificação da resistência à carga de ponta de xistos.

Tipo de xisto	FC		SA		CM		SM		BA	
Direção	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//
Resistência	Muito alta	Muito alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Média	Muito alta	Alta

Na Tabela 4.20 são apresentados os valores de resistência à carga de ponta dos xistos estudados por Pinho (2003). Apresentam-se também intervalos de valores da resistência à carga de ponta de diferentes rochas.

Tabela 4.20 – Resistência à carga de ponta de diferentes rochas.

Tipo de Rocha	Índice de Carga de Ponta (MPa)
Xisto <sup>1</sup>	[0,94 – 10,33]
Granito <sup>2</sup>	[10,30 – 12,00]
Basalto <sup>2</sup>	[1,00 – 14,50]
Arenito <sup>2</sup>	[0,20 – 13,00]
Calcário <sup>2</sup>	[1,20 – 3,50]
Ardósia <sup>2</sup>	[4,20 – 7,90]

<sup>1</sup>Pinho (2003), <sup>2</sup>Bell (2007).

Relativamente ao xisto estudo por Pinho (2003), observa-se que, com a exceção do resultado obtido no xisto SM na direção paralela ao plano de anisotropia que é inferior ao intervalo de valores apresentado, todos os xistos obtiveram resistências à carga de ponta dentro do intervalo de valores obtidos por Pinho (2003) para o xisto. Na comparação com as restantes rochas constata-se que os resultados obtidos enquadram-se no intervalo de valores do basalto. Observa-se também que o granito regista valores muito superiores aos obtidos nos xistos em estudo.

## 4.8 Resistência à cristalização de sais

A existência de sais nas paredes das construções de alvenaria de pedra natural é um fenómeno normal, sendo a sua ocorrência originária da presença de iões solúveis provenientes da atmosfera, de metabolismo orgânico, dos solos, e de outros materiais.

Este fenómeno pode ser bastante relevante para o caso do xisto, tendo em conta a forma como se desenvolve e as propriedades e características da estrutura xistosa bastante favorável à percolação ou circulação. Os fenómenos de cristalização de sais e gelo/degelo encontram-se interligados, pelo que uma análise conjunta dos dois fenómenos permite uma avaliação mais rigorosa do funcionamento dos elementos pétreos.

Segundo a norma EN 12370:2001, correspondente aos métodos de ensaio para a pedra natural na determinação da resistência à cristalização de sais, pode-se efetuar a avaliação da resistência relativa aos danos causados pela cristalização de sais em xistos. Este ensaio consiste na execução de 15 ciclos nos quais os provetes de xisto são imersos numa solução de sulfato de sódio e posteriormente secos e arrefecidos até se atingir a temperatura ambiente. O ensaio de sais deve ser elaborado até à obtenção da rotura do provete, ou até ao máximo dos 15 ciclos, sendo que no caso de rotura é registado o número de ciclos necessários para se induzir a rotura.

Na realização deste ensaio foram utilizados 6 provetes de cada tipo de xisto em estudo com dimensões de 40x40x40mm<sup>3</sup>, de acordo com o definido pela norma EN 12370:2001. Tal como no ensaio de absorção de água à pressão atmosférica, como os provetes são imersos na solução, não foi tido em consideração o plano de anisotropia.

A Tabela 4.21 apresenta os resultados obtidos no final dos 15 ciclos de ensaio, nomeadamente as percentagens médias de variação de massa no final do ensaio.

Tabela 4.21 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à cristalização de sais.

Tipo de xisto	FC	SA	CM	SM	BA
Média da variação de massa (%)	0,15	-0,36	-1,09	0,42	0,38
Valor máximo (%)	0,22	0,18	0,30	0,89	0,46
Valor mínimo (%)	0,06	-1,23	-3,37	0,27	0,30

Através do gráfico da Figura 4.20 constata-se que os xistos SA e CM foram os únicos xistos que registaram perda de massa. Por outro lado, o xisto que obteve menor variação de massa foi o xisto FC enquanto a maior variação foi registada para o xisto CM.

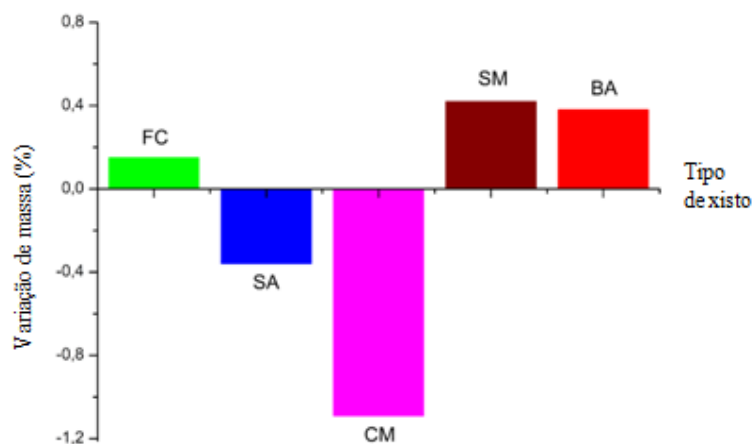


Figura 4.20 – Ensaios de resistência à cristalização de sais.

De acordo com a norma EN 12370:2001, na realização de ensaios de resistência à cristalização de sais, para além do registo da variação de massa, é necessário o registo dos ciclos máximos de cada elemento até à rotura ou o número de ciclos de ensaio no caso de não se verificar a rotura do elemento. Na Tabela 4.22 são apresentados os resultados qualitativos do ensaio de resistência à cristalização de sais, designadamente o número de ciclos máximo até à rotura, mostra-se um exemplar no estado final e uma avaliação qualitativa do seu estado final.

Efetuada uma análise qualitativa dos resultados obtidos é possível concluir que os xistos FC são os xistos menos afetados pela cristalização dos sais, ficando no final dos 15 ciclos pouco degradados. Os restantes xistos são afetados de diferente forma. O xisto SM tem uma rotura frágil dado que ocorre no 4º ciclo, no entanto a rotura ocorre por destacamento dos planos de foliagem não se registando uma degradação significativa. Apesar da rotura, a ausência de degradação resulta no ganho de massa registado devido aos sais que permanecem no interior entre planos de foliagem que não atingiram a rotura.

O xisto SA também obteve rotura, no entanto esta apenas ocorreu no 13º ciclo. Este xisto apresentou uma degradação acentuada coerente com a perda de massa registada. O xisto CM registou uma rotura frágil ao 4º ciclo complementada com grande degradação, causa direta da significativa perda de massa registada neste tipo de xisto. O xisto BA obteve rotura apenas no 12º ciclo apresentando uma degradação pouco acentuada coerente com a perda de massa.

Tabela 4.22 – Resultados qualitativos do ensaio de resistência à cristalização de sais.

Tipo de xisto	Provete final	Número de ciclos até à rotura	Estado final
FC		15	Pouco degradado
SA		13	Rotura e muito degradado
CM		4	Rotura e muito degradado
SM		4	Rotura e pouco degradado
BA		12	Rotura e pouco degradado

De acordo com Bell (2007), as conclusões relacionadas com a durabilidade são obtidas comparando os resultados dos ensaios com o desempenho de rochas das quais é conhecido o comportamento. Infelizmente uma das contrariedades deste ensaio, que no que concerne ao xisto se torna ainda mais relevante, é a falta de valores de referência.

Assim sendo, propõe-se uma classificação simples para os xistos ensaiados, independente da variação de massa, considerando apenas a rotura ou não antes dos 15 ciclos de ensaio. Os xistos que resistem a 15 ciclos de ensaios são considerados como resistentes à cristalização de sais e os xistos que obtêm rotura antes dos 15 ciclos como não resistentes à cristalização de sais. Perante a referida classificação, na Tabela 4.23 apresenta-se um resumo da classificação dos xistos ensaiados.

Tabela 4.23 – Classificação da resistência à cristalização de sais de xistos.

Tipo de xisto	FC	SA	CM	SM	BA
Classificação	Resistente	Não resistente	Não resistente	Não resistente	Não resistente

É possível assim concluir, no que concerne à resistência à cristalização de sais, que o xisto mais resistente é o xisto FC, sendo o xisto CM o menos resistente.

Os resultados dos ensaios de cristalização de sais mostram que os xistos que apresentam menor variação de massa tem melhor resistência à cristalização de sais, seja essa variação refletida num ganho ou perda de massa. Uma perda de massa significa naturalmente que o xisto sofreu rotura ou elevada degradação. Por outro lado, o aumento de massa significa que o xisto acumula cristais de sais e que estes ao longo do tempo poderão provocar a rotura do provete.

#### 4.9 Comparação entre ensaios

A comparação entre os resultados obtidos nos vários ensaios é aceitável uma vez que foram realizados em simultâneo para todos os tipos de xisto. Neste subcapítulo apresentam-se as análises comparativas entre os resultados dos vários ensaios. As análises estão subdivididas em três áreas distintas nomeadamente, comparação entre ensaios de determinação de resistências mecânicas, comparação entre a resistência à compressão axial e os resultados dos ensaios não destrutivos e comparação entre a resistência à cristalização de sais e os restantes ensaios.

### 4.9.1 Comparação entre ensaios para a determinação de resistências mecânicas

De acordo com a norma EN 1926:2006 é possível efetuar uma correlação entre a resistência mecânica à compressão uniaxial e a resistência à carga de ponta. Para as situações em que esta não é possível a ISRM (International Society for Rock Mechanics) propõe que se procede da seguinte forma:

*Resistência à compressão uniaxial = 22 vezes o Índice de Resistência sob Carga de Ponta*

A Tabela 4.17 apresentada anteriormente quando se abordou o ensaio de Carga de Ponta mostra esta correlação permitindo uma análise e classificação simplificada das rochas em estudo. No entanto este método não é tão rigoroso como o experimental. Tal constata-se com os resultados dos diferentes ensaios de resistência mecânica executados em laboratório.

Pretende-se neste ponto efetuar a correlação entre os vários ensaios mecânicos realizados aos diferentes tipos de xisto. Serão comparados os resultados referentes aos ensaios de resistência mecânica à compressão axial, de carga de ponta e de dureza superficial. Na Tabela 4.24 apresentam-se as médias dos resultados obtidos nos três ensaios de resistência mecânica.

Tabela 4.24 – Resultados obtidos em ensaios de caracterização da resistência mecânica.

Tipo de xisto Direção Ensaio	FC		SA		CM		SM		BA	
	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//
Resistência a compressão (MPa)	144,9	151,9	46,0	45,4	79,1	98,4	53,6	29,7	142,3	88,6
Esclerómetro de Schmidt (MPa)	30,0	30,6	11,6	10,4	20,4	21,4	18,0	13,6	20,4	16,8
Carga de Ponta (Is)	5,0	4,8	1,5	1,1	1,9	1,3	2,1	0,5	4,0	1,8

Na Figura 4.21 são comparadas as duas direções de anisotropia entre o ensaio de resistência à compressão e o ensaio de carga de ponta. Para as direções de ensaio normal e paralela ao plano de anisotropia obtiveram-se respetivamente  $R^2=0,90$  e  $R^2=0,81$ . Observa-se uma boa correlação entre os dois ensaios em ambas as direções de anisotropia.



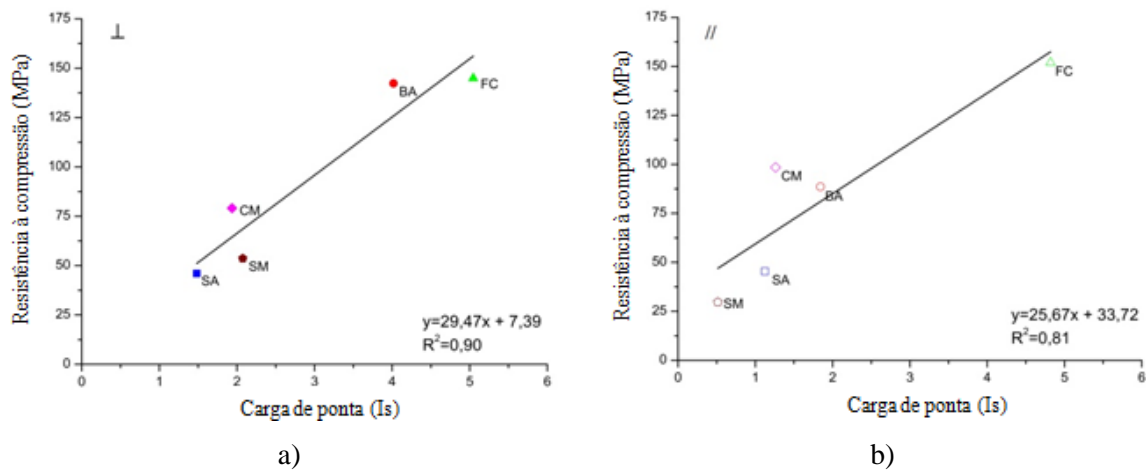


Figura 4.21 – Comparação entre a resistência à compressão axial e o índice de carga de ponta:

a) Direção normal; b) Direção paralela.

Na comparação entre os resultados do ensaio de resistência à compressão e o ensaio de carga de ponta constata-se a diferença existente entre planos de anisotropia nos xistos FC e CM. No ensaio de resistência à compressão, os xistos FC e CM registam valores superiores na direção paralela ao plano de anisotropia enquanto no ensaio de carga de ponta em todos os tipos de xisto o  $I_s$  na direção normal é superior ao da direção paralela. Esta diferença está associada à metodologia de ensaio pois, enquanto o ensaio de resistência à compressão axial permite o contacto dos pratos da máquina por toda a superfície do provete, o ensaio de carga de ponta é realizado com uma carga concentrada num ponto da superfície do provete. Sendo um material xistoso, quando é aplicada uma carga na direção paralela aos planos de foliagem, o provete rompe pelo destacamento dos planos de foliagem obtendo, desta forma, resistência inferior.

Para confirmar que as diferenças registadas são devidas à variação do procedimento dos ensaios comparou-se na Figura 4.22 os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e dureza superficial.

Na análise dos gráficos comparativos entre os dois ensaios verifica-se uma boa correlação. Nos resultados obtidos no ensaio de dureza superficial os xistos FC e CM registam valores superiores na direção paralela. O mesmo se verifica no ensaio de resistência à compressão axial na mesma direção.

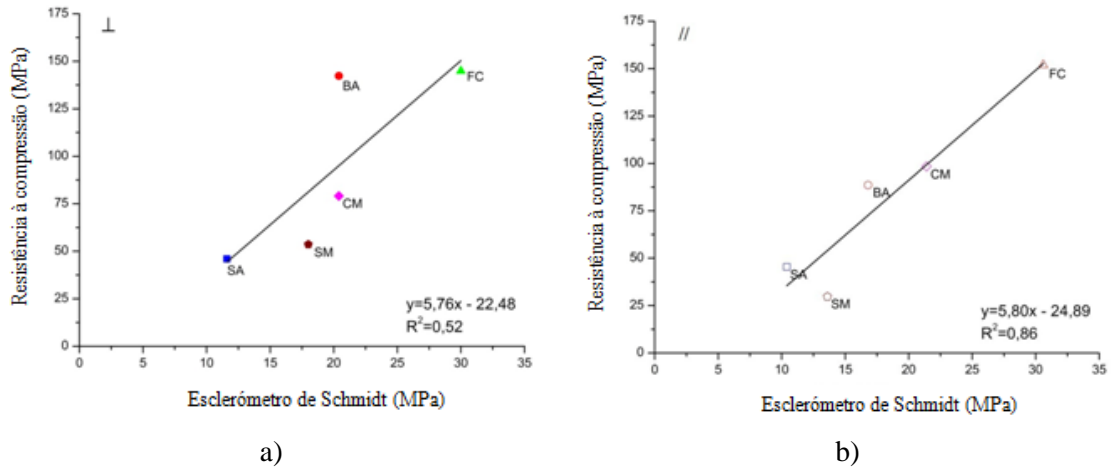


Figura 4.22 – Comparação entre a resistência à compressão axial e a dureza superficial: a) Direção normal; b) Direção paralela.

Os gráficos da Figura 4.23 permitem observar a comparação entre os resultados obtidos nos ensaios de dureza superficial e carga de ponta, conferindo-se a linearidade existente entre ambos os ensaios tal como se verificara na mesma comparação com a resistência à compressão axial.

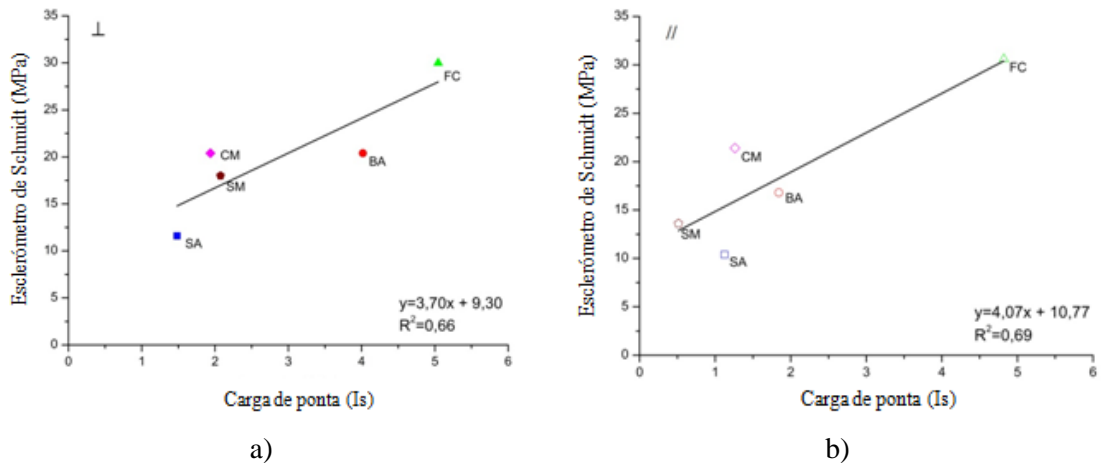


Figura 4.23 – Comparação entre a dureza superficial e o índice de carga de ponta: a) Direção normal; b) Direção paralela.

#### 4.9.2 Comparação entre a resistência à compressão axial e os resultados dos ensaios não destrutivos

No sentido de compreender propriedades como a porosidade ou a densidade dos xistos e a sua correlação com a resistência mecânica sem que as propriedades em análise sejam afetadas por outras variáveis, realizaram-se os ensaios de absorção de água à pressão atmosférica, absorção

de água por capilaridade, ultrassons e resistência mecânica à compressão com os mesmos provetes e pela respetiva ordem.

Dada a elevada heterogeneidade característica dos xistos, a realização dos ensaios com os mesmos provetes permite que, na comparação entre os ensaios, seja eliminada a variável relativa a eventuais alterações de estrutura, seja em termos de planos de anisotropia, textura ou composição mineralógica. Nesta análise comparativa pretende-se compreender a influência dos vários fenómenos físicos na variação da resistência mecânica à compressão dos xistos ensaiados.

A porosidade analisada através dos ensaios de absorção de água à pressão atmosférica e por capilaridade é uma das propriedades que mais afeta a resistência mecânica dos materiais pétreos. Quanto maior for a porosidade menor será a resistência do elemento. Nas Figura 4.24 e Figura 4.25 são apresentados gráficos comparativos entre os ensaios de absorção de água e os ensaios de resistência mecânica à compressão dos diferentes tipos de xisto em estudo. A comparação entre estes dois ensaios permite interpretar a influência da presença de vazios na variação da resistência à compressão.

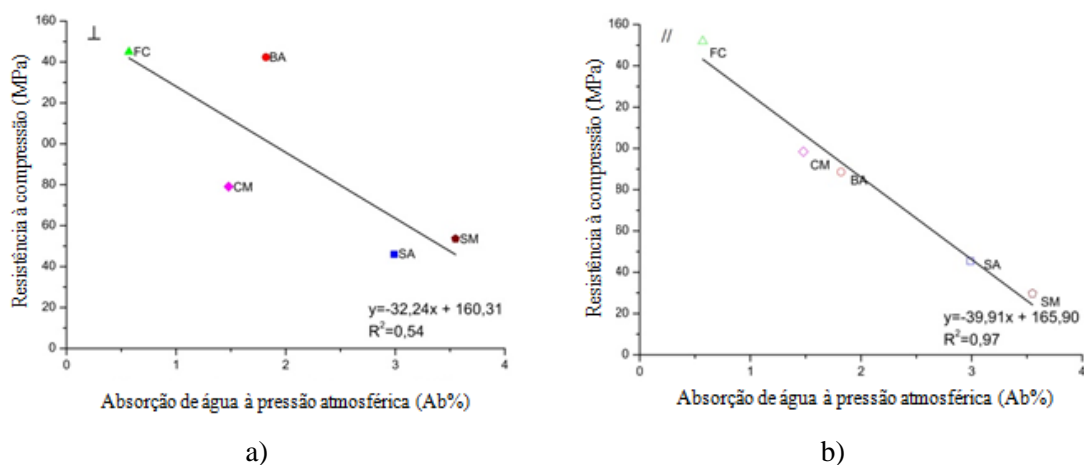


Figura 4.24 – Comparação entre a resistência à compressão e a absorção de água à pressão atmosférica: a) Direção normal; b) Direção paralela.

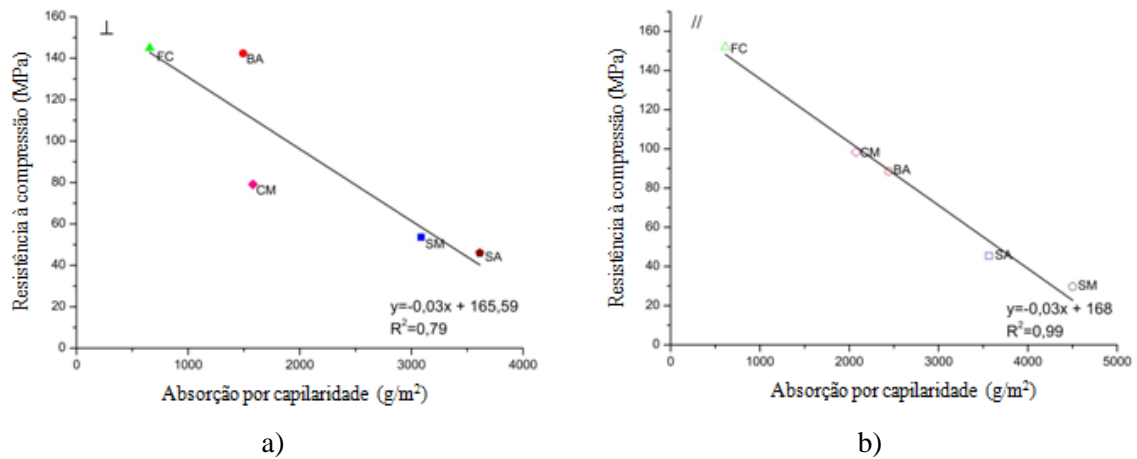


Figura 4.25 – Comparação entre a resistência à compressão e a absorção de água por capilaridade:

a) Direção normal; b) Direção paralela.

É possível verificar que quanto maior é a absorção do xisto menor será a sua resistência mecânica. Com a exceção do resultado do xisto BA no ensaio de resistência à compressão axial, observa-se uma boa correlação entre os dois ensaios sendo que no ensaio na direção paralela a correlação foi praticamente perfeita. A boa correlação obtida na direção paralela deve-se, muito possivelmente, às estruturas de porosidade que criam fissuras uniformes que acompanham a xistosidade e controlam ambos os processos de resistência mecânica e absorção de água.

Os gráficos da Figura 4.26 confirmam a coerência entre os valores obtidos entre o ensaio de absorção de água à pressão atmosférica e o ensaio de absorção de água por capilaridade. Apesar de no ensaio de absorção de água à pressão atmosférica não serem considerados os planos de anisotropia, razão para as diferenças registadas apenas na direção normal ao plano de anisotropia, observa-se uma boa correlação entre os resultados obtidos nos dois ensaios.

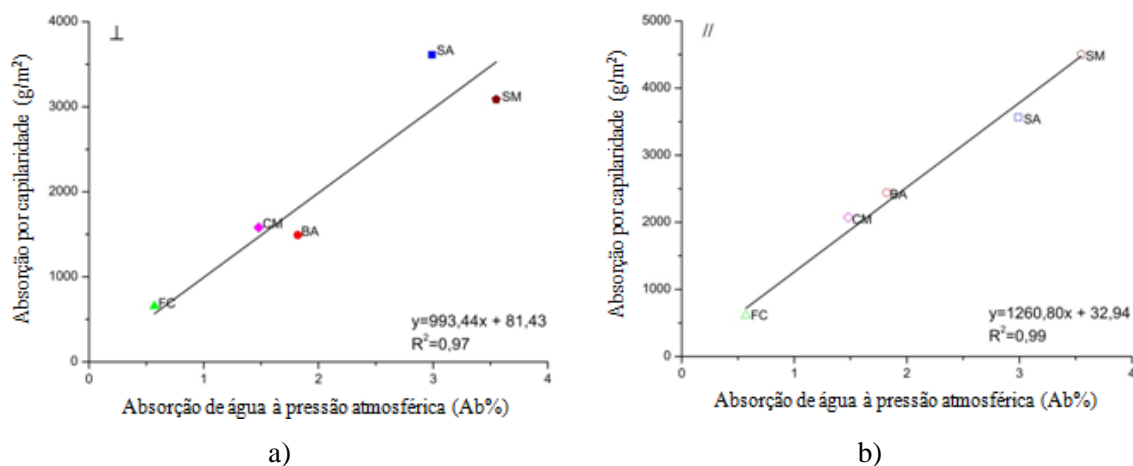


Figura 4.26 – Comparação entre a absorção de água à pressão atmosférica e absorção de água por capilaridade: a) Direção normal; b) Direção paralela.

É certo que os xistos, devido à sua origem metamórfica, são formados por diferentes minerais dispostos por camadas mais ou menos regulares mediante o tipo e o nível de metamorfismo que estes foram sujeitos na sua formação geológica. Perante estas considerações as avaliações deverão ser ponderadas sendo a comparação entre os resultados obtidos nos ensaios de ultrassons com os obtidos nos ensaios de resistência mecânica à compressão essencial para determinação da correlação entre a densidade do material e a resistência mecânica à compressão.

A Figura 4.27 apresenta a correlação entre a resistência à compressão axial e a velocidade de propagação de ultrassons tendo em consideração os planos normais de anisotropia. Apresenta-se apenas o gráfico comparativo da direção normal de ensaio dado que na análise comparativa da direção paralela de ensaio não foi obtida uma correlação significativa. Tal deve-se à rotura ocorrer sobretudo em tração e portanto controlada pelas fissuras que são pouco relevantes para a velocidade de propagação de ultrassons.

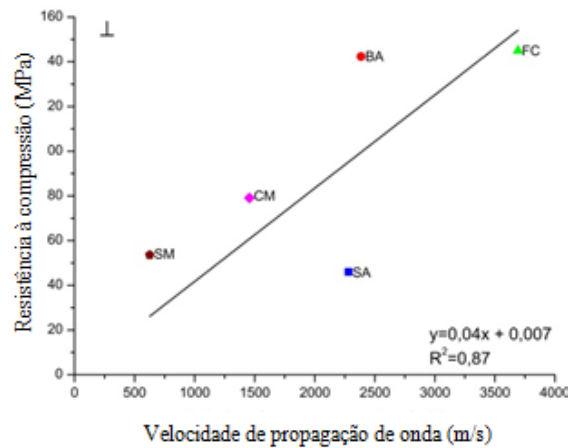


Figura 4.27 – Comparação entre a resistência à compressão e a velocidade de propagação de ultrassons na direção normal de ensaio.

É possível detetar algumas diferenças na direção normal ao plano de anisotropia onde o xisto SA se destaca pela baixa resistência mecânica quando a velocidade de propagação de onda encontra-se na média do intervalo de resistências obtidas em todos os tipos de xisto ensaiados. Situação semelhante ocorreu também, na direção paralela, sobretudo com o xisto SM. De qualquer forma, nos gráficos comparativos observa-se que, quanto maior é a velocidade de propagação de onda maior é a resistência à compressão do xisto. Como a variação da velocidade de propagação de onda é proporcional à densidade e homogeneidade do material, confirma-se que quanto mais denso ou homogêneo for o xisto maior deverá ser a sua resistência mecânica à compressão.

#### 4.9.3 Comparação entre resistência à cristalização de sais e os restantes ensaios

A comparação dos ensaios de cristalização de sais com os restantes ensaios permite confirmar e fundamentar a análise dos resultados obtidos em ensaios de avaliação da resistência à cristalização de sais. Os gráficos da Figura 4.28 apresentam a correlação entre os valores obtidos no ensaio de cristalização de sais e no ensaio de resistência à compressão. Observa-se que em ambas as direções de anisotropia os xistos que têm uma menor variação de massa possuem maior resistência à compressão, sendo o xisto FC o que regista a menor variação de massa e a maior resistência à compressão. Observa-se também que os xistos que atingiram a rotura ou elevada degradação no ensaio de cristalização de sais, nomeadamente os xistos CM, SA e SM, são os xistos que obtiveram resistências à compressão mais baixas.

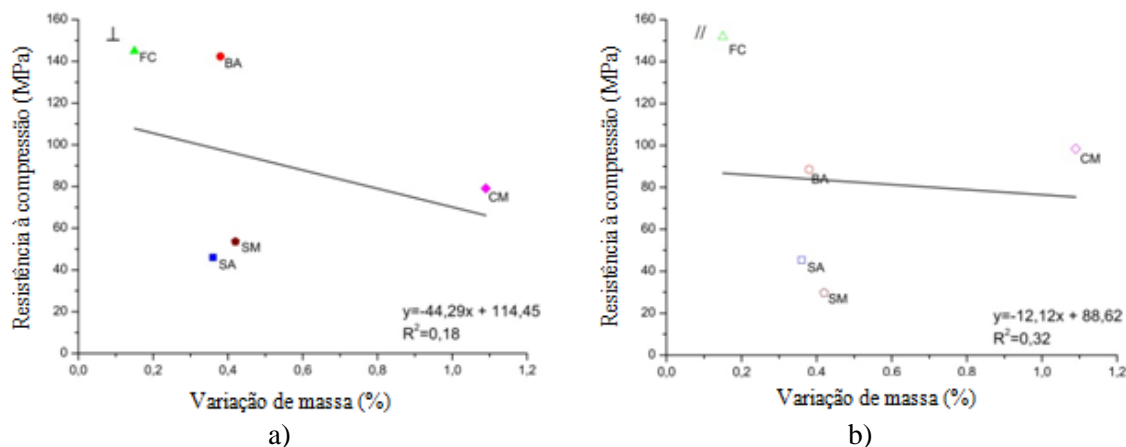


Figura 4.28 – Comparação entre o ensaio de resistência à cristalização de sais e o ensaio de resistência à compressão: a) Direção normal; b) Direção paralela.

No que concerne à comparação com o ensaio de absorção de água à pressão atmosférica e com o ensaio de absorção de água por capilaridade, a Figura 4.29 e Figura 4.30 parecem indicar que quanto menor for a variação de massa no ensaio de cristalização de sais menor é a absorção de água. O xisto FC regista a menor variação de massa e os menores valores nos ensaios de absorção de água à pressão atmosférica e de absorção de água por capilaridade. Com exceção do xisto CM na absorção de água à pressão atmosférica e na direção paralela na absorção de água por capilaridade constata-se que os xistos que obtiveram rotura ou elevada degradação na cristalização de sais são os xistos que registam a maior absorção de água. Perante estes resultados pode-se afirmar que os xistos com menor absorção são xistos com maior resistência à cristalização de sais.

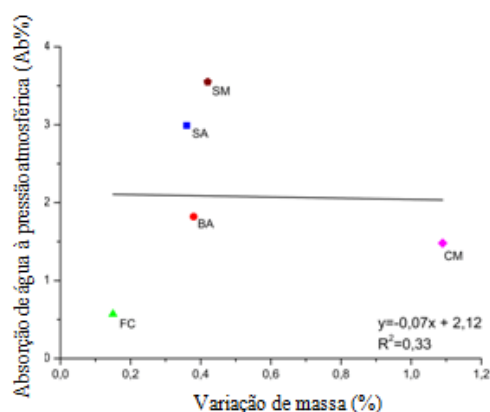


Figura 4.29 – Comparação entre o ensaio de resistência à cristalização de sais e o ensaio de absorção de água à pressão atmosférica.

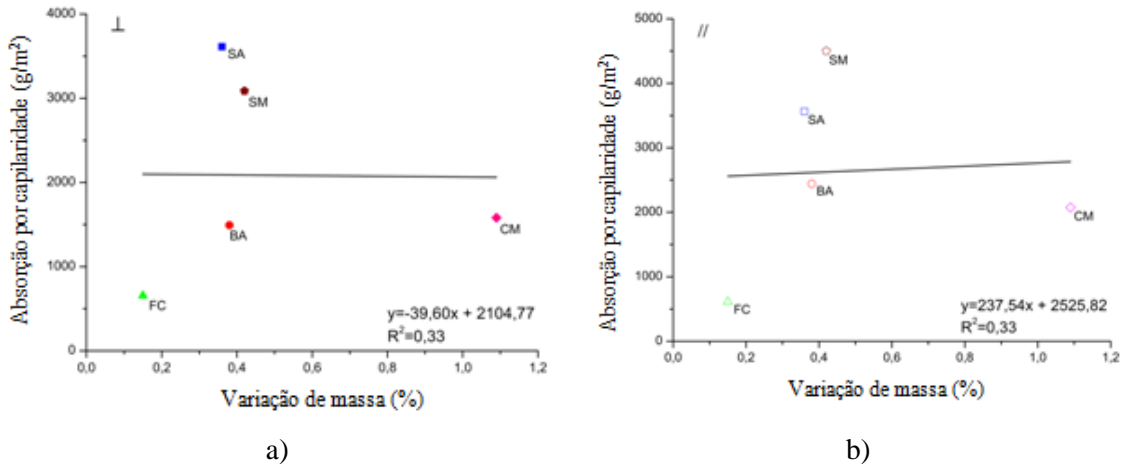


Figura 4.30 – Comparação entre o ensaio de resistência à cristalização de sais e o ensaio de absorção de água por capilaridade: a) Direção normal; b) Direção paralela.

Relativamente à correlação com a velocidade de propagação de onda no ensaio de ultrassons, através dos gráficos da Figura 4.31 observa-se que, de uma forma geral, os xistos que obtiveram rotura ou elevada degradação são os xistos que registam menor velocidade de propagação de onda. O xisto FC que obteve a menor variação de massa é o xisto que regista maior velocidade de onda em ambas as direções de anisotropia. Perante estes dados, os xistos com maior densidade são xistos que têm maior resistência à cristalização de sais.

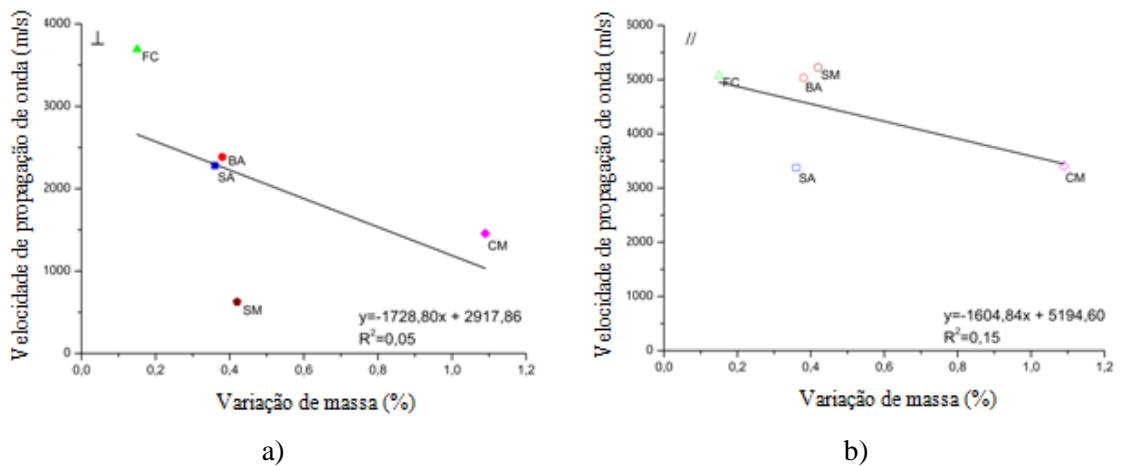


Figura 4.31 – Comparação entre o ensaio de resistência à cristalização de sais e o ensaio de propagação de ultrassons: a) Direção normal; b) Direção paralela.



#### 4.10 Considerações finais

De forma a congregar todos os resultados e análises realizadas aos diferentes tipos de xisto e tendo o intuito de facilitar a leitura das propriedades dos xistos para fins estruturais, apresenta-se na tabela seguinte um resumo da caracterização qualitativa dos xistos estudados. Perante a caracterização efetuada ao xisto conclui-se que o xisto FC, extraído de Vila Nova de Foz Côa, é o xisto com melhores propriedades de resistência e durabilidade.

Tabela 4.25 – Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização dos diferentes tipos de xisto analisados.

Tipo de xisto	Direção	Resistência à compressão	Porosidade	Resistência à cristalização de sais
Vila Nova de Foz Côa	⊥	Alta	Baixa	Resistente
	//	Alta		
Serra de Arga	⊥	Moderada	Média	Não resistente
	//	Moderada		
Carrzedo de Montenegro	⊥	Alta	Baixa	Não resistente
	//	Alta		
Sobral de São Miguel	⊥	Moderada	Média	Não resistente
	//	Moderada		
Barqueiros	⊥	Alta	Baixa	Não resistente
	//	Alta		

Para além das propriedades apresentadas também é importante realçar a influência dos planos de anisotropia que, variando mediante o tipo de formação metamórfica, tem um papel preponderante no comportamento físico-químico e mecânico dos xistos.

No que concerne à análise comparativa com outros elementos pétreos, em termos de resistência mecânica, os xistos mais resistentes atingem valores da mesma ordem do granito, sendo que os xistos menos resistentes são comparáveis ao arenito ou calcário. A mesma comparação é verificada quando analisada a porosidade e a densidade dos xistos.

## Capítulo 5

# CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE ALVENARIA DE XISTO

No presente capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização do comportamento mecânico de alvenaria de xisto representativa de construções tradicionais. Inicialmente apresenta-se o estudo das propriedades mecânicas e físico-químicas das argamassas. É efetuada a caracterização de duas argamassas tradicionais recolhidas *in-situ* e de duas argamassas desenvolvidas em laboratório. Em laboratório foi criada uma argamassa de terra e uma argamassa de terra artificial. Seguidamente descrevem-se os ensaios de resistência mecânica à compressão axial, onde são analisados dois tipos de prismas de alvenaria de xisto. Um tipo de prisma foi construído com xisto de Vila Nova de Foz Côa e argamassa de terra e o outro tipo foi construído com xisto de Vila Nova de Foz Côa e argamassa de terra artificial. É também apresentado o processo de construção de oito paredes de alvenaria de xisto. Posteriormente apresentam-se os ensaios de resistência mecânica à compressão diagonal e discutem-se os seus resultados. Com o intuito de melhorar a capacidade resistente destas alvenarias, apresentam-se duas propostas de reforço e discutem-se os resultados de uma série de ensaios de resistência mecânica à compressão diagonal de paredes reforçadas.

## 5.1 Caracterização das argamassas

Em construções de alvenaria de xisto as argamassas desempenham um papel relevante na resposta e desempenho estrutural para as diversas solicitações mecânicas. Correntemente neste tipo de construções, o ligante utilizado é a argamassa de terra, normalmente recolhida nas imediações do local de implantação da construção.

Para se proceder à caracterização das argamassas aplicadas em construções tradicionais, foram recolhidas amostras de duas construções localizadas em Carrzedo de Montenegro, adiante designadas por amostra A e amostra B (ver Figura 5.1).



Figura 5.1 – Construções de onde foram extraídas as amostras de argamassa de terra para caracterização: a) Local de extração da amostra A; b) Local de extração da amostra B.

A opção de recolha de amostras nesta construção da região de Trás-os-Montes prende-se com a maior facilidade de obtenção de amostras de argamassas tradicionais de terra no seu estado original comparativamente às outras regiões em estudo onde mais frequentemente se encontram construções já intervencionadas. Foram desenvolvidos ensaios laboratoriais sobre as duas amostras com o intuito de determinar a granulometria dos aglomerados, a existência de cal na sua constituição, o limite de liquidez, o limite de plasticidade e a atividade da argila.

### 5.1.1 Granulometria do solo

Um aspeto preponderante na caracterização das argamassas é a determinação da granulometria dos seus aglomerados. Segundo Fernandes (2011), a composição granulométrica constitui uma das características de identificação dos solos, de onde são derivadas as propriedades básicas do solo e que por isso deve ser sempre determinada, por regra, antes de quaisquer outros parâmetros.

A determinação da granulometria do solo foi realizada pelo método de peneiração para as partículas de maior dimensão e pelo método de sedimentação para as partículas de menor dimensão. Através da análise das curvas granulométricas obtidas, que se apresentam de seguida, é possível avaliar a sua composição nos vários constituintes (argila, silte, areia e cascalho).

As curvas da Figura 5.2 relevam uma ligeira diferença na percentagem de constituintes. Esta diferença é provocada essencialmente pela variação na percentagem de siltes. Apesar de serem argamassas recolhidas em diferentes edifícios, os resultados em termos de granulometria dos seus aglomerados são muito semelhantes.

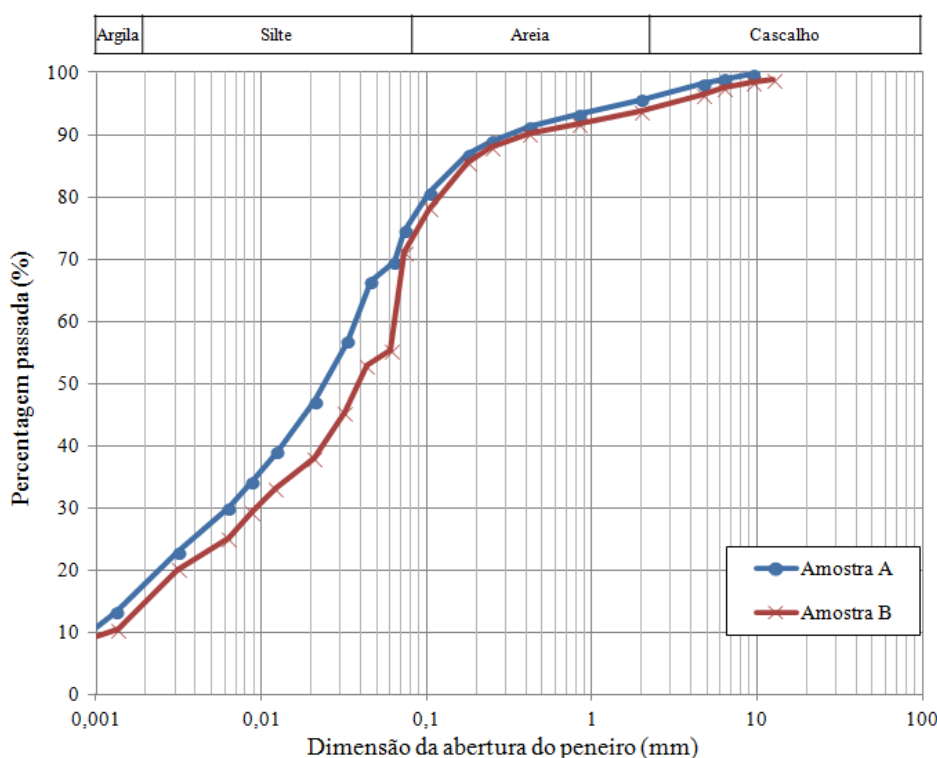


Figura 5.2 – Curvas granulométricas obtidas para as duas amostras de argamassa recolhidas.

Pela análise das curvas granulométricas pode-se concluir que a amostra A é constituída por 17% de argila, 54% de siltes, 16% de areia fina, 6% de areia média, 3% de areia grossa e 4% de cascalho. A amostra B é constituída por 14% de argila, 50% de siltes, 22% de areia fina, 5% de areia média, 3% de areia grossa e 6% de cascalho. Através da análise da composição das argamassas pelo triângulo de Feret, ambas as amostras podem ser consideradas como um silte arenoso.

### 5.1.2 Presença de cal

Para a determinação da existência de cal nas duas amostras foi seguido o procedimento proposta na norma ASTM D4373-96, que define a metodologia para a determinação quantitativa e qualitativa do conteúdo de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) em solos. No caso específico dos ensaios realizados às duas amostras pretendeu-se apenas identificar a existência ou ausência de cal nos constituintes das argamassas. Para tal, foram preparadas duas amostras das argamassas. As argamassas foram destorroadas até à obtenção de uma amostra uniforme. Estas foram posteriormente colocadas na estufa para obtenção de secagem completa. De seguida as amostras foram arrefecidas até à temperatura ambiente.

A identificação da existência de carbonato de cálcio é possível através da reação química decorrente da adição de ácido clorídrico (HCl) à amostra de solo. O ácido clorídrico reage com o carbonato de cálcio permitindo a determinação da sua existência no solo em análise. Quando é detetada a existência de carbonato de cálcio nos solos, observa-se uma efervescência devida à reação química. Nos ensaios realizados, não foi possível observar esta reação no momento em que foi adicionado o ácido clorídrico (ver Figura 5.3). Tal indica a não existência de carbonato de cálcio nas amostras, sendo possível concluir que nos constituintes das duas argamassas ensaiadas não existe cal.

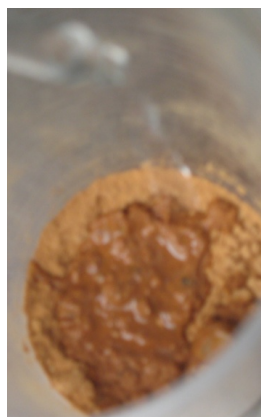


Figura 5.3 – Adição de ácido clorídrico nas amostras de argamassa.

Para as amostras de solos em que é detetado o carbonato de cálcio, é possível determinar a sua quantidade através de um medidor de pressão. O valor obtido com a pressão libertada pelos gases durante a reação efervescente permite determinar a quantidade efetiva de carbonato de cálcio, através do procedimento exposto na norma ASTM D4373-96.

### 5.1.3 Limites e atividade da argila

De forma a determinar a consistência das amostras calcularam-se os limites de liquidez e de plasticidade. Como refere Fernandes (2011), o limite de liquidez em conjunto com o limite de plasticidade são os parâmetros que mais se utilizam e que mais informações úteis fornecem acerca do comportamento de solos. De acordo com o mesmo autor, o limite de liquidez é determinado com recurso à concha de Casagrande. Na concha de Casagrande é colocada uma pasta de solo e executado um sulco separando o solo em duas metades. O limite de liquidez é considerado como o valor do teor em água para o qual após 25 pancadas da concha de Casagrande o sulco central é fechado ao longo de uma distância de 12,7mm.

Na determinação do limite de plasticidade são moldadas quatro amostras de forma esférica e volume semelhante a partir de uma pasta do solo. Estas amostras são moldadas até se atingir filamentos cilíndricos com cerca de 3mm de diâmetro. Este processo é repetido até que por progressiva secagem o filamento se quebre em vários fragmentos. O limite de plasticidade é determinado a partir da média aritmética do teor em água das amostras.

Na Tabela 5.1 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios. Da análise dos resultados pode-se concluir que os índices de plasticidade das duas amostras são muito semelhantes, tendo a amostra A um índice de plasticidade de 7% e a amostra B de 9%.

Tabela 5.1 – Limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade.

	Amostra A	Amostra B
Limite de Liquidez $W_L$	28	30
Limite de Plasticidade $W_p$	21	21
Índice de Plasticidade $I_p$	7	9

De acordo com Fernandes (2011), os limites de liquidez e de plasticidade, bem como a respetiva diferença, tendem a crescer com o carácter argiloso dos solos; quando estes valores são muito elevados os solos dizem-se muito plásticos. Assim sendo, de acordo com os dados obtidos, considerando a carta de plasticidade de Casagrande apresentada na norma ASTM D2487-85, ambas as amostras são classificadas com argila magra.

Outro fator importante na análise de argamassas tradicionais de terra é a determinação da atividade da argila. Existem duas metodologias para a determinação da atividade da argila,

uma baseada nos valores obtidos dos índices de plasticidade e da percentagem de argila e outra através do ensaio de azul-de-metileno.

A determinação da atividade da argila presente em solos pode ser determinada através da fórmula seguinte:

$$At = \frac{Ip}{\% < 2\mu m} \quad (5.1)$$

onde  $At$  representa a atividade da argila,  $Ip$  o índice de plasticidade e  $\% < 2\mu m$  a percentagem de argila. Para a amostra A obteve-se uma atividade de 0,41 e para a amostra B uma atividade de 0,64. Pela comparação dos resultados para ambas as argamassas com os valores de referência propostos por Fernandes (2009), ver Tabela 5.2, a argila em ambas as argamassas é classificada como pouco ativa.

Tabela 5.2 – Classificação dos minerais de argila quanto à atividade (Fernandes, 2011).

Argila	$A_r$
Pouco ativa	< 0,75
Normal	0,75 – 1,25
Muito ativa	> 1,25

O ensaio de azul-de-metileno é executado de acordo com a norma EN 933-9 (2002) e, como referido anteriormente, permite a determinação da atividade das argilas contidas num solo, através da troca iónica entre os cátions existentes na superfície das partículas de tamanho inferior a 2mm. O ensaio processa-se através da dissolução das partículas da amostra com dimensões inferiores a 2mm em 500ml de água destilada. O corante azul-de-metileno é adicionado (ver Figura 5.4 a)) e após um minuto de mistura é retirada uma gota da suspensão sendo esta depositada em papel de filtro. O depósito da suspensão no papel de filtro forma uma mancha azul escura circundada por uma zona húmida sem cor. Este processo é repetido até que seja obtida na zona húmida, circundante à mancha azul, uma auréola azul clara persistente de cerca de 1 mm (ver Figura 5.4 b)).

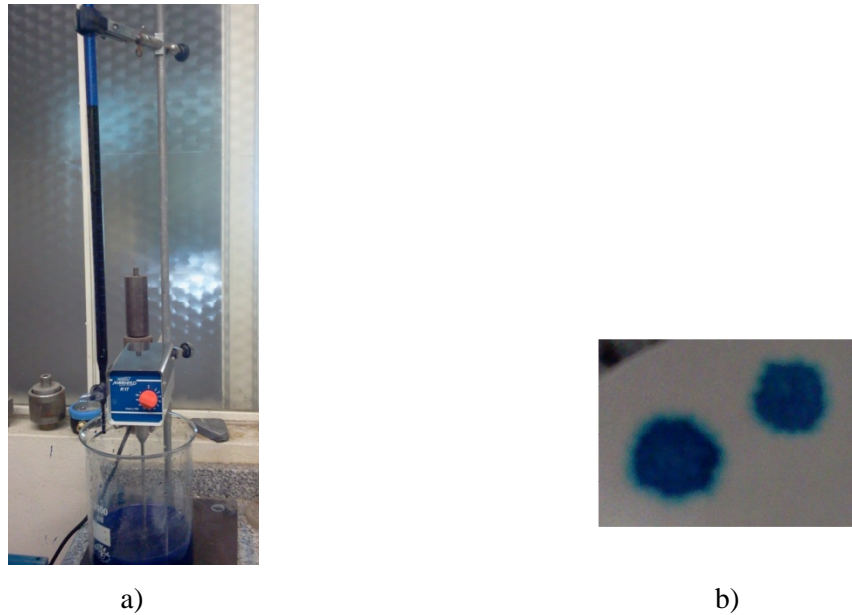


Figura 5.4 – Ensaio de azul-de-metileno: a) Esquema de ensaio; b) Mancha no papel de filtro.

Quando obtida a auréola azul clara dá-se por concluído o ensaio e regista-se o volume de corante de azul-de-metileno adicionado. Com o volume de corante de azul-de-metileno e a massa da amostra, é possível obter o valor de azul-de-metileno  $MB$  através da equação (5.2).

$$MB = \frac{V_1}{M_1} \times 10 \quad (5.2)$$

onde  $V_1$  é o volume total de corante injetado (em mililitros) e  $M_1$  é a massa do provete ensaiado (em gramas). Nas duas amostras ensaiadas foram obtidos para os valores de  $MB$  10,7ml/g na amostra A e 10,0ml/g na amostra B. Fabbri (1994) sugere uma metodologia para a determinação da atividade de argilo-minerais em função do valor do azul-de-metileno e da percentagem de argila. Fabbri (1994) define coeficiente de atividade (CA) como coeficiente para a classificação da atividade dos argilo-minerais. O coeficiente de atividade é obtido a partir do ábaco proposto por Fabbri (1994) que se apresenta na Figura 5.5.

Através do gráfico da Figura 5.5, em conjunto com a Tabela 5.3, é possível definir a atividade da argila das amostras ensaiadas. Assim sendo, obtêm-se para ambas as amostras um coeficiente de atividade de aproximadamente  $2,5(x10^{-3}g/g)$ , concluindo-se que as argilas contidas em ambas as amostras são pouco ativas.



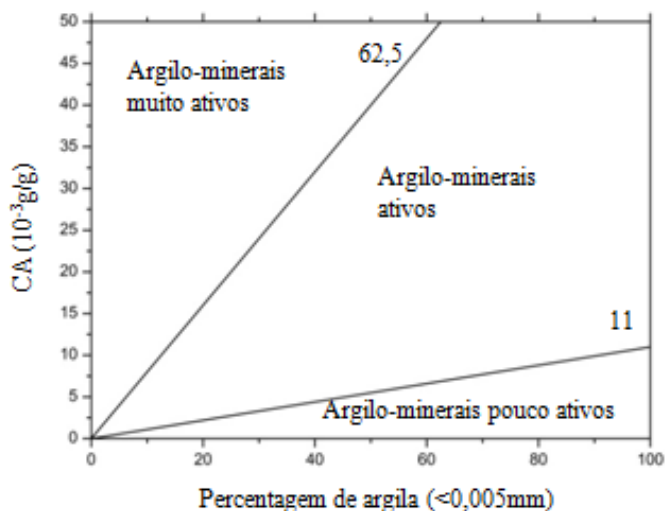


Figura 5.5 – Ábaco para a caracterização do grau de atividade da fração argilosa dos solos (Fabbri, 1994).

Tabela 5.3 – Atividade de argilo-minerais em função do coeficiente de atividade (Fabbri, 1994).

Argila	CA ( $10^{-3}$ g/g)
Pouco ativa	< 11
Normal	11 – 80
Muito ativa	> 80

A baixa atividade da argila contida num solo reduz a consistência do mesmo e conseqüentemente influencia o seu comportamento mecânico diminuindo a capacidade resistente do solo. Em ambas as metodologias utilizadas para a determinação da atividade da argila foi possível confirmar a baixa atividade dos argilo-minerais contidos nas amostras ensaiadas.

## 5.2 Argamassas produzidas em laboratório

Com o intuito de representar as propriedades registradas nas argamassas recolhidas *in-situ* foram preparadas em laboratório duas argamassas. Uma argamassa foi produzida com solo recolhido na mesma zona de onde foram recolhidas as argamassas nas construções existentes e a outra argamassa foi desenvolvida de forma artificial com características semelhantes às argamassas estudadas, nomeadamente em termos do fuso granulométrico e da atividade da fração argilosa.

### 5.2.1 Argamassa de terra

Para a preparação da argamassa de terra, foram recolhidos solos na zona de Carrazedo de Montenegro. O local escolhido para a recolha de solo encontra-se próximo das construções onde foram recolhidas as amostras apresentadas no ponto 5.1. A proximidade do local de extração de amostras do solo aos edifícios procura representar melhor o tipo de solos usados tradicionalmente na construção. A escolha do sítio para extração do solo é confirmada pelo testemunho da população local, que confirma ser este local comumente utilizado para a recolha de solo para produção de argamassas de terra para a construção tradicional da região de Carrazedo de Montenegro (ver Figura 5.6).



Figura 5.6 – Local de extração de solo.

Na preparação da argamassa de terra recorreu-se à metodologia tradicional. Iniciando-se a preparação pela peneiração do solo com recurso a um crivo. Com base nos resultados obtidos da análise das argamassas existentes, nomeadamente não se verificando a presença de cal, a argamassa formulada em laboratório foi preparada apenas com a mistura do solo peneirado e água potável (ver Figura 5.7). A argamassa foi preparada em função da trabalhabilidade tendo sido obtido um teor em água médio de 43%.



Figura 5.7 – Preparação em laboratório da argamassa de terra.

O comportamento mecânico desta argamassa de terra foi caracterizado com recurso a ensaios de resistência à flexão (ver Figura 5.8) e à compressão axial. Foram ensaiados seis provetes de dimensões 40x40x160mm à flexão e doze provetes de secção 40x40mm à compressão axial. Os resultados médios obtidos são apresentados na Tabela 5.4.



Figura 5.8 – Ensaio de resistência mecânica à flexão das amostras de argamassa de terra.

Tabela 5.4 – Resultados dos ensaios de caracterização mecânica da argamassa de terra.

	Resistência à flexão	Resistência à compressão
Valor médio (MPa)	0,38	0,93
CoV (%)	14,71	18,45

De acordo com a norma EN1052-1 (2001), tendo sido obtida uma resistência à compressão de 0,93MPa, a argamassa de terra pode ser classificada como uma argamassa de classe M1 de baixa resistência pois a sua resistência à compressão é inferior a 1MPa.

### 5.2.2 Argamassa de terra artificial

A dificuldade inerente à obtenção de uma quantidade de solo suficiente para a construção dos prismas e paredes a serem ensaiados no âmbito deste trabalho e, por outro lado, a importância de proceder com uma metodologia de preparação de argamassas que fosse replicável, conduziu à opção de criar uma argamassa de terra artificial com características e propriedades similares às das argamassas recolhidas *in-situ*. Para tal, a argamassa de terra artificial deve possuir granulometria e atividade semelhantes à das argamassas estudadas.

Com base nas curvas granulométricas das argamassas recolhidas *in-situ* procurou-se obter uma terra artificial com uma curva granulométrica semelhante no que concerne às suas

percentagens de constituintes. Nas curvas granulométricas das argamassas recolhidas *in-situ* os siltes são os constituintes em maior percentagem. Para a obtenção de percentagens semelhantes de siltes foi estudado um pó de calcário comercial obtendo-se a curva granulométrica apresentada na Figura 5.9. A adição do pó de calcário permitirá reproduzir uma terra artificial com percentagem de silte semelhante à observada nas curvas granulométricas das argamassas recolhidas *in-situ*.

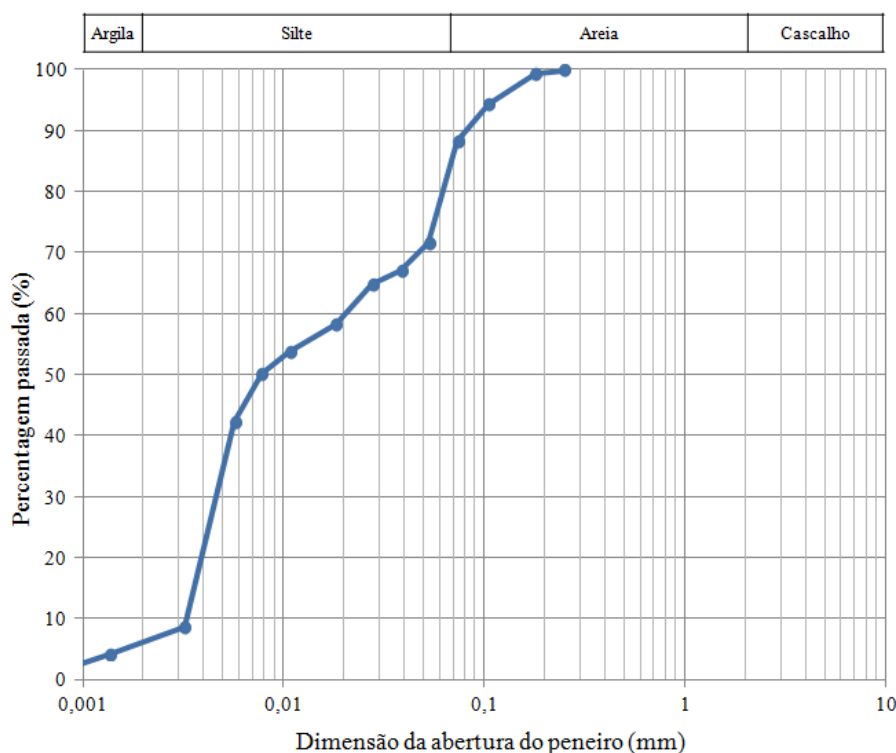


Figura 5.9 – Curva granulométrica do pó de calcário.

Como o barro é constituído apenas por partículas finas, não é necessária a realização da peneiração pois não existem frações com granulometria superior a 0,06mm. Assim sendo, optou-se pela realização do ensaio de Bouyoucos (1951), também conhecido pelo método do densímetro. O ensaio de Bouyoucos (1951) permite a realização do processo de sedimentação tradicional de uma forma mais rápida. O método consiste em correlacionar densidades, tempos de sedimentação e temperatura para obter as percentagens dos constituintes de um solo.

Com a ajuda de um densímetro são determinadas as densidades e são medidos os tempos de sedimentação e temperatura de duas soluções simultaneamente (ver Figura 5.10). Ambas as

soluções contêm 25g da amostra do barro dissolvida em 50ml de água destilada, sendo que a uma delas é adicionada também 12,5ml de NaOH 1N.



Figura 5.10 – Soluções e densímetro na execução do ensaio de Bouyoucos.

São realizadas duas leituras na solução com NaOH 1N, uma aos quatro minutos de sedimentação correspondente aos siltes mais a argila e outra leitura após duas horas correspondente apenas à argila. Na solução sem o NaOH 1N só é realizada uma medição após duas horas de sedimentação. Em todas as medições controlou-se a densidade e a temperatura.

Os resultados obtidos para o barro ensaiado são apresentados na Tabela 5.5 e foram determinados a partir das seguintes fórmulas.

$$\% \text{ Siltes} = \frac{(1^{\text{a}} \text{ leitura corrigida} - 2^{\text{a}} \text{ leitura corrigida}) \times 50}{\text{Massa da amostra}} \quad (5.3)$$

$$\% \text{ Argila} = \frac{2^{\text{a}} \text{ leitura corrigida} \times 50}{\text{Massa da amostra}} \quad (5.4)$$

Tabela 5.5 – Resultados obtidos do ensaio de Bouyoucos.

Constituintes	% Passados (total)
Siltes	42,6
Argila	57,4

Concluiu-se no ponto anterior que a argamassa recolhida *in-situ* é uma argamassa pouco ativa no que concerne à atividade dos seus constituintes argilo-minerais. A percentagem de componente argilosa da terra artificial será obtida através da adição do barro. Considerando que o barro utilizado é constituído apenas por argila e siltes, a atividade da argamassa de terra artificial é determinada pela atividade da argila contida no barro. Para a determinação da atividade do barro foi realizado o ensaio de azul-de-metileno tendo sido obtido um MB de 18,6ml/g. O valor obtido é 42% superior ao obtido para o solo das argamassas recolhidas *in-situ*.

Para a recriação das percentagens de areias finas, médias, grossas e cascalho na constituição granulométrica da argamassa, ao pó de calcário adicionaram-se percentagens específicas de areias de diferentes granulometrias, tal como se apresenta na Tabela 5.6. A percentagem de argila foi obtida usando um barro comercial do tipo “Greslar” constituído por quartzo, mica, caulinite e microclina.

Tabela 5.6 – Percentagens de constituintes granulométricos da terra artificial (em peso).

	Constituintes				
	Barro	Pó de calcário	Areia fina	Areia média	Areia grossa
Constituintes do solo artificial (%)	22	60	5	6	7

Tal como para a argamassa de terra, a argamassa de terra artificial foi preparada em função da trabalhabilidade tendo sido obtido um teor em água médio de 27%. Elaborada a argamassa de terra artificial, com base nas composições granulométricas indicadas, foram realizados ensaios para a sua caracterização granulométrica e mecânica. Na Figura 5.11 apresenta-se a curva granulométrica obtida para a argamassa de terra artificial, sendo que as percentagens de argila e siltes foram obtidas pelo método de Bouyoucos.

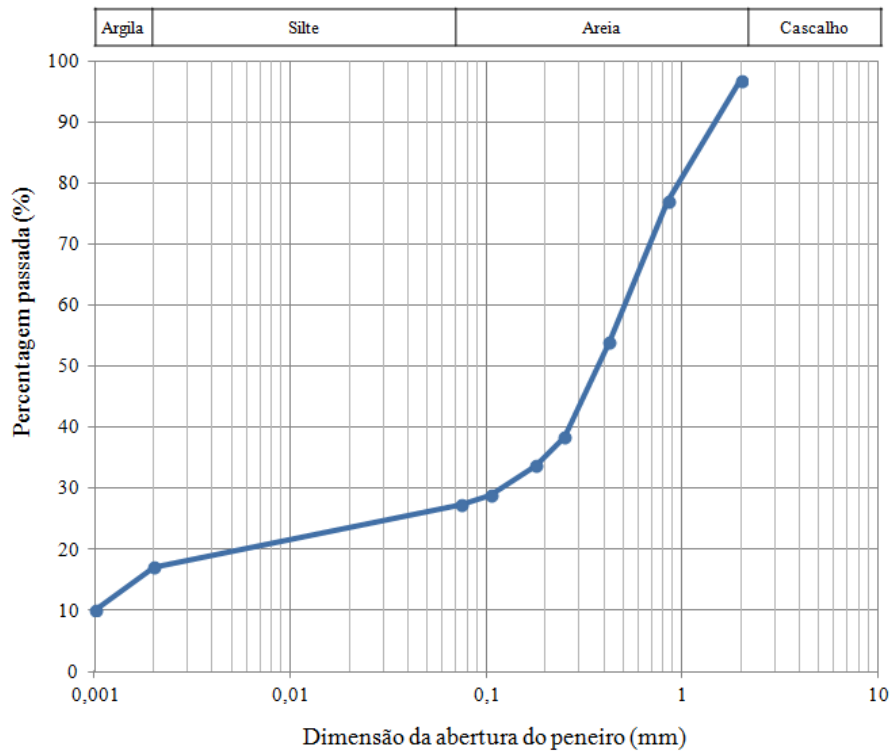


Figura 5.11 – Curva granulométrica da argamassa de terra artificial.

O comportamento mecânico destas argamassas de terra artificial foi caracterizado com recurso a ensaios de resistência à flexão (ver Figura 5.12) e à compressão axial. Foram ensaiados seis provetes de dimensões 40x40x160mm à flexão e doze provetes de secção 40x40mm à compressão axial. Na Tabela 5.7 são apresentados os resultados obtidos relativamente à resistência mecânica da argamassa de terra artificial.



Figura 5.12 – Ensaio de resistência mecânica à flexão da argamassa de terra artificial.

Tabela 5.7 – Ensaio de caracterização da argamassa de terra artificial.

	Resistência à flexão	Resistência à compressão
Valor médio (MPa)	0,58	1,15
CoV (%)	4,73	6,94

Fazendo a análise comparativa das duas argamassas, constata-se que as propriedades da argamassa de terra e da argamassa de terra artificial não diferem substancialmente. As diferenças obtidas estão essencialmente relacionadas com dois fatores, nomeadamente a variação da atividade dos constituintes argilo-minerais e a diferença na percentagem de siltes (ver Figura 5.11). Este último fator deveu-se à utilização de pó de calcário de granulometria ligeiramente superior ao utilizado no estudo da determinação dos constituintes da argamassa de terra artificial. Tal facto reflete-se essencialmente na resistência à compressão da argamassa de terra artificial.

Assim sendo, apesar das pequenas diferenças registadas entre a argamassa realizada com terra de Carrzedo de Montenegro e a argamassa de terra artificial, pode-se considerar que as propriedades mecânicas de ambas são semelhante. Este resultado suporta a opção por executar os prismas e as paredes em xisto a testar em laboratório com recurso à argamassa de terra artificial, com características semelhantes às da argamassa produzida com solo.

### **5.3 Resistência à compressão uniaxial de provetes de alvenaria de xisto**

#### **5.3.1 Preparação dos provetes**

No laboratório de estruturas da Escola de Engenharia da Universidade do Minho foram preparados doze prismas em alvenaria de xisto, para avaliação da resistência uniaxial à compressão e da evolução da sua deformação com o carregamento. Para a construção dos doze prismas foi utilizado aproximadamente 1500kg de xisto.

Os doze prismas foram preparados por dois pedreiros experientes na construção de alvenarias tradicionais de xisto. Os prismas em alvenaria de xisto foram construídos seguindo as disposições da norma EN 1052-1 (2001), com dimensões de 30x30x60cm.

Foram preparadas duas séries distintas de prismas, seis prismas com argamassa de terra proveniente de Carrzedo de Montenegro, adiante designados por PAT, e os restantes seis prismas com argamassa de terra artificial, adiante designados por PAA. As propriedades de ambas argamassas foram discutidas no ponto 5.2.

A realização de primas com estes dois tipos de argamassa, tal com discutido anteriormente, deve-se à dificuldade na obtenção de terra em quantidades suficientes para a construção de todas as paredes a ensaiar. Assim, os resultados dos ensaios de compressão sobre estas duas séries de prismas permitirão verificar se existem variações no comportamento mecânico da alvenaria devido à argamassa utilizada.



Os prismas foram preparados seguindo a prática tradicional de construção de alvenarias de xisto, através da sobreposição de pedras de xisto lascadas e intermediadas por juntas irregulares de 20mm no máximo (ver Figura 5.13). A tipologia adotada em todos os prismas, de acordo com as tipologias referidas no capítulo 3, foi uma tipologia murária de dois paramentos. Optou-se pela realização de alvenaria de dois paramentos com junta argamassada pela maior representatividade que esta tipologia tem nas construções existentes no território nacional. Os doze prismas produzidos possuem 9 a 10 fiadas de xisto e foram usados elementos de xisto com cerca de 4cm de altura e com comprimento e largura a variar entre os 10cm e 20cm.



a)



b)

Figura 5.13 – Preparação de prismas de xisto: a) Prismas com argamassa de terra; b) Prismas com argamassa artificial.

Apesar das duas séries de prismas terem sido construídas em simultâneo, todos foram ensaiados com pelo menos 3 meses de cura das argamassas.

Os prismas foram preparados sobre bases de madeira com dimensões 30x30x2cm (ver Figura 5.14). As bases de madeira serviram para o transporte dos prismas, desde o local de construção até à máquina de ensaio. O transporte foi efetuado com auxílio de um porta-paletes hidráulico, tendo sido minimizadas todas as fontes passíveis de causar dano aos provetes durante o transporte.



Figura 5.14 – Prismas de alvenaria de xisto: a) Prismas com argamassa de terra; b) Prismas com argamassa artificial.

### 5.3.2 Esquema e procedimento de ensaio

O ensaio mecânico de compressão axial foi executado de acordo com a norma EN 1052-1 (2001), tendo sido usado o equipamento e esquema de ensaio apresentado na Figura 5.15. O sistema usado é constituído por um pórtico metálico de reação, um atuador com deslocamento máximo de 200mm e uma célula de carga com a capacidade máxima de 500kN.



Figura 5.15 – Esquema de ensaio adotado no ensaio de compressão axial dos prismas.

Tal como disposto na referida norma, como a superfície de contato da célula de carga era inferior à superfície de contacto do prisma foi necessário aplicar chapas metálicas com maior superfície. Foi utilizado um elemento metálico na base com área idêntica à do prisma e com uma espessura de 200mm enquanto no topo foi utilizada uma chapa com a mesma superfície do prisma com uma espessura de 100mm.

Devido à irregularidade da superfície dos prismas, procedeu-se à regularização prévia da superfície de topo dos prismas. Assim, após colocação do prisma no local de ensaio, a superfície foi nivelada com um cimento autonivelante, procedendo-se com uma camada

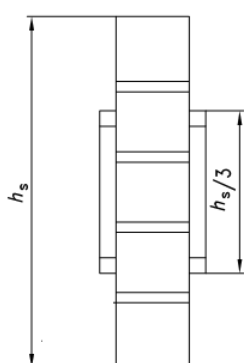
niveladora de no máximo 1cm de espessura (ver Figura 5.16). Os ensaios de compressão foram realizados aproximadamente 12 horas após a nivelação da superfície dos prismas.



Figura 5.16 – Prisma com superfície nivelada.

O ensaio de compressão axial foi realizado em controlo de deslocamento com uma velocidade constante de  $10\mu\text{m/s}$ . Foram medidas as deformações verticais nas quatro faces dos prismas através de transdutores de deslocamento colocados na superfície de cada face dos prismas com recurso a chapas metálicas.

A irregularidade das faces dos prismas de alvenaria de xisto dificultou a fixação das chapas. Perante esta situação, para garantir uma adequada fixação fez-se sempre a ligação das chapas metálicas aos elementos pétreos, e nunca nas juntas de argamassa. Tal situação fez com que a disposição dos transdutores de deslocamento não fosse rigorosamente a mesma em todas as faces e em todos os prismas. Apesar deste facto, foram cumpridas as disposições da norma EN 1052-1 de 2001, que define o distanciamento de um terço da altura do prisma entre duas chapas metálicas, tal como se pode observar na Figura 5.17 onde  $h_s$  é a altura total do prisma.



a)



b)

Figura 5.17 – Medição dos deslocamentos: a) Distanciamento entre pontos de medição (adaptado de EN 1052-1); b) Chapas de fixação e transdutores numa face do prisma.

Todos os ensaios foram realizados até ao colapso iminente dos prismas. A carga registada no final de todos os ensaios foi sempre inferior a 25% da capacidade máxima dos mesmos, tendo sido assim registado o comportamento pós-pico. Os deslocamentos foram registados até ao final do ensaio, sendo que se verificaram em algumas situações o destacamento de transdutores de deslocamento antes da conclusão do ensaio.

### 5.3.3 Resultados dos ensaios

Na Tabela 5.8 são apresentados os resultados dos ensaios de compressão axial dos prismas de alvenaria de xisto com argamassa de terra de Carrazedo de Montenegro. Os valores de resistência apresentados correspondem aos valores máximos obtidos no ensaio. Para o cálculo do módulo de elasticidade foi utilizada a formulação estabelecida pela norma EN 1052-1 (2001).

$$E = \frac{F_{i,max}}{3 \times \varepsilon_i \times A_i} \quad (5.5)$$

onde,  $E$  é o módulo de elasticidade em MPa,  $F_{i,max}$  a força máxima obtida no ensaio,  $\varepsilon_i$  a extensão e  $A_i$  a área da seção do prisma.

Tabela 5.8 – Resultados dos ensaios dos prismas com argamassa de terra recolhida *in-situ*.

Prismas	Resistência (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
PAT1	3,02	155,73
PAT2	4,01	208,51
PAT3	3,75	137,01
PAT4	3,52	47,84
PAT5	3,57	152,80
PAT6	3,94	159,97
Média	3,76	164,57
CoV (%)	5,72	130,34

Dos resultados obtidos nos seis prismas ensaiados não se registou grande dispersão de valores com exceção do prisma PAT1, que no que concerne à resistência mecânica apresentou um resultado divergente dos restantes. O resultado obtido deveu-se muito provavelmente a dano introduzido durante a preparação do provete para ensaio. Faz-se notar que este foi o primeiro provete a ser ensaiado. Como este resultado desvia-se significativamente dos restantes resultados obtidos, podendo ser considerado um “outlier” de acordo com a norma ASTM E178, este não foi considerado para a análise. Por outro lado, regista-se uma elevada variabilidade nos valores obtidos no módulo de elasticidade. Assim sendo, nos ensaios de determinação da resistência mecânica à compressão de prismas de alvenaria de xisto com argamassa de terra, foi obtida uma resistência média à compressão de 3,76MPa e um módulo de elasticidade médio de 164,57MPa.

Na Tabela 5.9 são apresentados os resultados dos ensaios de compressão axial realizados aos provetes de alvenaria de xisto realizados com argamassa de terra artificial. Nesta série de ensaios, o prisma PAA2 exibiu um resultado em termos de resistência bastante distinto dos restantes, tendo-se optado por excluí-lo de acordo com a norma ASTM E178.

Tabela 5.9 – Resultados dos ensaios dos prismas com argamassa de terra artificial.

Prismas	Resistência (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
PAA1	4,20	204,54
PAA2	2,87	428,86
PAA3	3,80	325,10
PAA4	4,26	549,92
PAA5	3,69	432,11
PAA6	3,47	299,33
Média	3,88	373,31
CoV (%)	8,71	36,60

Os provetes de alvenaria de xisto com argamassa de terra artificial apresentaram uma reduzida dispersão nos resultados obtidos. No que concerne ao módulo de elasticidade, comparativamente com o verificado nos prismas PAT, regista-se uma variação menor de apenas 36,60%. Assim sendo na determinação da resistência mecânica dos prismas de

alvenaria de xisto com argamassa artificial foi obtida uma resistência média à compressão de 3,88MPa e um módulo de elasticidade médio de 362,20MPa.

Na Figura 5.18 apresentam-se os gráficos tensão-extensão para todos os prismas ensaiados.

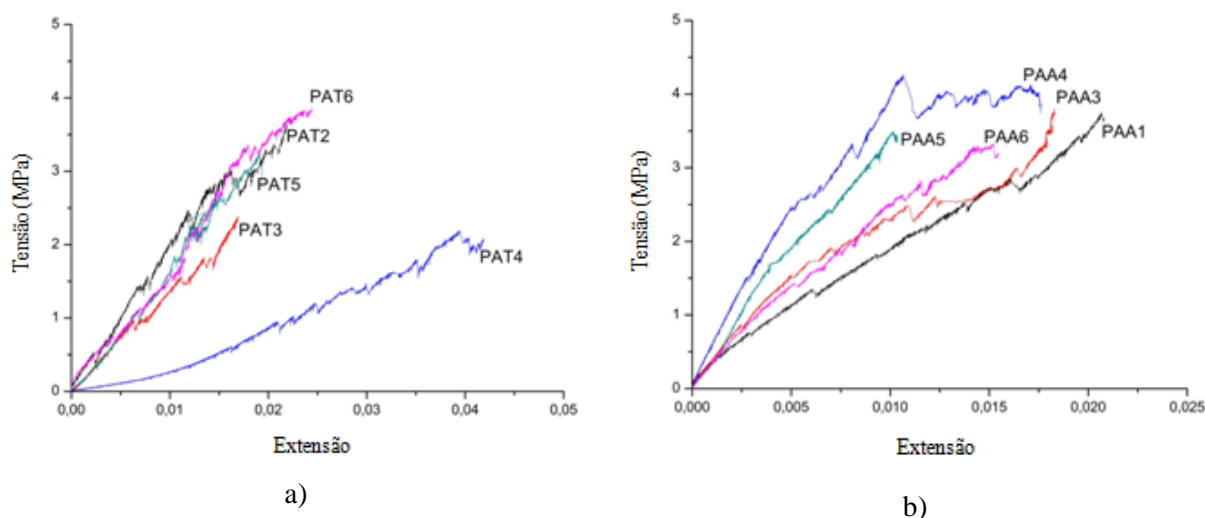


Figura 5.18 – Curvas tensão-extensão axial dos ensaios de compressão uniaxial para: a) Prismas com argamassa de terra; b) Prismas com argamassa de terra artificial.

Da análise dos gráficos anteriores observa-se que o comportamento mecânico dos prismas ensaiados, considerando a resistência à compressão uniaxial e as curvas tensão-deformação, é muito semelhante com a exceção do prisma PAT4. Devido ao destacamento dos lvdt's na execução do ensaio não foi possível obter as curvas tensão-extensão no pós-pico.

### 5.3.4 Modos de rotura

Durante os ensaios de compressão uniaxial o primeiro dano observado é o esmagamento e destacamento da argamassa de junta. Este fenómeno leva a que a alvenaria procure novas condições de equilíbrio antes de ocorrer a rotura dos elementos pétreos ou mesmo da totalidade do prisma de alvenaria. A rotura dos elementos de xisto conduz à rotura global do prisma caracterizada por fendilhação predominantemente vertical em duas faces do prisma.

A rotura global observada é característica dos ensaios de compressão e apresenta-se com linhas de fendilhação vertical paralelas em duas faces opostas do prisma. Na Figura 5.19 apresenta-se, a título de exemplo, o padrão de fissuração de um prisma realizado com argamassa de terra (PAT) e de um prisma realizado com argamassa de terra artificial (PAA).



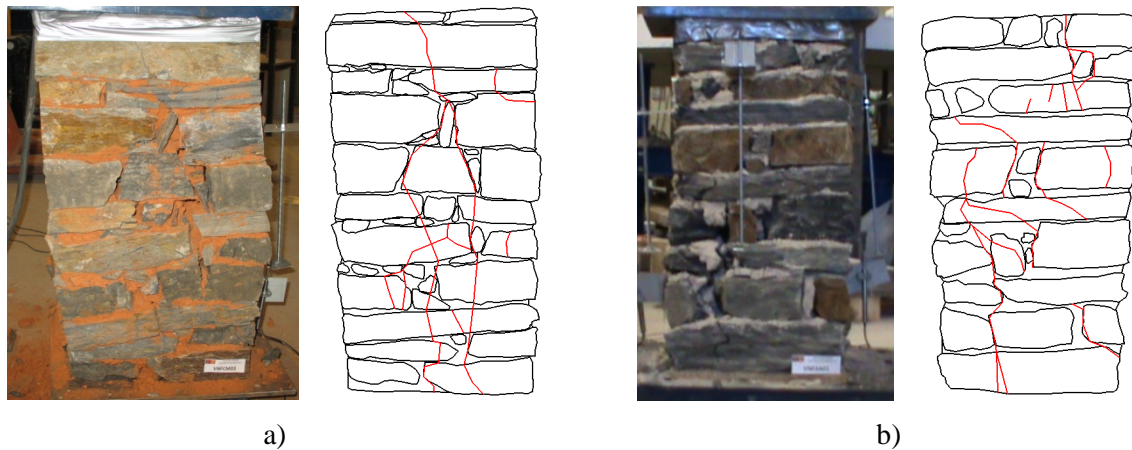


Figura 5.19 – Padrão típico de fissuração de prismas ensaiados em compressão axial: a) Prismas com argamassa de terra; b) Prismas com argamassa de terra artificial.

### 5.3.5 Análise comparativa

Da análise e comparação de resultados obtidos pretende-se em primeiro plano interpretar as resistências à compressão axial da alvenaria tradicional de xisto. Em segundo plano, relativamente aos prismas de alvenaria de xisto, pretende-se avaliar a influência na variação entre argamassa de terra e argamassa de terra artificial.

Na Tabela 5.10 apresentam-se os resultados médios obtidos nos prismas realizados com argamassa de terra e prismas realizados com argamassa de terra artificial.

Tabela 5.10 – Comparação de resultados médios obtidos nos prismas realizados com argamassa de terra e prismas realizados com argamassa de terra artificial.

Prismas	Resistência (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
PAT	3,76	164,57
PAA	3,88	373,31

Na Figura 5.20 é possível observar a envolvente das tensões-extensões obtidas para as duas séries de prismas, PAT e PAA.

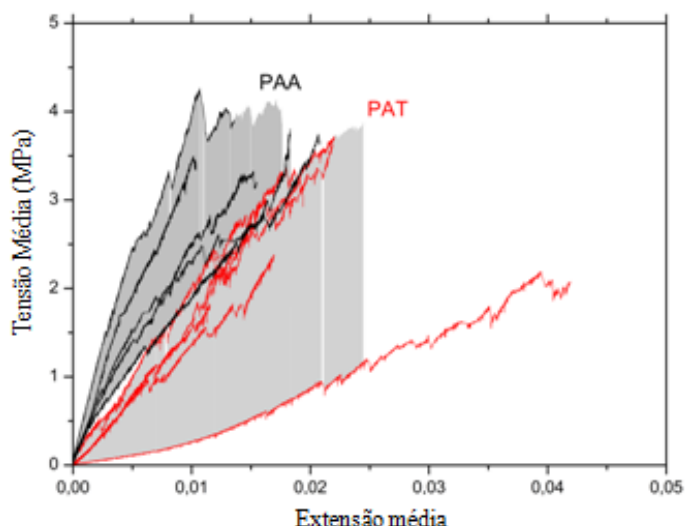


Figura 5.20 – Envolvente das tensões-extensões da alvenaria de xisto sujeita a compressão axial.

Observa-se que não se registam grandes diferenças entre os prismas PAT e PAA, sendo possível concluir que não há variações significativas na resistência à compressão da alvenaria tradicional de xisto considerando a variação do tipo de argamassa (diferença de apenas 3%). No entanto, no que concerne ao módulo de elasticidade, observam-se algumas diferenças. O valor médio registado pelos prismas PAT é cerca de 56% inferior ao dos prismas PAA. Assim sendo, conclui-se que, apesar de não serem registadas variações significativas na resistência à compressão entre provetes com argamassa de terra e provetes com argamassa de terra artificial, a argamassa de terra artificial parece aumentar a deformabilidade dos provetes.

Comparativamente com os valores médios da resistência à compressão e módulo de elasticidade das alvenarias mais comuns em Portugal (ver Tabela 5.11) a alvenaria de xisto possui resistência à compressão superior à das alvenarias de adobe e taipa, no entanto é menos resistente que as alvenarias de calcário e de granito. No que concerne ao módulo de elasticidade, os valores obtidos na alvenaria de xisto são aproximados dos valores da alvenaria de adobe e menor que as restantes alvenaria apresentadas.

Tabela 5.11 – Resultados da resistência à compressão axial de diferentes tipos de alvenarias.

Tipo de alvenaria	Resistência (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
Alvenaria de calcário <sup>1</sup>	8,0	1640,0
Alvenaria de granito <sup>2</sup>	48,9	7490,6
Alvenaria de adobe <sup>3</sup>	0,3	113,0
Alvenaria de taipa <sup>4</sup>	1,3	1034,0

<sup>1</sup>Milosevic *et al.* (2013), <sup>2</sup>Vasconcelos (2005), <sup>3</sup>Varum *et al.* (2011), <sup>4</sup>Silva *et al.* (2013).



## **5.4 Resistência à compressão diagonal em alvenaria de xisto**

No âmbito da avaliação do comportamento mecânico da alvenaria de xisto estavam inicialmente previstos ensaios monotônicos e cíclicos em paredes de alvenaria de xisto sob a ação combinada de ações de compressão perpendicular às juntas de argamassa constantes e ações de corte cíclicas aplicadas no plano da parede. Com este tipo de ensaios pretendia-se efetuar a avaliação do comportamento sísmico de paredes de alvenaria de xisto. Pretendia-se também a realização de ensaios biaxiais. O principal fator tido em consideração na opção de realização ensaios de compressão diagonal foi a sensibilidade das paredes de xisto às movimentações. Assim sendo, optou-se pela realização de ensaios de compressão diagonal realizados no próprio local de construção das paredes. Neste ponto apresenta-se a construção de paredes de alvenaria e a preparação do esquema de ensaio de compressão diagonal adotado. Com o intuito de melhorar o comportamento mecânico, são propostas duas metodologias de reforço. São apresentados os resultados e respetiva análise dos ensaios de compressão diagonal realizados às paredes de alvenaria de xisto não reforçadas e paredes de alvenaria de xisto reforçadas pelas duas propostas de reforço.

### **5.4.1 Preparação das paredes**

Para a caracterização do comportamento mecânico das paredes de alvenaria de xisto à compressão diagonal foram preparadas no laboratório de estruturas da Escola de Engenharia da Universidade do Minho oito paredes de alvenaria tradicional de xisto. A norma LUMB6 e, especificamente, a norma ASTM E519-02 sugerem que, para a realização de ensaios de compressão diagonal, sejam utilizadas paredes com 120x120cm, no entanto, por facilidade de execução em laboratório, optou-se pela construção de paredes com dimensões 30x80x80cm.

Tal como sucedido na preparação dos prismas, perante os resultados obtidos na caracterização das pedras de xisto oriundas de vários locais do território nacional, todas as paredes foram realizadas com recurso a xisto proveniente de Vila Nova de Foz Côa (ver Figura 5.21). O xisto utilizado, tal como na preparação dos prismas, encontrava-se em estado bruto, sendo necessário trabalhá-lo na preparação das paredes. Para a totalidade das oito paredes foi utilizado aproximadamente 4500kg de xisto.



Figura 5.21 – Xisto utilizado na construção das paredes de alvenaria.

Perante os resultados obtidos nos ensaios mecânicos de compressão axial dos prismas, que evidenciaram que não existe diferença significativa em termos mecânicos entre a utilização da argamassa de terra ou da argamassa de terra artificial, e dada a facilidade na obtenção dos constituintes e preparação da argamassa de terra artificial, em todas as paredes foi aplicado como ligante a argamassa de terra artificial descrita no ponto 5.2.

Como não seria viável o transporte das paredes de xisto, tal como referido anteriormente, os ensaios de compressão diagonal foram realizados no próprio local de construção das paredes. Considerando o esquema de ensaio utilizado, que se explica pormenorizadamente no ponto seguinte, foi necessário construir as paredes sobre vigas de madeira. A construção das paredes foi efetuada pela mesma equipa de pedreiros (dois pedreiros e um ajudante) que construiu os prismas, sendo assim possível minimizar as possíveis variáveis e diferenças associadas ao processo construtivo.

Tal como para os prismas, as paredes foram construídas pela metodologia tradicional de construção de alvenarias de xisto, através da sobreposição de pedras de xisto lascadas no local e intermediadas por juntas irregulares de argamassa com 20mm no máximo (ver Figura 5.22). As paredes de alvenaria de xisto foram realizadas com dois paramentos. Dada heterogeneidade de dimensões das pedras de xisto, as paredes foram realizadas com 9 a 11 fiadas de xisto e com elementos de xisto com dimensões entre os 4cm e os 7cm de altura.

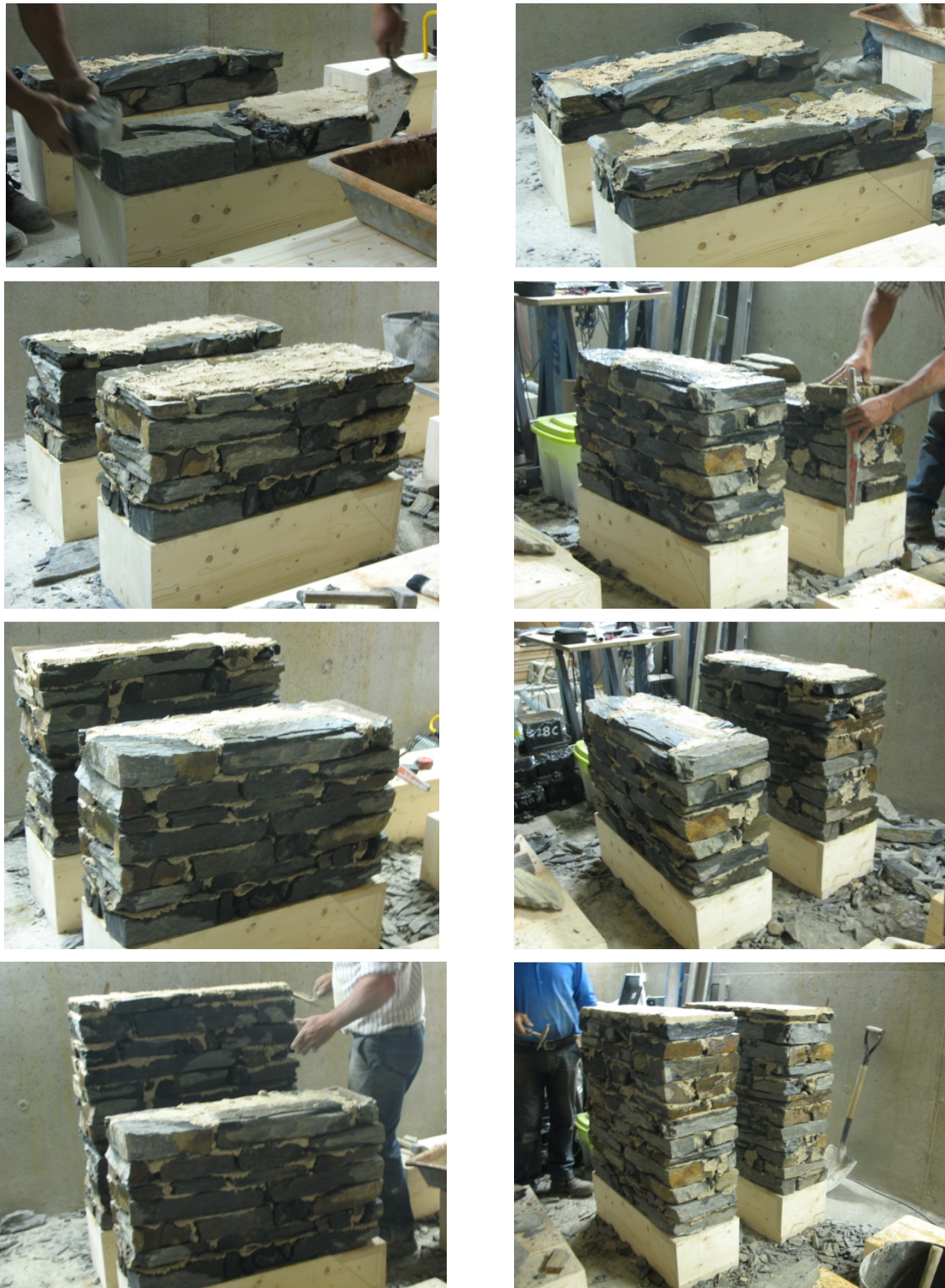


Figura 5.22 – Construção das paredes de alvenaria de xisto.

Na construção das paredes procurou-se que na base fossem utilizados elementos mais alongados, principalmente na zona onde seria efetuado o contato entre a parede e as cunhas do equipamento de ensaio (ver Figura 5.23). O mesmo foi realizado na extremidade superior

oposta. Desta forma pretende-se minimizar a rotura localizada das paredes nestas zonas durante preparação e realização do ensaio.



Figura 5.23 – Paredes concluídas.

Em termos de rendimento, na preparação das paredes, com a equipa de dois pedreiros e um ajudante, em média foram necessárias 1,5 horas por parede, o que se traduz em aproximadamente 2,3 horas por  $m^2$  de parede de alvenaria em xisto de dois paramentos.

#### 5.4.2 Esquema e procedimento de ensaio

Para a realização do ensaio de resistência à compressão diagonal foi projetado e desenvolvido um esquema de ensaio específico para as paredes de alvenaria de xisto em estudo. Apesar do ensaio ser realizado em laboratório, como não foi possível a deslocação das paredes, o procedimento de ensaio de compressão diagonal a ser aplicado foi idêntico ao procedimento já seguido anteriormente por outros autores no ensaio *in-situ* de paredes existentes (Chriostrini *et al.* (2000), Brignola *et al.* (2008), Calderini (2009), Valluzzi *et al.* (2002), Corradi *et al.* (2010), Borri *et al.* (2011)).

Desta forma, o esquema de ensaio utilizado é constituído por duas cunhas metálicas, quatro varões de pré-esforço de 3cm de diâmetro e respetivos conectores, duas chapas metálicas e uma célula de carga com capacidade máxima de 200kN. Na Figura 5.24 apresenta-se o esquema de ensaio de compressão diagonal adotado.





Figura 5.24 – Esquema de ensaio para determinação da resistência à compressão diagonal das paredes.

A base de madeira sobre a qual se apoiam as paredes foi dimensionada de maneira a que fosse possível o destaque de um dos seus cantos (ver Figura 5.25) para posterior encaixe da cunha inferior do dispositivo de ensaio, tal como se apresenta na Figura 5.24.

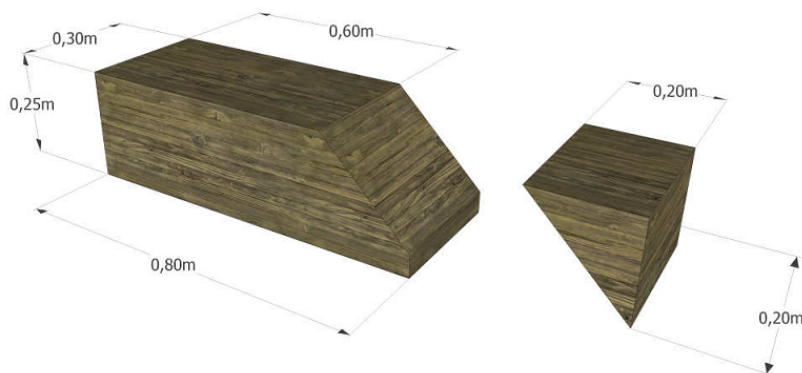


Figura 5.25 – Base de madeira de suporte das paredes com peça destacável para encaixe da cunha do dispositivo de ensaio.

As zonas de encaixe das cunhas, em dois cantos opostos das paredes, um superior e um inferior, foram regularizadas antes da montagem do dispositivo de ensaio. Para a regularização foi usado um cimento de cura rápida, tipo “Prompt”, sendo que os ensaios de compressão diagonal foram realizados aproximadamente 24 horas após a regularização. A superfície de contacto entre as cunhas e as paredes é de 10cm em cada face (altura e largura) (ver Figura 5.26).

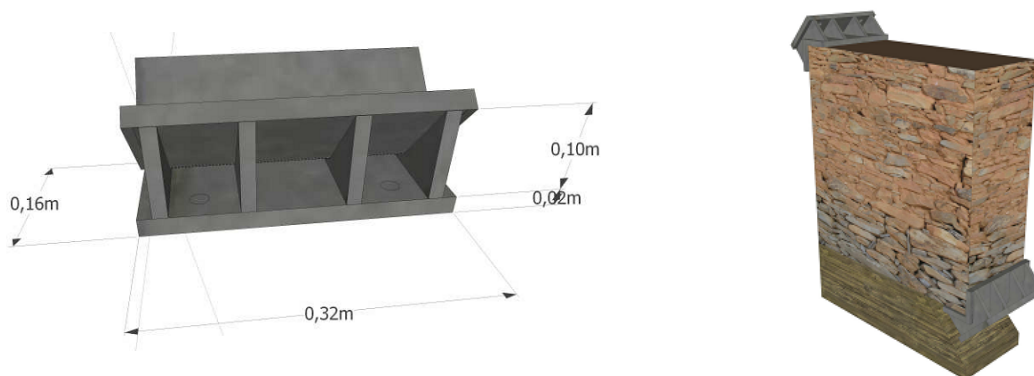


Figura 5.26 – Cunhas: detalhes, dimensões e ligação às paredes.

Todas as paredes foram ensaiadas após três meses de cura das argamassas. O ensaio de compressão diagonal foi realizado em controlo de deslocamentos com uma velocidade constante de  $5\mu\text{m/s}$ . Os deslocamentos foram registados por quatro transdutores de deslocamento (LVDT's). Foram medidos os deslocamentos nas duas diagonais (de compressão e de tração) de cada face das paredes. Para tal foram fixados os LVDT's na superfície de cada face das paredes com recurso a chapas metálicas, como se exemplifica no esquema da Figura 5.27, onde  $h$  é a altura da parede e  $L$  é o comprimento da parede.

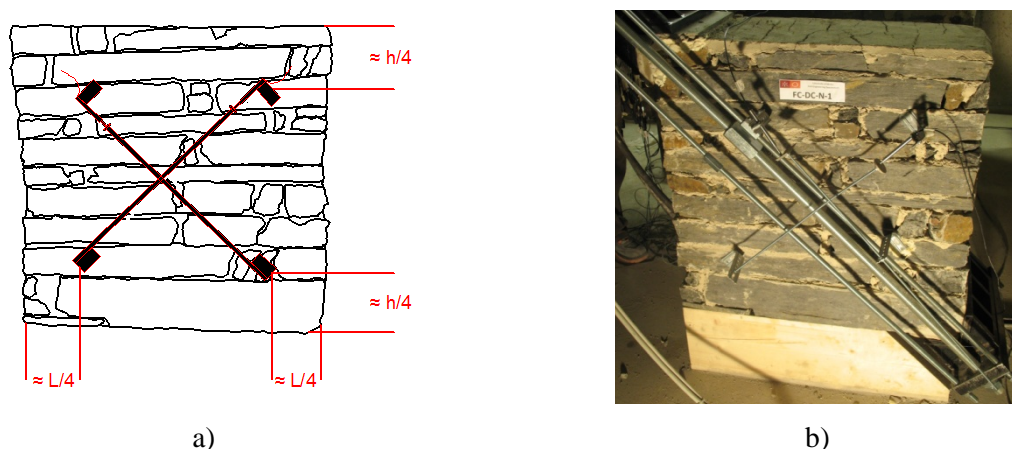


Figura 5.27 – Ensaio de compressão diagonal: a) Esquema de disposição dos transdutores de deslocamento; b) Transdutores de deslocamento fixos na parede.

Tal como sucedido com os prismas, a irregularidade das faces das paredes de alvenaria de xisto condicionou o posicionamento dos pontos de fixação das chapas de apoio dos sensores. De facto, para garantir melhores condições de aderência, foi necessário fixar as chapas metálicas apenas nos elementos pétreos, e nunca na argamassa de junta. Tal fez com que a disposição dos transdutores de deslocamento não fosse exatamente a mesma em ambas as faces de cada parede e em todas as paredes. Todos os ensaios foram realizados até o colapso

iminente das paredes. A carga registada no final de todos os ensaios foi sempre menor que 50% da carga máxima, tendo sido registado assim o comportamento pós-pico (ver Figura 5.28).

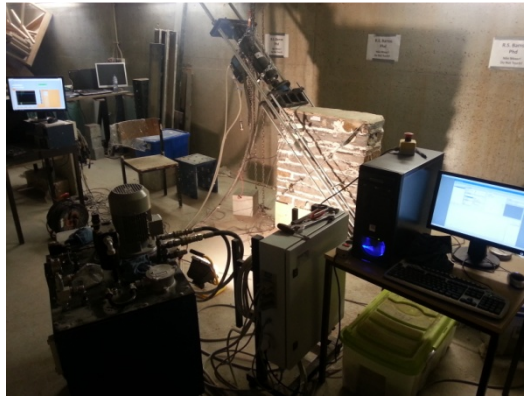


Figura 5.28 – Ensaio de compressão diagonal.

### 5.4.3 Resultados das paredes não reforçadas

Na Tabela 5.12 apresenta-se a resistência ao corte e o módulo de distorção, calculados de acordo com a norma ASTM E519-02, obtidos nos ensaios de compressão diagonal das paredes de alvenaria de xisto não reforçadas, designadas por NR.

Tabela 5.12 – Resultados dos ensaios sobre as paredes de xisto não reforçadas.

Paredes	Resistência ao corte (MPa)	Módulo de distorção (MPa)
NR1	0,017	4,27
NR2	0,044	79,02
NR3	0,020	14,21
Média	0,027	32,50
CoV (%)	55,15	124,90

Dos resultados obtidos nas paredes não reforçadas observa-se grande dispersão nos valores resistência mecânica e no módulo de dispersão. No que concerne à resistência mecânica entre as três paredes ensaiadas registou-se um coeficiente de variação de 55,15% sendo que a parede NR2 obteve uma resistência ao corte aproximadamente 100% superior à obtida nas

restantes paredes. No módulo de elasticidade foi registado um coeficiente de variação de 124,90% tendo sido novamente a parede NR2 a registar o valor mais elevado. Os ensaios de compressão diagonal realizados permitem concluir que em termos médios a alvenaria tradicional de xisto tem uma resistência ao corte de 0,03MPa e um módulo de distorção de 32,50MPa.

Na Figura 5.29 apresenta-se o gráfico tensão-extensão das paredes não reforçadas. Representa-se a evolução das extensões positivas e extensões negativas considerando respetivamente os deslocamentos das diagonais normais ( $\epsilon_n$ ) e diagonais transversais ( $\epsilon_t$ ).

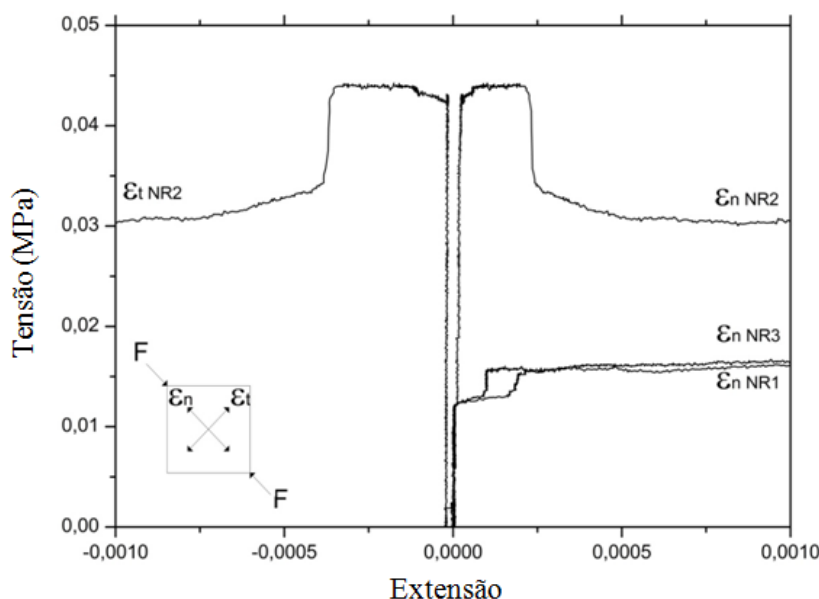


Figura 5.29 – Gráficos tensão-extensão do ensaio de compressão diagonal das paredes não reforçadas.

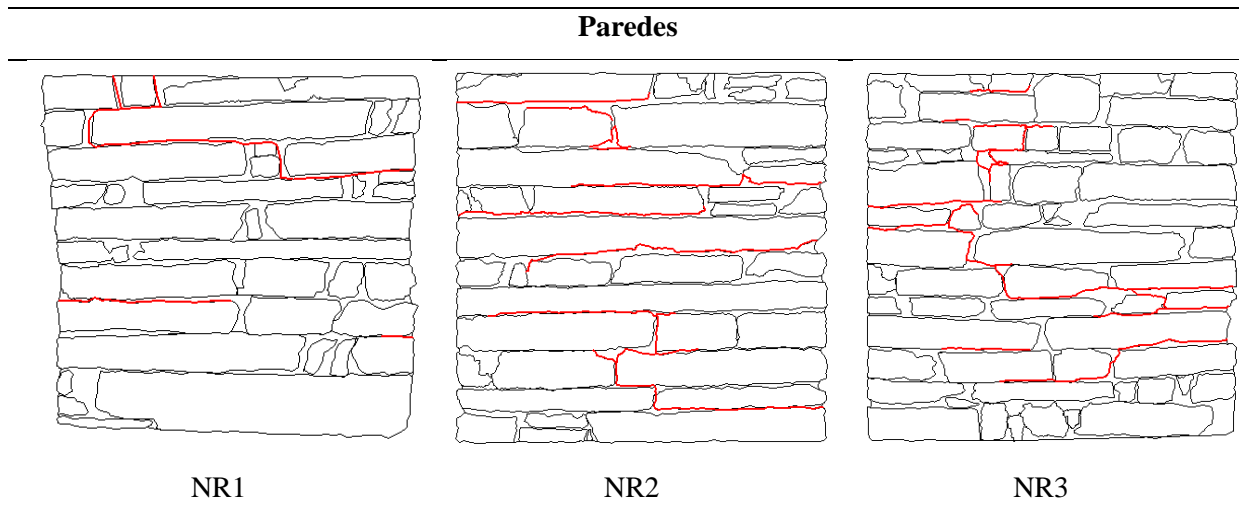
Pelo gráfico tensão-extensão observa-se que apenas a parede NR2 registou deslocamentos na direção transversal. Também é possível verificar que a parede NR2 registou deslocamentos uniformes entre as direções normais e transversais à direção da força. No que concerne ao módulo de distorção verifica-se a menor deformabilidade da parede NR2 comparativamente às paredes NR1 e NR3.

Na Tabela 5.13 apresenta-se o padrão de fissuração das três paredes ensaiadas. Observa-se que a parede NR2 foi a parede que obteve uma distribuição uniforme das fissuras, predominando uma direção de fissura diagonal principal paralela à direção de aplicação da carga no ensaio. Nas paredes NR1 e NR3 observa-se uma maior predominância de fissuras horizontais nas zonas superiores e inferiores das paredes, e ausência de fissuras na zona central das paredes. É importante referir que, contrariamente ao ocorrido nos ensaios de



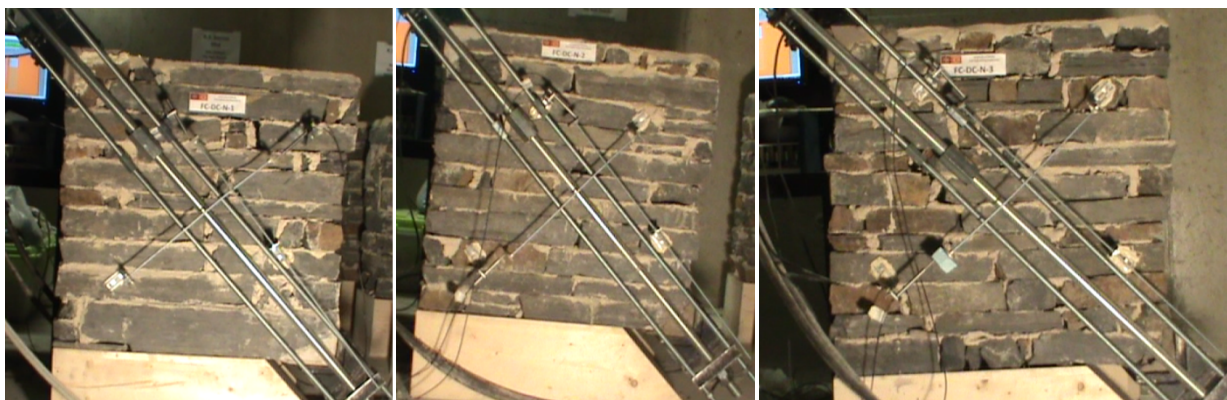
compressão axial, nos ensaios de compressão diagonal não se regista a rotura dos elementos pétreos devido ao modo de rotura ser controlado pelas juntas e não pelas pedras. De facto, as forças máximas aplicadas são muito inferiores às aplicadas nos ensaios de compressão axial.

Tabela 5.13 – Padrão de fissuração das paredes não reforçadas ensaiadas em compressão diagonal.



Um aspeto importante na análise dos resultados das paredes ensaiadas relaciona-se com o aparelho usado. Denota-se que a parede NR2 possui elementos pétreos de maior dimensão que atravessam a zona central da parede comparativamente com os elementos pétreos das paredes NR1 e NR3. Tal facto reflete-se diretamente nas diferenças entre os resultados obtidos para a resistência ao corte e módulo de distorção das três paredes ensaiadas.

Um dos principais fatores para a rotura das paredes é o deslizamento entre juntas. Na Figura 5.30 é possível observar o deslizamento horizontal relativo entre blocos de fiadas consecutivas de xisto. Na parede NR1 o deslizamento verifica-se ao nível da terceira fiada superior de xisto, enquanto na parede NR3 o deslizamento horizontal regista-se ao nível da sétima fiada superior.



a)

b)

c)

Figura 5.30 – Estado final dos ensaios de resistência à compressão diagonal em paredes não reforçadas; a) NR1; b) NR2; c) NR3.

Comparativamente com a resistência ao corte e com módulo de distorção das alvenarias mais comuns em Portugal (ver Tabela 5.14), a alvenaria de xisto possui resistência ao corte semelhante às alvenarias de adobe, sendo menos resistente ao corte do que as restantes alvenarias. O mesmo sucede com o módulo de distorção, registando valores aproximados aos valores da alvenaria de adobe e menores que as restantes alvenaria apresentadas.

Tabela 5.14 – Resultados da compressão diagonal de diferentes tipos de alvenarias.

Tipo de alvenaria	Resistência ao corte (MPa)	Módulo de distorção (MPa)
Alvenaria de calcário <sup>1</sup>	0,15	198,0
Alvenaria de adobe <sup>2</sup>	0,03	50,0
Alvenaria de taipa <sup>3</sup>	0,15	570,0

<sup>1</sup>Milosevic *et al.* (2013), <sup>2</sup>Varum *et al.* (2011), <sup>3</sup>Silva *et al.* (2013).

#### 5.4.4 Metodologias de reforço adotadas

Com base no comportamento da alvenaria de xisto estudada nos ensaios de compressão axial e compressão diagonal, foram estudadas e testadas duas propostas de reforço possíveis para as construções tradicionais de alvenaria em xisto. As metodologias de reforço propostas procuram integrar as características particulares da alvenaria tradicional de xisto, nomeadamente a argamassa de baixa resistência, a tipologia do paramento murário, a malha irregular de pequenos elementos pétreos e as propriedades do xisto.

Dadas as características típicas das estruturas tradicionais de alvenaria de xisto, nomeadamente a pedra à vista sem reboco, é essencial a implementação de metodologias de reforço pouco intrusivas. Esta condição eleva o grau de exigência e dificuldade no reforço das

paredes de alvenaria. Desta forma, foram estudadas duas metodologias de reforço pouco intrusivas.

Uma das propostas de reforço passa pelo preenchimento das juntas com uma argamassa de resistência superior às resistências características das argamassas tradicionais. Trata-se de uma metodologia já bastante difundida no reforço de construções antigas de alvenaria. Borri *et al.* (2009) refere que a técnica de preenchimento de juntas consiste na decapagem das juntas da alvenaria removendo a argamassa de fraca qualidade e preenchendo as juntas com uma argamassa de melhor qualidade.

Neste estudo foram reforçadas duas paredes com a metodologia de preenchimento de junta. Iniciaram-se os trabalhos de reforço quando as paredes atingiram três meses de maturação iniciando-se o procedimento com a remoção da argamassa original em ambas as faces até o máximo de 30mm de profundidade. Concluída a remoção da argamassa original, esta zona das juntas foi limpa de elementos soltos e humedecida antes do preenchimento com a nova argamassa.

No estudo foi utilizada a argamassa “Albaria Struttura” da BASF. Trata-se de uma argamassa comercial de alta resistência, sem cimento e pré-doseada. Segundo o fabricante, a argamassa é confeccionada com agregados de sílica natural com um diâmetro máximo de 2mm e garante uma resistência à compressão superior a 15MPa, sendo classificada como uma argamassa para alvenarias do tipo M15 segundo a norma europeia EN 998-2.

Para além das elevadas prestações desta argamassa, entre outras propriedades, realçam-se a elevada aderência à alvenaria, a baixa absorção capilar e a elevada permeabilidade ao vapor de água. Estas propriedades são essenciais para a manutenção do funcionamento adequado deste tipo de alvenarias, nomeadamente no que concerne a limitar a entrada de água por capilaridade.

Procedeu-se com o preenchimento das juntas de cima para baixo, como se apresenta na Figura 5.31, preenchendo-se em ambas as faces todas as juntas até à profundidade de 30mm.



Figura 5.31 – Diferentes fases do processo de preenchimento de junta: a) Argamassa removida; b) Preenchimento das juntas de metade da parede; c) Preenchimento das juntas de toda a parede.

A segunda proposta de reforço que se estudou nesta campanha de ensaios consiste em integrar elementos metálicos nas juntas horizontais no decorrer do processo de preenchimento da junta anteriormente descrito. Esta metodologia de reforço foi aplicada em três paredes quando estas atingiram três meses de cura das argamassas originais. Em cada face da parede foram inseridos dois cordões metálicos, a um quarto e a três quartos da altura da parede, tal como se apresenta na Figura 5.32 onde  $h$  é a altura da parede.

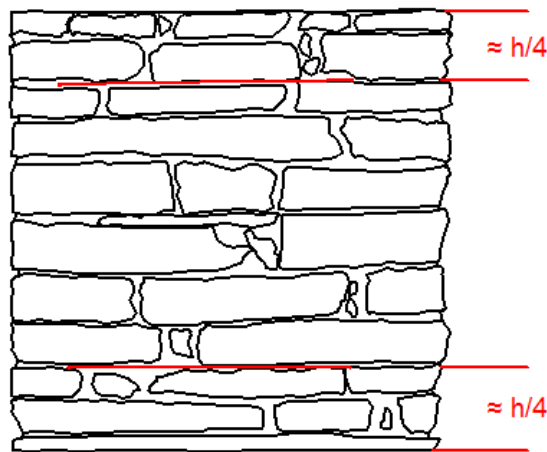


Figura 5.32 – Localização dos cordões metálicos de reforço da parede.

Os cordões metálicos utilizados resultam do destacamento de cordões de fibras de aço unidirecionais da marca Hardwire, normalmente utilizadas no reforço de estruturas (ver Figura 5.33). Cada cordão tem uma área de  $0,481\text{mm}^2$  e é constituído por cinco filamentos, em que três desses filamentos encontram-se esticados e os outros dois filamentos são torcidos

em torno dos três filamentos esticados. De acordo com a ficha técnica da Hardwire cada cordão resiste a uma carga máxima de 1,48kN.



Figura 5.33 – Fibras de aço da Hardwire: a) Fibras de aço usadas; b) Cordão metálico extraído.

Para se obter um melhor comportamento do reforço, foram inseridos quatro varões roscados em cada parede. Cada varão foi inserido numa das extremidades das juntas onde se encontram integrados os cordões. Os varões atravessam toda a parede na sua espessura fixando os cordões nas duas faces. Os varões roscados são de aço galvanizado de 2mm de diâmetro e os cordões metálicos foram conectadas aos varões à profundidade de 30mm através de uma rosca, tal como se apresenta na Figura 5.34.



Figura 5.34 – Conexão entre varões roscados e cordões metálicos.

Após a remoção da argamassa original em ambas as faces das paredes, foram efetuadas quatro perfurações, duas em cada junta onde se pretendiam inserir os cordões. As perfurações foram efetuadas a uma distância de aproximadamente um quarto do comprimento de cada parede tal como se apresenta na Figura 5.32. Para a perfuração foi usada uma broca de 40mm de diâmetro que permitiu atravessar toda a espessura da parede.



Após efetuada a perfuração foram colocados os varões e atados os cordões metálicos. Posteriormente, os cordões de ambas as faces foram apertados com roscas até atingir a disposição final a 30mm de profundidade da junta. No final do procedimento de reforço foi realizado o preenchimento de todas as juntas com a argamassa “Albaria Struttura” anteriormente referida.

Após o preenchimento de todas as juntas, os varões e os cordões não deverão ficar à vista. Esta metodologia de reforço permite intervir na alvenaria de xisto de forma muito pouco intrusiva mantendo o seu aspeto original tal com se pode observar na Figura 5.35.



Figura 5.35 – Paredes de alvenaria de xisto: a) alvenaria de xisto não reforçada; b) alvenaria de xisto reforçada.

#### 5.4.5 Resultados das paredes reforçadas com preenchimento de junta

Na Tabela 5.15 apresenta-se a resistência máxima ao corte e o módulo de distorção, calculados de acordo com a norma ASTM E519-02, obtidos nos ensaios de compressão diagonal das paredes de alvenaria de xisto reforçadas com preenchimento de junta, designadas por DR.

Tabela 5.15 – Resultados das paredes reforçadas com preenchimento de junta.

Paredes	Resistência ao corte	Módulo de distorção
	(MPa)	(MPa)
DR1	0,062	18,35
DR2	0,064	52,70
Média	0,063	35,52
Cov (%)	2,97	68,37

Dos resultados obtidos nas paredes reforçadas com preenchimento de junta observa-se baixa dispersão dos valores da resistência mecânica obtendo-se um coeficiente de variação de apenas de 2,97%. Por outro lado, foi obtido um coeficiente de variação de 68,37% para o módulo de distorção. Os ensaios de compressão diagonal realizados permitem concluir que em termos médios a alvenaria tradicional de xisto reforçada com recurso ao preenchimento de junta tem uma resistência ao corte de 0,06MPa e um módulo de distorção de 35,52MPa.

Na Figura 5.36 apresenta-se o gráfico tensão-extensão das paredes reforçadas com preenchimento de junta. Representa-se a evolução das extensões positivas e extensões negativas considerando respetivamente os deslocamentos das diagonais normais ( $\epsilon_n$ ) e diagonais transversais ( $\epsilon_t$ ).

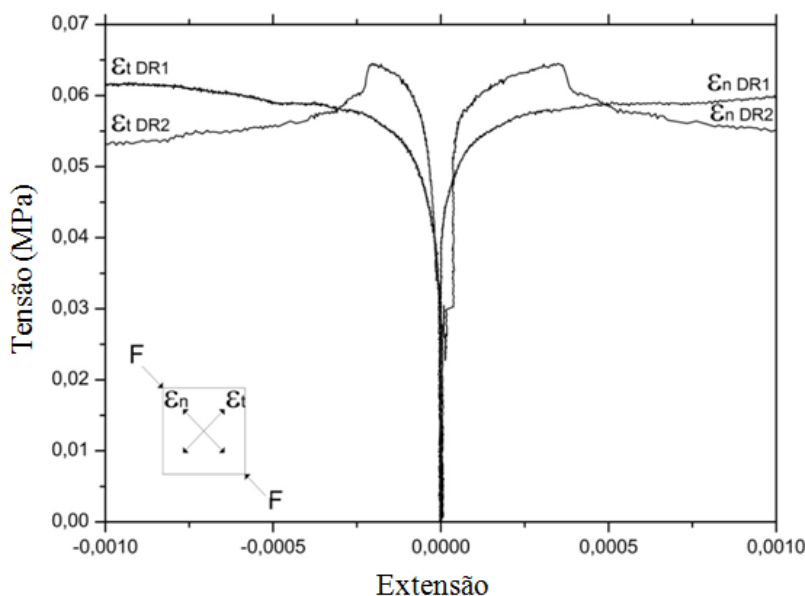
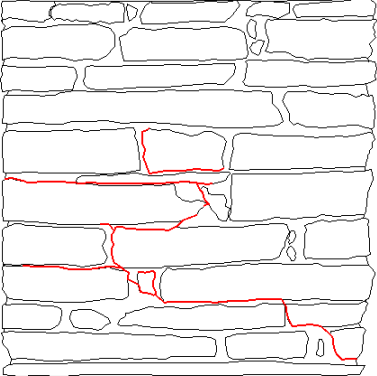
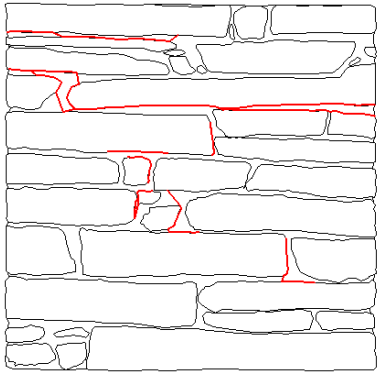


Figura 5.36 – Gráficos tensão-extensão do ensaio de compressão diagonal das paredes reforçadas com preenchimento de junta.

Pelo gráfico tensão-extensão observa-se que ambas as paredes registaram deslocamentos nas duas direções, normal e transversal à direção da força. No que concerne ao módulo de distorção verifica-se a menor deformabilidade da parede DR2 comparativamente à parede DR1.

Na Tabela 5.16 apresenta-se o padrão de fissuração das duas paredes ensaiadas. Denota-se uma rotura predominantemente na diagonal, paralela à direção de aplicação da força de compressão no ensaio. Na parede DR1 a diagonal encontra-se na zona inferior da parede enquanto na parede DR2 a diagonal encontra-se na zona superior da parede.

Tabela 5.16 – Padrão de fissuração das paredes reforçadas com preenchimento de junta.

<b>Paredes</b>	
 <p>DR1</p>	 <p>DR2</p>

No que concerne ao aparelho e às respetivas dimensões dos elementos pétreo, não se verificam diferenças entre as duas paredes ensaiadas. Na Figura 5.37 apresenta-se o estado final, pós-rotura, de ambas as paredes ensaiadas. É possível observar que não ocorre uma rotura global significativa das paredes contrariamente ao que se verificou nas paredes não reforçadas. Este facto deve-se à ação agregadora da argamassa de junta usada como reforço.



a)



b)

Figura 5.37 – Estado final dos ensaios de resistência à compressão diagonal em paredes reforçadas com o preenchimento da junta; a) DR1; b) DR2.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de compressão diagonal das paredes reforçadas pela metodologia do preenchimento de junta, e considerando que os resultados obtidos são superiores aos obtidos nos ensaios para as paredes não reforçadas, constata-se que a aplicação de uma argamassa de melhor resistência no preenchimento de junta permite um incremento na



resistência mecânica da alvenaria tradicional de xisto, assim como melhora o comportamento mecânico no que concerne ao padrão de fissuração e de colapso.

#### 5.4.6 Resultados dos ensaios das paredes reforçadas com preenchimento de junta e cordões metálicos

Na Tabela 5.17 apresenta-se a resistência ao corte e o módulo de distorção, calculados de acordo com a norma ASTM E519-02, obtidos nos ensaios de compressão diagonal das paredes de alvenaria de xisto reforçadas com preenchimento de junta e cordões metálicos, designadas por DRB.

Tabela 5.17 – Resultados das paredes reforçadas com preenchimento de junta e cordões metálicos.

Paredes	Resistência ao corte (MPa)	Módulo de distorção (MPa)
DRB1	0,048	627,76
DRB2	0,098	58,39
DRB3	0,062	73,31
Média	0,069	273,15
CoV (%)	37,49	128,18

No que concerne à resistência mecânica entre as três paredes ensaiadas registou-se um coeficiente de variação de 37,49% sendo que a parede DRB2 obteve uma resistência ao corte aproximadamente 100% superior à obtida na parede DRB1 e aproximadamente 67% superior à parede DRB3. No módulo de distorção foi registado um coeficiente de variação de 128,18% tendo sido a parede DRB1 a registar o valor mais elevado. Os ensaios de compressão diagonal realizados permitem concluir que em termos médios a alvenaria tradicional de xisto reforçada com recurso ao preenchimento de junta e cordões metálicos tem uma resistência ao corte de 0,07MPa e um módulo de distorção de 273,15MPa.

Na Figura 5.38 apresenta-se o gráfico tensão-extensão da parede DRB2. Representa-se a evolução das extensões positivas e extensões negativas considerando respetivamente os deslocamentos das diagonais normais ( $\epsilon_n$ ) e diagonais transversais ( $\epsilon_t$ ). Os gráficos tensão-extensão das paredes DRB1 e DRB3 não são apresentados devido a dificuldades no registo dos deslocamentos.

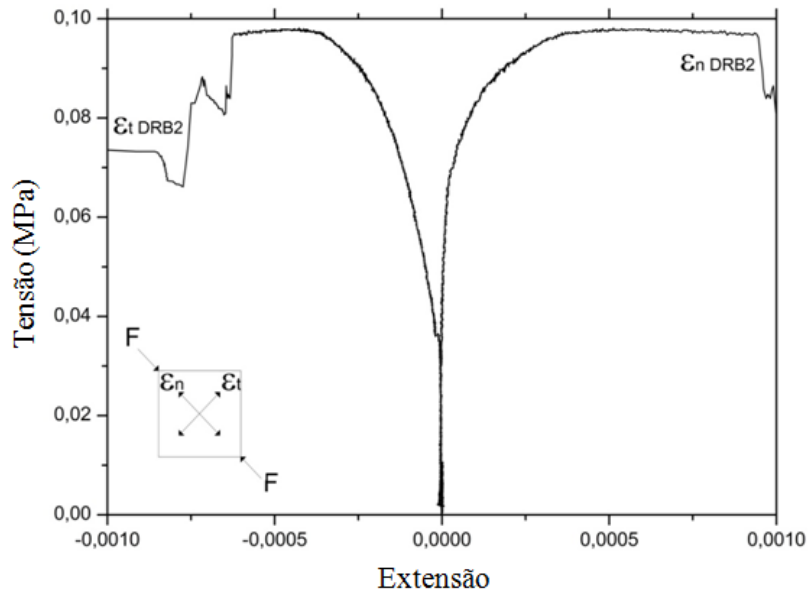
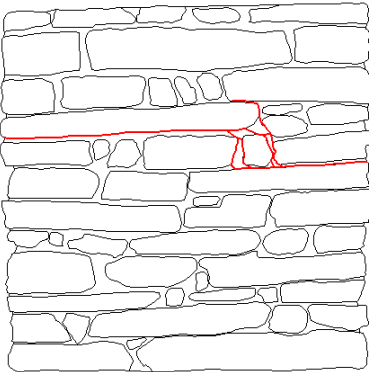
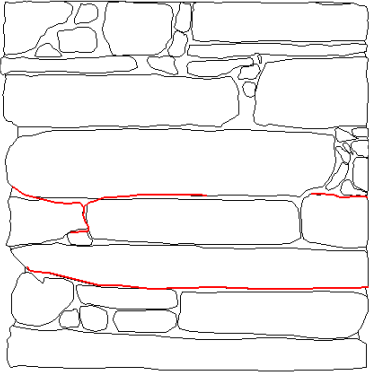
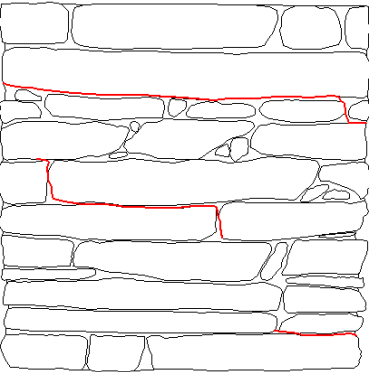


Figura 5.38 – Gráficos tensão-extensão do ensaio de compressão diagonal das paredes reforçadas com preenchimento de junta e cordões metálicos.

Na Tabela 5.18 apresenta-se o padrão de fissuração das três paredes ensaiadas. Observa-se que a parede DRB2 foi a parede que obteve fissuras menos definidas. No entanto, contrariamente aos ensaios referidos nos pontos anteriores, as fissuras registadas nestas paredes são predominantemente horizontais ocorrendo nas juntas por deslocamento horizontal das fiadas de xisto. Realça-se que as fissuras ocorreram na zona intermédia entre as juntas onde foram colocados os cordões metálicos.

Tabela 5.18 – Padrão de fissuração das paredes reforçadas com preenchimento de junta e cordões metálicos.

<b>Paredes</b>		
		
DRB1	DRB2	DRB3

Na análise do aparelho usado, denota-se que a parede DRB2 possui elementos pétreos de maior dimensão e conseqüentemente menor número de fiadas comparativamente com as paredes DRB1 e DRB3. Tal facto tem impacto nas diferenças entre os resultados obtidos nas três paredes ensaiadas. Na Figura 5.39 apresenta-se o estado final, pós-rotura, de ambas as paredes ensaiadas.

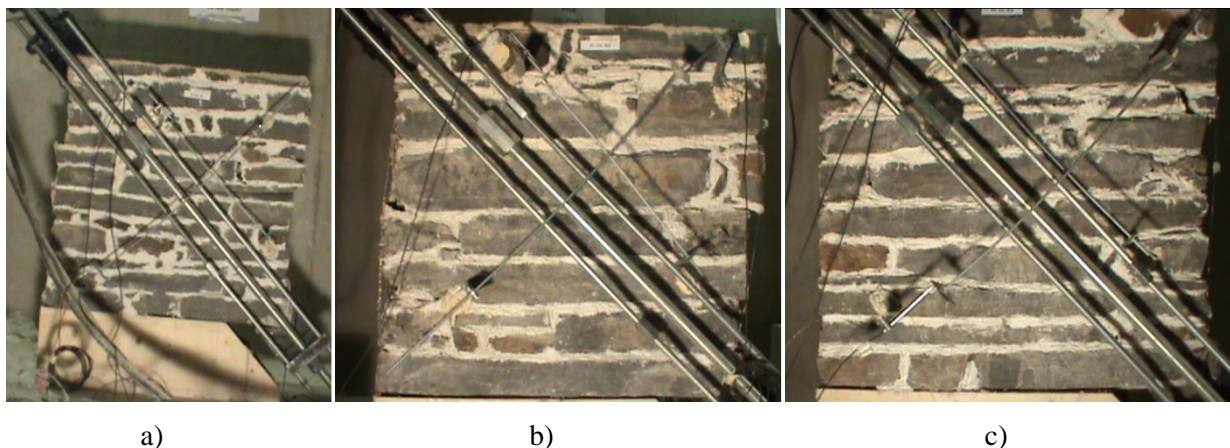


Figura 5.39 – Estado final dos ensaios de resistência à compressão diagonal em paredes reforçadas com o preenchimento da junta e cordões metálicos; a) DRB1; b) DRB2; c) DRB3.

Tal como se verificou anteriormente nos ensaios de compressão diagonal para as paredes reforçadas pela metodologia do preenchimento de junta, os resultados dos ensaios de compressão diagonal sobre as paredes reforçadas pela metodologia do preenchimento de junta e cordões metálicos também apresentam maior resistência mecânica comparativamente aos resultados obtidos nos mesmos ensaios sobre as paredes não reforçadas. No entanto, as maiores dimensões dos elementos pétreos das paredes reforçadas pela metodologia do preenchimento de junta e cordões metálicos têm influência na melhoria do comportamento mecânico e no padrão de fissuração quando comparadas com as paredes reforçadas pela metodologia do preenchimento de junta.

#### **5.4.7 Análise comparativa**

Pretende-se neste ponto efetuar uma análise comparativa dos ensaios de compressão diagonal interpretando as diferenças entre os resultados obtidos, incluindo a análise das propriedades mecânicas da alvenaria tradicional de xisto e a determinação da melhor metodologia para incremento das características mecânicas da alvenaria. Na Tabela 5.19 são apresentados os resultados representativos de cada tipo de parede.

Tabela 5.19 – Comparação de resultados médios obtidos nas paredes não reforçadas, paredes reforçadas com preenchimento de junta e paredes reforçadas com preenchimento de junta e cordões metálicos.

Paredes	Resistência ao corte (MPa)	Módulo de distorção (MPa)
NR	0,03	32,50
DR	0,06	35,52
DRB	0,07	273,15

Em termos médios, observa-se que as paredes reforçadas com preenchimento de junta apresentam um incremento na resistência ao corte de 100% comparativamente com as paredes não reforçadas. As paredes reforçadas com preenchimento de junta e cordões metálicos apresentam um incremento na resistência ao corte de 133% comparativamente às paredes não reforçadas e de 17% comparativamente com as paredes reforçadas com apenas com preenchimento de junta. Apesar do resultado obtido nas paredes reforçadas com preenchimento de junta e cordões metálicos ser ligeiramente superior, este resultado deve ser considerado com alguma prudência dado que se registam diferenças no aparelho entre as paredes não reforçadas (ver Tabela 5.13) e as paredes reforçadas com preenchimento de junta e cordões metálicos (ver Tabela 5.18). Os elementos pétreos de maiores dimensões que se podem observar principalmente na parede DRB2 permitem incrementar a resistência à compressão diagonal tendo, desta forma, influência nas resistências obtidas. Deste modo, será razoável afirmar que nos ensaios realizados o reforço baseado no preenchimento de junta com argamassa permitiu duplicar a resistência ao corte da alvenaria não reforçada e que a colocação de cordões metálicos não promoveu acréscimos de resistência face ao preenchimento de junta.

Relativamente à deformabilidade das paredes, registou-se uma enorme dispersão dos valores do módulo de distorção dentro de cada série, essencialmente devido a variações do aparelho de alvenaria usado, pelo que se torna difícil extrair conclusões relativamente a este parâmetro. Contudo, uma análise com base na exclusão dos valores do módulo de distorção díspares em cada série parece indicar que as duas técnicas de reforço usadas não alteram de forma significativa o valor do módulo de distorção medido nas paredes não reforçadas.

As metodologias de reforço propostas contribuem essencialmente no incremento da resistência mecânica à compressão diagonal. A aplicação de um reforço a alvenarias

tradicionais de xisto com recurso a preenchimento de junta parece assim ser uma metodologia de reforço que permite aumentar a resistência mecânica sem alterar de forma visível as características de deformabilidade originais da alvenaria.

# Capítulo 6

## CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 6.1 Conclusões

Os xistos são rochas metamórficas, com origem no metamorfismo regional, características pelos seus minerais e a sua textura plana ou irregular. Em Portugal continental são diversos os tipos de xistos existentes, variando o tipo ao longo do território, assim como variam as características destes elementos pétreos. De facto, a diversidade do próprio xisto é um dos principais fatores para as diferentes tipologias encontradas, muito devido à variação do tipo de xisto usado nas construções em diferentes locais.

As construções em alvenaria de xisto podem ser consideradas como construções verdadeiramente sustentáveis, tendo em consideração a sua metodologia construtiva, efetuada com recurso a elementos de xisto extraídos do próprio local de implantação da construção e aplicados em lascas sem qualquer tipo de tratamento ou transformação.

Para além do elemento pétreo xisto, as diferentes tipologias das construções em xisto existentes no nosso país estão diretamente relacionadas com a população, a sua vida quotidiana e o seu nível económico. Estes fatores são cruciais para a compreensão das variações tipológicas de região para região.

Grande parte dos danos observados em construções de xisto é devida à má execução das fundações, à deterioração dos elementos estruturais de madeira, à vegetação e às agressões ambientais, principalmente nos edifícios sem reboco. A erosão do xisto é, no entanto, um dos danos mais comuns e mais graves detetados neste tipo de construção. A deteção deste dano nas regiões de Trás-os-Montes, Minho e Beiras comprova a influência dos microclimas no agravamento da erosão do xisto, tendo em conta que as grandes amplitudes térmicas registadas nessas regiões aceleram os fenómenos de cristalização de sais, quando as temperaturas são altas, e os fenómenos de gelo/degelo, quando as temperaturas são baixas.

Perante a série de ensaios materiais realizados às várias amostras de xisto recolhidas, concluiu-se que o xisto extraído de Vila Nova de Foz Côa é o que apresenta melhores propriedades de resistência e durabilidade. Para além das propriedades apresentadas, também é importante realçar a influência dos planos de anisotropia que, variando mediante o tipo de formação metamórfica, têm um papel preponderante no comportamento físico-químico e mecânico dos xistos. No que concerne à análise comparativa com outros elementos pétreos em termos de resistência mecânica, os xistos mais resistentes atingem valores da mesma ordem de grandeza dos do granito, sendo que os xistos menos resistentes são comparáveis ao arenito ou calcário. A mesma comparação é verificada quando analisada a porosidade e a densidade dos xistos.

Perante os resultados dos ensaios mecânicos realizados, de forma resumida e em termos de valores médios, pode-se concluir que a alvenaria tradicional de xisto de dois paramentos possui resistência à compressão de 4MPa, módulo de elasticidade de 370MPa, resistência ao corte de 0,03MPa, e módulo de distorção de 30MPa.

Relativamente às propostas de reforço estudadas, verificou-se que o preenchimento de junta com argamassa de melhor resistência permitiu duplicar a resistência a corte da alvenaria não reforçada, pelo que se considera uma metodologia de reforço estrutural que possibilita melhorar o comportamento mecânico da alvenaria tradicional de xisto. Por outro lado, constatou-se que a colocação de cordões metálicos não promoveu acréscimos de resistência ao corte face ao reforço baseado no preenchimento de junta.

A escassez de dados científicos relativos ao comportamento mecânico da alvenaria de xisto faz com que os resultados obtidos neste estudo constituam um importante contributo para a avaliação estrutural do património edificado em xisto.

## 6.2 Trabalhos futuros

Neste ponto apresentam-se algumas propostas de trabalhos futuros que se entendem como complementos nas diferentes áreas abordadas nesta tese. A lacuna existente no conhecimento científico sobre construções em xisto exige estudos aprofundados em aspetos particulares destas construções, assim como a aplicação dos mesmos estudos às construções em xisto espalhadas pelo mundo.

Relativamente às características tipológicas, devem ser estudadas as diferentes aplicações do xisto e as diferentes tipologias das construções a nível mundial. Deve-se perceber as motivações para a aplicação deste tipo de material e as razões para a existência de diversas metodologias de construção, assim como determinar a distribuição geográfica destas construções a nível global.

No que concerne ao estudo do xisto como material de construção, entende-se que para além dos ensaios apresentados no âmbito desta tese, devem ser realizados os ensaios seguintes: (a) resistência ao gelo/degelo para a compreensão do funcionamento da estrutura xistosa perante fenómenos de variação de temperatura do tipo gelo/degelo; (b) absorção atómica para a obtenção com grande precisão de dados quantitativos dos elementos químicos presentes no xisto; (c) ensaios de cromatografia iónica para a obtenção de dados quantitativos e qualitativos dos agentes poluentes existentes no xisto, tanto na forma salina como ácida.

No âmbito da caracterização do comportamento de paredes de alvenaria de xisto, propõe-se a realização de ensaios de paredes de alvenaria de xisto sob a ação combinada de ações de compressão e corte cíclicas aplicadas no plano da parede, representativas da ação sísmica, e a consequente definição de metodologias de reforço sísmico adequadas às diferentes metodologias construtivas. Propõe-se também a realização de ensaios endoscópicos *in-situ* para a definição das características geométricas de preenchimento entre paramentos, fator essencial na definição das características mecânicas de paredes de alvenaria de múltiplas folhas.





## REFERÊNCIAS

Aires-Barros, L., (2001) *As rochas dos monumentos portugueses tipologias e patologias*, IPPAR, Lisboa.

Albaria Struttura (2012) *Fichas técnicas albaria struttura*, BASF The chemical company.

Alves, C., Braga, M. e Hammecker, C., (1996). *Water transfer and decay of granitic stones in monuments*, Surface geosciences, C. R. Acad. Sci., Paris.

Amaral F., Lobo J. e Malato J. (1988) *Arquitectura popular em Portugal*, Associação dos arquitectos portugueses.

Árkai P., Sassi F. e Desmons J. (2007) *Very low-to low-grade metamorphic rocks*, Recommendations by the IUGS Subcommission on the systematics of metamorphic rocks, UK.

Associação dos arquitectos portugueses, (1980) *Arquitectura popular em Portugal*. APP, Lisboa.

ASTM E178 (2012) *Standard practice for dealing with outlying observations*.

ASTM E519 (2002) *Standard test method for digonal tension (shear) in masonry assemblages*.

ASTM E797 (2005) *Standard practice for measuring thickness by manual ultrasonic pulse-echo contact method.*

ASTM D2487 (1985) *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purpose.*

ASTM D4373 (1996) *Standard test for calcium carbonate content of soils.*

Avorio A., Borri, A. e Corradi, M. (2002) *Ricerche per la ricostruzione, iniziative di carattere tecnico e scientifico a supporto della ricostruzione*, Dei tipografia del genio civile, Roma.

Barros, R.S., (2012) *Masonry Structures – Seismic Reinforcement with Metallic Elements*, LAP – Lambert Academic Publisher, Alemanha.

Barroso C. (2012) *A construção vernacular em xisto entre o Cávado e o Ave – o caso de Barqueiros*, Tese de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães.

Baruchello, L., Assenza, G., (2004) *Diagnosi dei dissesti e consolidamento delle costruzioni*. DEI, Roma.

Begonha, A. (1997). *Meteorização do granito e deterioração da pedra em monumentos e edifícios da cidade do Porto*, Tese de doutoramento, Universidade do Minho, Braga.

Bell, F., (2007) *Engineering geology*. ELSEVIER, Oxford.

Blyth, F., Freitas, M., (1984) *A geology for engineers*. ELSEVIER, Oxford.

Boeri, A., (2000) *Pietre naturali nelle costruzioni*. HOEPLI, Milão.

Borri A., Corradi M., Speranzini, E. e Giannantoni, A. (2009) *Reinforcement of historic masonry: the “reticolatus technique”*, In: IF CRASC’09, Napoli.

Borri A., Castori G. e Corradi M. (2010) *Shear behavior of masonry panels strengthened by high strength steel cords*, Construction and building materials, Elsevier.

Borri A., Castori G., Corradi, M. e Speranzini E. (2011) *Shear behavior of unreinforced and reinforced masonry panels subjected to in situ diagonal compression tests*, Construction and building materials, Elsevier.

Bouyoucos, G. J. (1951) A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soil, Am. Soc. Agr. J.

Brignola A., Frumento S., Lagomarsino S. e Podestà S. (2008) *Identification of the shear parameters of masonry panels through the in-situ diagonal compression test*, International journal of architectural heritage: conservation, analysis, and restoration, London.

Brito, R., (2008) *A terra que habitamos, unidades morfoestruturais*. Disponível em [www.igeo.pt](http://www.igeo.pt) (consultado em 07.08.2008).

Brodie K., Fettes, D., Harte B. and Schmid R., (2007) *Structural terms including fault rock terms*, Recommendations by the IUGS Subcommittee on the systematics of metamorphic rocks, UK.

Burcio M. (2004) *Controle estrutural da localização de pedreiras de esteios de xisto para vinha em Vila Nova de Foz Côa*, Tese de mestrado, Universidade de Évora, Évora.

Caillegari e Petsev (2007) *Contact metamorphic rocks*, Recommendations by the IUGS Subcommittee on the systematics of metamorphic rocks, UK.

Calderini C., Cattari S. e Lagomarsino S. (2002) *The use of the diagonal compression test to identify the shear mechanical parameters of masonry*, Construction and building materials, Elsevier.

Cardoso, A., (2006) *Arquitetura em xisto*, Jornal ABARCA.

Carocci C. F. (2008) *Conoscere per abitare*, Lombardi editori, Siracusa.

Carvalho, A., (1996) *Geologia, Morfogénese e sedimentogénese*. Universidade Aberta, Lisboa.

Carvalho S. (2008) *Recuperação de construções em xisto, Três processos para Gondramaz*, Universidade de Coimbra, Coimbra.

Chiostrini S., Galano L. e Vignoli A. (2000) *On the determination of strength of ancient masonry walls via experimental tests*. In: 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland.

Chozas de Piedra. <http://www.petrichor.net> (consultado em 12.11.2008).

Corradi M. (2006) *Tecniche per la caratterizzazione meccanica della muratura*, Università degli studi di Perugia, Perugia.

Corradi M., Borri, A. e Vignoli A. (2002) *Experimental study on the determination of strength of masonry walls*, Construction and building materials, Elsevier.

Corradi M., Tedeschi C., Binda L. e Borri A. (2007) *Experimental evaluation of shear and compression strength of masonry wall before and after reinforcement: deep repointing*, Construction and building materials, Elsevier.

Corradi M., Borri A. e Vignoli A. (2010) *Strengthening techniques tested on masonry structures struck by the Umbria-Marche earthquake of 1997-1998*, Construction and building materials, Elsevier.

EN 933-9 (2002), *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 9: determinação do teor de finos, Ensaio do azul de metileno*, IPQ.

EN 998-2 (2010), *Especificações para argamassas para alvenaria*, IPQ.

EN 1052-1 (2001), *Métodos de prova em alvenaria – Determinação da resistência à compressão*, IPQ.

EN 1925 (2006), *Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade*, IPQ.

EN 1926 (2006), *Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação da resistência à compressão axial*, IPQ.

EN 12370 (2001), *Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação da resistência à cristalização de sais*, IPQ.

EN 12504-4 (2003), *Ensaio do betão nas estruturas – Parte 2: Ensaio não destrutivo, determinação do índice esclerométrico*, IPQ.

EN 13755 (2005), *Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação da absorção da água à pressão atmosférica normal*, IPQ.

Eurocódigo 6 (2001) *Projeto de estruturas de alvenaria, Parte 1-1: Regras gerais para edifícios, Regras para alvenaria armada e não armada*, IPQ.

Fabbri G. (1994) *Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno*, Tese de doutoramento, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Paulo.

Fernandes M. M. (2011) *Mecânica dos solos, conceitos e princípios fundamentais*, FEUP edições, Porto.

Figueiredo, C., Folha, R., Mauricio, R., Alves, C. e Aires-Barros, L. (2010). *Contribution to the technological characterization of two widely used Portuguese dimension stones: the 'Semi-rijo' and 'Moca creme'*, StonesGeological Society, Special publication, v.333, p 153-163, London.

Gomes L. e Almeida P. (2003) *As Pedreiras do Poio (Foz Côa) – A Região de Turismo*. In: A Geologia de Engenharia e os Recursos Geológicos. Vol. 1 Geologia de Engenharia, Imprensa da Universidade.

Grillo, F., (2002) *Edifici in muratura*, Edizioni Kappa, Roma.

Hardwire, *Ficha técnica Fidsteel 3x2-B 12-12-500*, FIDIA srl Technical Global Services.

Hudson J. A. & Harrison J. P. (1997) *Engineering Rock Mechanics, an introduction to the principles*, Pergamon, London.

Irland a celtic Jaunt. <http://celticjaunt.blogspot.pt/> (consultado em 07.08.2012).

INE (2013). Censos 2011 Disponível em <http://www.ine.pt> (consultado em 10.06.2013).

IPPAR. Disponível em <http://www.ippar.pt> (consultado em 17.11.2008).

I.S.R.M. (1985) *Suggested method for determining point load strength*. Pergamon press, Great Britain.

Johnson, R., De Graff, J., (1988) *Principles of Engineering geology*. John Wiley & Sons, inc, Nova York.

Kobranova, V.N. (1989). *Petrophysics*, Springer-Verlag, Berlin.

Kornprobst J. (2002) *Metamorphic rocks and their geodynamics significance*, Kluwer academic publishers, New York.

Lourenço P. B., Luso, E. e Almeida M. G. (2008) *Defects and moisture problems in buildings from historical city centers: A case study in Portugal*.

LUMB6 (1991), *Diagonal tensile strength tests of small wall specimens*.

Luso E. (2012) *Análise experimental de caldas à base de cal para injeção de alvenaria antiga*, Tese de doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães.

Manuale di Progettazione Edilizia (2007). *I materiali tradizionali*, HOEPLI, Milano.

Marques, M., Marques, B, Rodrigues, J., (2006) *Degradação e conservação da pedra em estruturas de alvenaria*, LNEC, Lisboa.

Milosevic, J., Gago, A. S., Lopes, M., Bento, R., (2013) *Experimental assessment of shear strength parameters on rubble stone masonry specimens*, Construction and building materials, Elsevier.

Mogi, K. (2007) *Experimental rock mechanics*, Taylor & Francis Group, London.

Montgomery, C., (2008) *Environmental geology*, McGraw-hill, New York.

Moutinho, M. (1995) *A arquitectura popular portuguesa*, Editorial Estampa, Lisboa.

Noronha F., Aires S., Carvalho C., Ramos J. F., Moura C., Moura R., Sant'Ovaia H e Ramos V. (2011) *Os xistos como recurso O caso de Trás-os-Montes e Alto Douro*, In: RGAOT'11, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Oliveira (2003) *Experimental and numerical analysis of blocky masonry structures under cyclic loading*, Phd Thesis, Universidade do Minho, Guimarães.

Outsider Environments. Disponível em <http://outsider-environments.blogspot.pt> (consultado em 20.11.2013).

Pereira, J., (2006) *Piódão – Aldeia Histórica, Presépio da Beira Serra*, Perira, J..

Pinho A. (2003) *Caracterização geotécnica de maciços rochosos de baixa resistência – o flysch do baixo Alentejo*, Tese de doutoramento, Universidade de Évora, Évora.

Reis, A. C. (2010). *Organização e gestão de obras*, Edições Técnicas E.T.L., Lisboa.

Renard, T. Disponível em <http://tonyrenard.be> (consultado em 12.11.2008).

Ribeiro V., Costa, A. M., Almeida, M. e Costa, M. R. (2008) *Materiais, sistemas e técnicas de construção tradicional*, Edições Afrontamento, Faro.

Robertson, S. (1999) *Research report number RR99-02, BGS rock classification scheme*, Volume 2, Classification of metamorphic rocks, British Geological Survey, Nottingham.

Rochas de Portugal. Disponível em <http://www.dct.uminho.pt/rpmic/locpormapa.html> (consultado em 18.10.2008).

Saisi A. (2008) *Masonry damage*, In: *Masonry Strengthening with Composite Materials*, RILEM Meeting, Padova.

Schmid, R., Fettes, D., Harte, B., Davis E., Desmons, J. (2007) *A systematic nomenclature for metamorphic rocks: 1. How to name a metamorphic rock. Recommendations by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks. Recommendations*, web version of 01.02.2007. Disponível em [http://www.bgs.ac.uk/SCMR/docs/papers/paper\\_1.pdf](http://www.bgs.ac.uk/SCMR/docs/papers/paper_1.pdf)

Sibille, R. *Chambra*. Disponível em <http://www.chambradoc.it> (consultado em 20.11.2013).

Silva, R. A., Oliveira, D. V., P. B. Lourenço, Schueremans, L., Miranda, T. (2013) *Experimental investigation on the repair of rammed earth by means of injection of mud grouts* In: *Proceedings of CIAV 2013*, University Gallecia, Vila Nova de Cerveira.

Sindo's NYC. Disponível em <http://sindoesnyc.blogspot.pt> (consultado em 20.11.2013).

Smulikowski W., Desmons J., Fettes, D., Harte B. e Sassi F. (2007) *Types, grade and facies of metamorphism*, Recommendations by the IUGS Subcommittee on the systematics of metamorphic rocks, UK.

Stone Quarries and Beyond. Disponível em <http://quarriesandbeyond.org> (consultado em 12.11.2008).

Tomé M. (2002) *Património e restauro em Portugal (1920-1995)*, FAUP publicações, Porto.

Tubi, N., Silva, M., (2006) *Gli edifici in pietra*, Sistemi editoriali, Napoli.



University of Delaware, Research online magazine. Disponível em <http://www.udel.edu> (consultado em 20.11.2013).

Valluzzi M. R., Tinazzi D. e Modena C. (2002) *Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates*, Construction and buildings materials, Elsevier.

Varum H, Silveira D, Figueiredo A, Carvalho J, Costa A (2011) *Caracterização do comportamento mecânico de paredes de alvenaria de adobe*. In: Proceedings of VIII International Congress of Earth Architecture, University of Valladolid, Valladolid, 23-25 September 2011

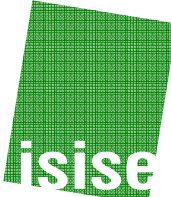

Vasconcelos G. (2005) *Experimental investigations on the mechanics of stone masonry: Characterization of granites and behavior of ancient masonry shear walls*, Phd Thesis, Universidade do Minho, Guimarães.

Vasconcelos G., Lourenço, P. B., Alves, C. A. S., Pamplona, J. (2008) *Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites*, ScienceDirect, ELSVIER.

Viles H., Goudie A., Grab S. e Lalley J.. (2010) *The use of Schmidt hammer and equotip for rock hardness assessment in geomorphology and heritage science: a comparative analysis*, Earth surface processes and landforms, Wiley interscience.

## **ANEXOS**



	<p><b>LEVANTAMENTO</b></p> <p>DATA: ____/____/____ Coordenadas W: _____ N: _____</p>	
---	--	---

## LEVANTAMENTO DE CONSTRUÇÕES EM XISTO

**EDIFÍCIO** \_\_\_\_\_

### IDENTIFICAÇÃO DO EDIFÍCIO

**1.1 Freguesia** \_\_\_\_\_

**1.2 Rua** \_\_\_\_\_ N.º \_\_\_\_\_

**1.3 Região** \_\_\_\_\_

**1.4 Dono** \_\_\_\_\_

**1.5 Observações**  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

### DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

#### 2.1 Posição do edifício

Isolado

Ligado a outros edifícios  Quantos lados? \_\_\_\_\_

#### 2.2. Tipologia

Urbano

Rural

Publico



Torre

Palácio

Castelo

Igreja

Outros  Tipo \_\_\_\_\_

	<p><b>LEVANTAMENTO</b></p> <p>DATA: ____/____/____      Coordenadas W: _____</p> <p style="margin-left: 400px;">N: _____</p>	
---	--	---

**2.2. Tipo de Utilização**

- Habitação uni-familiar
- Habitação multi-familiar
- Comercial
- Religiosa
- Agricultura
- Outras       Quais? \_\_\_\_\_

**2.3. Data de construção**

\_\_\_\_\_

**2.4. Reabilitação**

- Presente
- Ausente

**2.5. Mudança de utilização**

- Antiga utilização \_\_\_\_\_
- Nova utilização \_\_\_\_\_

**2.6. Estado de conservação**



- Bom
- Medíocre
- Muito mau
- Ruína
- Colapso total

**2.7. Terreno de implantação**

- Plano
- Inclinado
- Socalcos
- Nível Freático: \_\_\_\_\_

**2.8. Planta**

- Quadrada
- Rectangular
- Poligonal
- Articulada

	<p><b>LEVANTAMENTO</b></p> <p>DATA: ____/____/____ Coordenadas W: _____ N: _____</p>	
---	--	---

**2.11. Área média dos pisos (m2)**

- < 50
- 50 < x < 100
- 100 < x < 200
- 200 < x < 400
- > 400

**2.12. Escadas**

Externas

Internas

**2.12.1. Material**

Madeira

Metal

Pedra \_\_\_\_\_(Tipo)

Alvenaria

Betão

**2.13. Cobertura**

Madeira

Metal

Alvenaria

Betão

**2.14. Paredes divisórias**

Alvenaria de tijolo

Tabique

Pedra \_\_\_\_\_(Tipo)

Outro  Qual? \_\_\_\_\_

**2.15. Estruturas horizontais**

**2.15.1. Abóbadas**

Não existentes

Existentes

Tipo Cruz

Pavilhão

**2.15.2. Pavimentos**

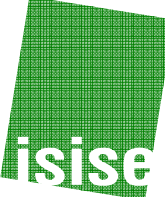

Madeira

Madeira/Aço

Madeira/Betão

Aço/Betão

Betão

	<b>LEVANTAMENTO</b> DATA: ____/____/____ Coordenadas W: _____ N: _____	
---	--	---

### LEVANTAMENTO DA ALVENARIA

#### 3.1. Paredes

Número de fachadas \_\_\_\_\_

#### 3.2. Tipo de parede

Simplex

Dupla

#### 3.3. Espessura média (cm)

Base \_\_\_\_\_

Topo \_\_\_\_\_

#### 3.4. Material

Xisto

Xisto/madeira

Xisto/alvenaria de pedra \_\_\_\_\_(Tipo)

Xisto/alvenaria de tijolo

#### 3.5. Ligante

Sem ligante

Terra

Argamassa

Outro  Qual? \_\_\_\_\_

Xisto/metalo

Xisto/betão

Xisto/materiais compósitos

#### 3.6. Ligação entre panos

Xisto

Madeira

Metal

Outro  Qual? \_\_\_\_\_

#### 3.7. Cunhais

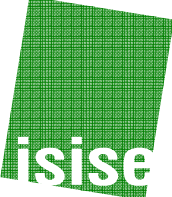

Ausentes

Existentes

Xisto

Pedra \_\_\_\_\_(Tipo)

Outro material

	<b>LEVANTAMENTO</b> DATA: ____/____/____ Coordenadas W: _____ N: _____	
---	--	---

### 3.8. Padieira

- Xisto
- Madeira
- Metal
- Betão
- Outro  Qual? \_\_\_\_\_

## CARACTERIZAÇÃO DO XISTO

### 4.1. Cor

- Preto
- Castanho
- Amarelado
- Outro  Qual? \_\_\_\_\_

### 4.2. Formato (comprimento da pedra unitária em cm)

- < 10
- $10 < x < 20$
- $20 < x < 50$
- $50 < x < 100$
- > 100



### 4.3. Disposição

- Organizada simetricamente
- Regular
- Irregular

### 4.4. Corte

- Irregular
- Regular



	<b>LEVANTAMENTO</b> DATA: ____/____/____ Coordenadas W: _____ N: _____	
---	--	---

**4.5. Estado de Conservação**

- Bom
- Medíocre
- Mau
- Muito mau

**REBOCO (se aplicável)**

**5.1. Estado de conservação**



- Bom
- Medíocre
- Mau
- Muito mau

**5.2. Cor**

\_\_\_\_\_

**5.3. Material**

\_\_\_\_\_

	<p><b>LEVANTAMENTO</b></p> <p>DATA: ____/____/____      Coordenadas W: _____                  N: _____</p>	
---	--	---

**AVALIAÇÃO DE DANOS**

**6.4. Pavimentos**

- Colapso local
- Colapso total
- Fendas
- Destacamento
- Deslocamento de elementos
- Degradação de elementos
- Outros \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

**6.5. Abobadas**

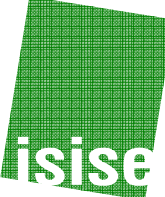

- Colapso local
- Colapso total
- Destacamento de revestimento
- Fendas
- Outros \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

**6.6. Escadas**

- Colapso local
- Colapso total
- Rotação
- Fendas
- Outros \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

**6.7. Varandas, chaminés e elementos suspensos**

- Colapso local
- Colapso total
- Fendas
- Degradação
- Outros \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

	<b>LEVANTAMENTO</b> DATA: ____/____/____      Coordenadas W: _____ N: _____	
---	---	---

**6.8. Fundações**

Desnível

Abatimento

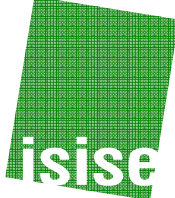

Outros  
\_\_\_\_\_

**OUTROS ELEMENTOS RELATIVOS AOS DANOS**

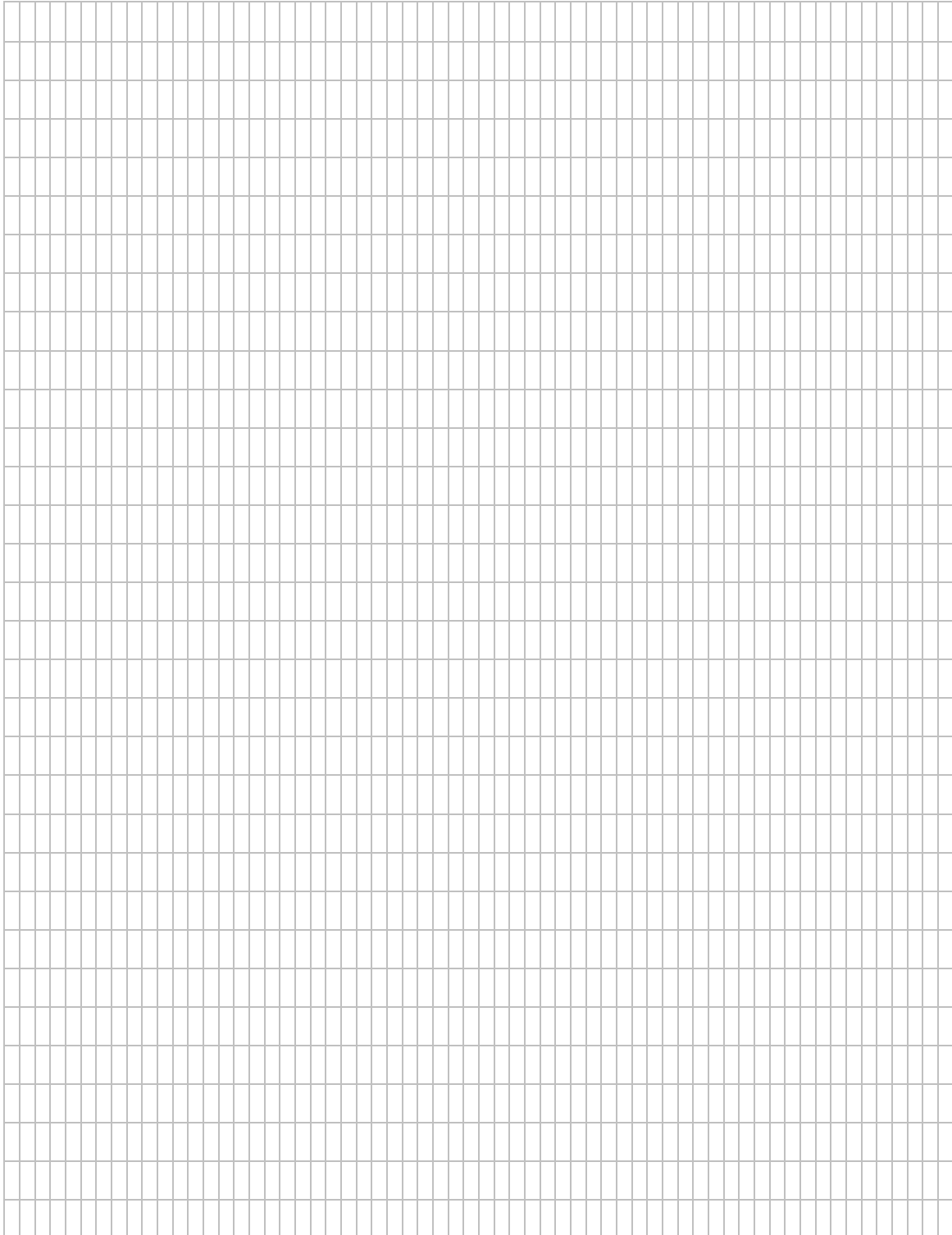
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

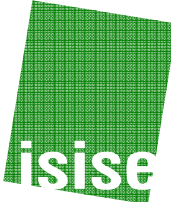

**APRECIACÃO GERAL DO EDIFÍCIO**

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

	<p style="text-align: center;"><b>LEVANTAMENTO</b></p> <p>DATA: ____ / ____ / ____      Coordenadas W: _____ N: _____</p>	
---	---	---

**ESQUEMA DO EDIFÍCIO**



	<p style="text-align: center;"><b>LEVANTAMENTO</b></p> <p>DATA: ____ / ____ / ____      Coordenadas W: _____ N: _____</p>	
---	---	---

**ESQUEMA DO EDIFÍCIO**

