



José Carlos Mendes Domingues

# CARACTERIZAÇÃO TIPOLÓGICA E MECÂNICA DE PAREDES DE ALVENARIA DE PEDRA EM CENTROS URBANOS ANTIGOS - CASO DE ESTUDO DE VISEU

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Reabilitação de  
Edifícios, no Ramo de Reabilitação Estrutural

Coimbra, Março, 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



**FCTUC** DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# **Caracterização tipológica e mecânica de paredes de alvenaria de pedra em centros urbanos antigos — Caso de estudo de Viseu**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Reabilitação de Edifícios, no Ramo de Reabilitação Estrutural

Autor

**José Carlos Mendes Domingues**

Orientadores

**João Henrique Jorge de Oliveira Negrão**

Universidade de Coimbra

**Tiago Miguel dos Santos Ferreira**

Universidade do Minho

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada.

**Coimbra, Março, 2017**

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. João Negrão, pelo contributo na definição da linha de trabalho desta dissertação, e pelos comentários e sugestões bastante pertinentes.

Ao Prof. Dr. Tiago Ferreira, pelo interesse demonstrado desde a primeira hora, pelos esclarecimentos e sugestões, pelo encorajamento, e pelas sempre interessantes conversas que fomos mantendo, que por vezes extravasavam o âmbito mais imediato deste trabalho, e muito contribuíram para o interesse cada vez maior no estudo das alvenarias antigas.

Ao Prof. Dr. Romeu Vicente, pela disponibilidade que demonstrou desde o início deste trabalho e pela valiosa partilha de conhecimentos.

Ao Eng.º Jorge Fonseca, da Universidade de Aveiro, pelo contributo inexcedível na realização da componente experimental deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Raimundo Mendes da Silva, incansável coordenador deste Mestrado em Reabilitação de Edifícios, pelos valiosos conselhos que muito contribuíram, numa fase inicial, para a definição do objeto deste trabalho, bem como pelo apoio constante.

À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lúcia Gil, do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, pelas informações e esclarecimentos prestados.

Aos colegas desta primeira edição do Mestrado, por esta aventura e desafio que empreendemos. De forma especial, àqueles com quem, ao longo desta última fase, fui partilhando alguns momentos de pesquisa, trabalho e camaradagem.

Um agradecimento muito especial à minha família. Aos meus pais, Fernando e Olga, pelo exemplo e pelo apoio. Aos meus irmãos, Pedro e João.

A todos, muito obrigado.

## RESUMO

Em intervenções sobre edifícios existentes, é da maior importância dispor de informação que represente, de forma fiável, tanto o sistema estrutural como as propriedades dos materiais. Tal é ainda mais relevante no caso dos edifícios cujos elementos resistentes verticais consistem em paredes de alvenaria de pedra, situação predominante nos núcleos urbanos antigos portugueses, devido quer à variabilidade das propriedades mecânicas desta tecnologia construtiva (devida não apenas às características dos seus componentes, mas também à forma como os mesmos são dispostos), quer à degradação que porventura tenham sofrido ao longo do tempo. No caso de edifícios inseridos em conjuntos urbanos de valor patrimonial, a realização de ensaios destrutivos é normalmente desaconselhável, impondo-se a realização de procedimentos semi- ou não-destrutivos que permitam obter, com o mínimo de dano possível, os dados a utilizar nos modelos de análise estrutural para aferição da segurança.

No caso particular da cidade de Viseu, verifica-se a falta de informação relativa às propriedades mecânicas das paredes de alvenaria de pedra de granito presentes no seu núcleo antigo. Assim, com vista a informar intervenções de reabilitação estrutural que privilegiem a manutenção do sistema resistente original do edificado antigo corrente nesta zona, este trabalho pretende apresentar um primeiro contributo para a caracterização das propriedades mecânicas destes elementos estruturais.

A campanha desenvolvida compreendeu a observação visual do alçado, a realização de ensaios de macacos planos, a observação da secção transversal e a caracterização mecânica da pedra empregue.

Numa fase posterior, procede-se a uma recolha crítica da informação disponível na literatura relativa à caracterização mecânica de alvenarias de pedra, de diferentes tipologias, para a realidade portuguesa. Pretende-se assim apresentar uma primeira proposta de valores de referência a considerar, como primeira aproximação, na modelação numérica, avaliação da segurança ou projeto de reforço de construções antigas de alvenaria de pedra, para a realidade nacional.

## **ABSTRACT**

When intervening in existing buildings, it is of the utmost importance to obtain data representing, in a reliable manner, both the structural system and the material properties. This is even more important in the case of stone masonry buildings (a frequent situation in Portuguese old town centers), due both to the variability of this technology's properties (which is caused not only by its components characteristics, but also by the way they are laid) and the degradation they might have sustained.

When dealing with buildings located in urban centers of heritage value, destructive procedures are normally inadvisable; thus, the need emerges to use non- or semi-destructive procedures, which might allow, with a minimum damage, to obtain the data needed to conduct an accurate structural safety verification or intervention design.

Regarding the city of Viseu, knowledge concerning the mechanical properties of granite walls located in its old town center is absent. Thus, with a view to provide the data that might help to retain the original structural system of these buildings, while ensuring structural safety, this work intends to offer a first contribution to the characterization of these elements' mechanical properties.

The campaign held consisted of visual characterization, of the walls' texture and interior, flat-jack testing, and laboratory testing of stone.

A further synthesis of available information in the literature concerning the characterization of stone masonry walls' mechanical properties, at a national level, is made, intending to suggest reference values to be used both in numerical modeling, safety evaluation and intervention design.

---

## ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações iniciais e motivação.....	1
1.1.1 O parque edificado e a reabilitação na realidade portuguesa.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Metodologia e recursos.....	2
1.4 Estrutura.....	3
2 SALVAGUARDA E PRESERVAÇÃO DO EDIFICADO EM CENTROS URBANOS ANTIGOS.....	4
2.1 Os centros urbanos antigos na segunda metade do século XX.....	5
2.2 Abandono e recuperação de centros urbanos antigos.....	7
2.3 Princípios de intervenção no edificado antigo.....	8
2.4 Enquadramento normativo da intervenção estrutural em construções existentes.....	9
2.5 Considerações finais.....	13
3 ALVENARIAS DE PEDRA EM CENTROS URBANOS ANTIGOS — TECNOLOGIA CONSTRUTIVA, COMPORTAMENTO MECÂNICO E CARACTERIZAÇÃO TIPOLOGICA.....	15
3.1 Dimensionamento.....	21
3.2 Comportamento mecânico.....	22
3.3 Estimativa das propriedades mecânicas da alvenaria.....	25
3.4 Caracterização de alvenarias de pedra.....	28
3.5 Considerações finais.....	34
4 CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE PAREDES DE ALVENARIA DE PEDRA NO NÚCLEO URBANO ANTIGO DE VISEU.....	37
4.1 Caracterização mecânica de paredes resistentes — Ensaio de macacos planos.....	37
4.1.1 Princípios do ensaio de macacos planos.....	38
4.1.2 Ensaio de macaco plano simples.....	39
4.1.3 Ensaio de macacos planos duplo.....	40
4.1.4 Normalização.....	41
4.1.5 Ensaio de macacos planos em alvenaria irregular.....	42
4.2 Caracterização <i>in situ</i> de paredes de alvenaria do núcleo urbano antigo de Viseu.....	43

---

4.2.1 Granito e construções em granito .....	44
4.2.2 Descrição dos edifícios .....	45
4.2.2.1 Orfeão de Viseu .....	45
4.2.2.2 Edifício das Águas de Viseu .....	47
4.2.3 Caracterização geométrica e tipológica — Alçado .....	48
4.2.3.1 Orfeão de Viseu .....	48
4.2.3.2 Edifício das Águas de Viseu .....	49
4.2.4 Caracterização mecânica — Ensaio de macacos planos .....	50
4.2.4.1 Equipamento utilizado .....	50
4.2.4.2 Protocolo de ensaio .....	52
4.2.4.3 Estimativa das tensões instaladas e das propriedades de deformabilidade e resistência .....	55
4.2.5 Caracterização geométrica e tipológica — Secção transversal .....	60
4.2.5.1 Orfeão de Viseu .....	60
4.2.5.2 Edifício das Águas de Viseu .....	60
4.2.6 Caracterização material (pedra) .....	61
4.3. Considerações finais .....	63
<b>5 ALVENARIAS ANTIGAS DE PEDRA EM PORTUGAL — PROPOSTA DE VALORES DE REFERÊNCIA PARA AS PROPRIEDADES MECÂNICAS .....</b>	<b>66</b>
5.1 Importância da caracterização de alvenarias de pedra .....	66
5.2 A caracterização de alvenarias de pedra a nível nacional .....	67
5.3 Proposta de valores de referência para as propriedades mecânicas de alvenarias antigas de pedra em Portugal .....	69
<b>6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>79</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>81</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Centro urbano antigo de Varsóvia destruído na 2ª Guerra Mundial .....	5
Figura 2.2	Demolição do Largo do Castelo, atual Praça D. Dinis, Coimbra .....	8
Figura 3.1	<i>O estaleiro</i> (Canaletto, c. 1725) .....	17
Figura 3.2	Parede de alvenaria em centros urbanos antigos portugueses.....	18
Figura 3.3	Prismas de alvenaria de granito ensaiados à compressão (Vasconcelos, 2005) .	24
Figura 3.4	Diminuição da resistência da parede face a ações para fora do plano devido à diminuição do número de elementos de travamento (Giuffré, 1996, como apresentado em de Felice, 2011) .....	29
Figura 3.5	Levantamento geométrico da secção transversal de paredes de alvenaria (CNR- GNDT, 2000).....	30
Figura 3.6	Percentagem dos materiais (pedra, argamassa e vazios) em secções de paredes das regiões italianas (Binda <i>et al.</i> , 1999).....	31
Figura 4.1	Ensaio de macacos planos numa parede de alvenaria .....	37
Figura 4.2	Realização do ensaio de macaco plano simples (adaptado de Lourenço e Gregorczyk, 2000).....	39
Figura 4.3	Realização do ensaio de macacos planos duplo (Ferreira, 2010, à esquerda, e Miranda, 2011, à direita) .....	40
Figura 4.4	Algumas configurações possíveis de macacos planos (Simões <i>et al.</i> , 2016).....	41
Figura 4.5	Diferentes tipos de granitos.....	44
Figura 4.6	Fachada do edifício do Orfeão de Viseu .....	45
Figura 4.7	Escadaria e azulejos do edifício do Orfeão de Viseu .....	46
Figura 4.8	Paredes divisórias em tabique de madeira .....	46
Figura 4.9	Águas de Viseu (vista da Rua do Comércio) .....	47
Figura 4.10	Águas de Viseu (vista da Rua D. Duarte) .....	47
Figura 4.11	Fingidos de pedra na fachada do rés-do-chão .....	47
Figura 4.12	Parede caracterizada no Orfeão de Viseu.....	48
Figura 4.13	Parede caracterizada no edifício das Águas de Viseu .....	49
Figura 4.14	Macacos planos semicirculares .....	50
Figura 4.15	Máquina de corte.....	51
Figura 4.16	Bomba hidráulica .....	51



---

Figura 4.17	Fixação dos potenciómetros na alvenaria .....	52
Figura 4.18	Sistema de aquisição e registo de dados .....	52
Figura 4.19	Medição da área de contacto entre o macaco plano e a alvenaria.....	53
Figura 4.20	Realização do ensaio de macacos planos simples, no edifício do Orfeão de Viseu (à esquerda), e no edifício das Águas de Viseu (à direita) .....	54
Figura 4.21	Realização do ensaio de macacos planos duplo, no edifício do Orfeão de Viseu (à esquerda), e no edifício das Águas de Viseu (à direita) .....	55
Figura 4.22	Resultados do ensaio simples 1 .....	56
Figura 4.23	Resultados do ensaio simples 2.....	56
Figura 4.24	Resultados do ensaio duplo 1 .....	57
Figura 4.25	Resultados do ensaio simples 1 .....	57
Figura 4.26	Resultados do ensaio duplo 1 .....	58
Figura 4.27	Resultados do ensaio duplo 2.....	58
Figura 4.28	Secção transversal da parede observada (Orfeão de Viseu).....	60
Figura 4.29	Núcleo interior da parede observada (Águas de Viseu).....	61
Figura 4.30	Ensaio de compressão uniaxial .....	62
Figura 4.31	Dano causado pela necessidade de remover os macacos planos presos .....	65
Figura 5.1	Página de entrada da base de dados MADA .....	67
Figura 5.2	Construção de paredes de alvenaria em laboratório para ensaio experimental (Ferreira, 2015).....	68
Figura 5.3	Corte de troço de parede <i>in situ</i> para análise em laboratório (Almeida, 2013)...	69

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1	Fatores corretivos para determinação da espessura de paredes de alvenaria de pedra (Rondelet, 1802) .....	21
Quadro 3.2	Espessura, em centímetros, de paredes de alvenaria de pedra (artigo 25.º do RGEU).....	22
Quadro 3.3	Valores (médios) de referência de propriedades mecânicas (mínimos e máximos) e do peso específico de alvenarias de Itália (Tabela C8A.2.1 da NTC 08).....	32
Quadro 3.4	Fatores corretivos das propriedades mecânicas de alvenarias de Itália (Tabela C8A.2.2 da NTC 08) .....	33
Quadro 4.1	Resultados dos ensaios com macacos planos .....	59
Quadro 4.2	Valores da tensão máxima atingida e de módulo de elasticidade obtidos em outras campanhas experimentais realizadas em alvenarias de granito, em Portugal .....	59
Quadro 4.3	Resultados do ensaio de compressão uniaxial.....	62
Quadro 5.1	Proposta de valores de referência: Alvenaria de calcário (1) .....	70
Quadro 5.2	Proposta de valores de referência: Alvenaria de calcário (2) .....	70
Quadro 5.3	Proposta de valores de referência: Alvenaria de calcário (3).....	71
Quadro 5.4	Proposta de valores de referência: Alvenaria de calcário (4).....	71
Quadro 5.5	Proposta de valores de referência: Alvenaria de calcário (5).....	72
Quadro 5.6	Proposta de valores de referência: Alvenaria de calcário (6).....	72
Quadro 5.7	Proposta de valores de referência: Alvenaria de basalto .....	73
Quadro 5.8	Proposta de valores de referência: Alvenaria de granito (1) .....	73
Quadro 5.9	Proposta de valores de referência: Alvenaria de granito (2) .....	74
Quadro 5.10	Proposta de valores de referência: Alvenaria de granito (3) .....	75
Quadro 5.11	Proposta de valores de referência: Alvenaria de granito (4) .....	76
Quadro 5.12	Proposta de valores de referência: Alvenaria de granito (5) .....	76
Quadro 5.13	Proposta de valores de referência: Alvenaria de xisto (1).....	77
Quadro 5.14	Proposta de valores de referência: Alvenaria de xisto (2).....	78

## SIMBOLOGIA

$A_{MW}$	área da secção transversal da alvenaria
$A_s$	área transversal das juntas impedidas de se deformarem transversalmente
$b$	largura da pedra
$D$	diâmetro da carote de pedra
$E_{mas}$	módulo de elasticidade da alvenaria (valor médio)
$f$	fator de forma
$f_b$	resistência da unidade de alvenaria à compressão (valor médio)
$f_m$	resistência da argamassa à compressão (valor médio)
$f_{mas}$	resistência da alvenaria à compressão (valor médio)
$f_{mc}$	resistência da argamassa, obtida a partir de cubos, de acordo com a norma DIN 18555
$G$	módulo de distorção
$h$	altura da parede
$K$	coeficiente que traduz a influência do tipo de bloco, do tipo de argamassa, da direção de carregamento e da configuração das juntas na resistência da alvenaria à compressão
$k$	constante de proporcionalidade entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão da alvenaria
$k_a$	coeficiente que traduz a relação entre a área de contacto do macaco com a alvenaria e a área do macaco
$k_m$	coeficiente adimensional que relaciona a pressão aplicada pelo sistema hidráulico com a pressão efetivamente transmitida à alvenaria
$L$	comprimento da carote de pedra
$m$	massa
$p$	valor da pressão aplicada pelo macaco plano que restaura a configuração inicial da alvenaria
$t$	espessura mínima da parede
$t_h$	altura da junta
$\ddot{u}$	fator de transferência
$\sigma_m$	valor médio da tensão instalada na parede
$\alpha$	expoente que traduz o peso da resistência da pedra na resistência da alvenaria
$\beta$	expoente que traduz o peso da resistência da argamassa na resistência da alvenaria
$\gamma$	peso específico (valor médio)
$\tau_0$	resistência ao corte (valor médio)

## **ABREVIATURAS**

ASTM - American Society for Testing and Materials

CEN - Comité Européen de Normalisation

COE - Council of Europe

DIN - Deutsches Institut für Normung

FEMA - Federal Emergency Management Agency

ICC - International Code Council

ICOMOS - International Council of Monuments and Sites

IMO - International Museums Office

INE - Instituto Nacional de Estatística

IPQ - Instituto Português da Qualidade

ISO - International Organization for Standardization

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LUM - Loadbearing Unit Masonry

MSJC - Masonry Standards Joint Committee

NTC - Norme Tecniche per le Costruzioni

RILEM - Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de  
construction et ouvrages

RGEU - Regulamento Geral de Edificações Urbanas

UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais e motivação

Os centros urbanos antigos constituem um dos principais testemunhos da riqueza criativa e inventividade do ser humano, desempenhando um importante papel no seu desenvolvimento equilibrado, quer enquanto indivíduo, quer enquanto membro inserido numa comunidade. Após anos de falta de manutenção (quando não mesmo abandono), o elevado nível de degradação a que chegaram, no nosso país, grande parte destas zonas, representa uma ameaça, não só para o património edificado, mas também para todo um património imaterial de relações sociais, hábitos, costumes e tradições. Estas zonas constituem assim um património que interessa proteger, tanto por meio da recuperação e reabilitação do edificado como da revitalização social, absolutamente essencial neste contexto.

### 1.1.1 O parque edificado e a reabilitação na realidade portuguesa

A existência de várias dificuldades metodológicas e estatísticas associadas à quantificação do mercado de reabilitação não obsta a que seja reconhecida, em Portugal, a realidade do menor investimento no sector da reabilitação, em comparação com o panorama europeu; no ano de 2011, o segmento da reabilitação de edifícios representou cerca de 26 % da produtividade do setor da construção em Portugal, enquanto a média europeia se situava nos 35 %. Por outro lado, o aumento da representatividade do segmento da reabilitação no setor da construção que se tem verificado nos últimos anos, em particular desde 2002, resultou não apenas do aumento do número de obras de reabilitação, mas sobretudo da diminuição do número de construções novas concluídas: os fogos reabilitados representavam em 2001 1.9 % do total de fogos concluídos (2168 fogos de um total de 115 607 fogos), subindo em 2011 para 18.5 % (5814 fogos em 31 381 fogos); no mesmo período, houve um decréscimo de 72.9 % na denominada construção nova (INE, I.P. e LNEC, I.P., 2013).

Quando se notam já sinais evidentes da dinamização do mercado imobiliário nas zonas antigas das cidades, motivada pela cada vez maior perceção da atratividade destas zonas e pela emergência do conceito da cidade enquanto “marca”, e de modo a que as necessárias intervenções no edificado presente nestas zonas não se façam, por desconhecimento técnico e/ou científico, recorrendo a intervenções intrusivas que comprometem a autenticidade patrimonial e a própria segurança estrutural deste parque edificado, assume importância a adequada caracterização do comportamento mecânico destas construções.

## 1.2 Objetivos

A caracterização do comportamento mecânico de paredes de alvenaria de granito, típicas do norte de Portugal, foi já alvo de alguns estudos, tanto *in situ* (Sousa, 2010; Miranda, 2011) como em ambiente laboratorial (Vasconcelos, 2005; Lourenço e Oliveira, 2006; Almeida, 2013; Ferreira *et al.*, 2015). No entanto, a existência de culturas construtivas geograficamente localizadas, que se reflete em diferentes tipologias de paredes construídas com um mesmo material pétreo, impõe que a caracterização mecânica destes elementos estruturais seja feita numa base regional e/ou local.

No caso particular da cidade de Viseu, verifica-se a falta de informação relativa às propriedades mecânicas das paredes de alvenaria de pedra de granito presentes no seu núcleo antigo. Assim, e com vista a informar intervenções de reabilitação estrutural que privilegiem a manutenção do sistema resistente original do edificado antigo corrente nesta zona, este trabalho pretende apresentar um primeiro contributo para a caracterização das propriedades mecânicas destes elementos estruturais. Pretende-se, nomeadamente, e além da caracterização geométrica e material destas paredes, quantificar parâmetros de resistência e deformabilidade a considerar em fase de avaliação da segurança e projeto de intervenção.

Numa fase posterior, procede-se a uma recolha crítica da informação disponível na literatura relativa à caracterização mecânica de alvenarias de pedra, de diferentes tipologias, para a realidade portuguesa. Pretende-se assim apresentar uma primeira proposta de valores de referência a considerar, como primeira aproximação, na modelação numérica, avaliação da segurança ou projeto de reforço de construções antigas de alvenaria de pedra.

## 1.3 Metodologia e recursos

Este trabalho comporta componentes tanto de síntese da literatura existente como de trabalho de campo. Nesta última, são privilegiadas as metodologias não- ou semi-destrutivas. Assim, a campanha desenvolvida compreendeu as seguintes atividades:

- Caracterização geométrica e tipológica das paredes ensaiadas;
- Realização de ensaios de macacos planos, com vista à caracterização experimental *in situ* das principais propriedades mecânicas das paredes de alvenaria sujeitas a cargas verticais (resistência à compressão e módulo de elasticidade), bem como à avaliação do estado de tensão instalado;

- Ensaio em laboratório de uma amostra de pedra granítica recolhida de uma das paredes ensaiadas.

## 1.4 Estrutura

A presente dissertação é constituída por 6 capítulos, consistindo o primeiro na apresentação do trabalho, seu enquadramento, metodologia e objetivos.

No capítulo 2 é introduzido o desenvolvimento histórico da perceção da necessidade de salvaguarda dos núcleos urbanos antigos enquanto património, bem como os princípios a ter em conta aquando da intervenção no edificado presente nestas zonas. É feita ainda uma análise do enquadramento normativo da intervenção nas construções existentes, do ponto de vista da sua adequação às especificidades da reabilitação estrutural do edificado corrente de valor patrimonial.

O capítulo 3 tem início com a descrição da tecnologia construtiva de alvenaria de pedra, tendo em conta informação relativa ao período histórico em que esta constituía a técnica construtiva predominante em Portugal. São depois apresentadas várias formulações de estimativa do comportamento mecânico de alvenarias de pedra, referindo a sua adequabilidade ou desajuste, com base em resultados de campanhas experimentais presentes na literatura. Aborda-se ainda a importância da caracterização tipológica, com referência a alguns resultados padrão presentes em normas internacionais.

No capítulo 4 descreve-se a campanha de caracterização *in situ* levada a cabo, com foco na técnica de ensaio com macacos planos. Após uma caracterização sumária das tipologias de alvenarias de pedra presentes na zona em estudo, são descritos os edifícios utilizados como casos de estudo e os procedimentos adotados, bem como apresentados os resultados obtidos. Para além da informação relativa à caracterização das alvenarias, são discutidas algumas conclusões acerca da aplicação da técnica de macacos planos a alvenarias semelhantes às estudadas.

No capítulo 5 esboça-se uma primeira proposta de valores de referência para as propriedades mecânicas das alvenarias presentes nos núcleos urbanos antigos de Portugal, partindo da recolha crítica da informação disponível na literatura técnica, académica e científica.

Apresentam-se por último, no capítulo 6, as principais conclusões retiradas do trabalho desenvolvido. São igualmente referidas algumas linhas de trabalho com vista a aprofundar o conhecimento desta temática.

## 2 SALVAGUARDA E PRESERVAÇÃO DO EDIFICADO EM CENTROS URBANOS ANTIGOS

A preservação do edificado estava no passado restrita a conjuntos edificados específicos, geralmente de carácter militar ou religioso (mais tarde também monumental). Esta manutenção era no entanto fundada em considerações utilitaristas, sem qualquer enquadramento doutrinal ou metodológico. Até meados do século XX, a cidade era assim percebida como mero ambiente para determinados edifícios singulares a que era atribuído um significado especial.

As cidades constituem um dos principais testemunhos da riqueza criativa e inventividade do ser humano, desempenhando um importante papel no seu desenvolvimento equilibrado, quer enquanto indivíduo, quer enquanto membro inserido numa comunidade.

Os núcleos urbanos antigos são o testemunho material da história, desenvolvimento e ocupação de uma cidade, vila ou aglomerado (Ferreira *et al.*, 2013), evoluindo quer em termos da sua disposição espacial, tecnológica e construtiva, quer também enquanto espaço de hábitos, costumes, tradições e narrativas, que contribuem em conjunto para a definição do *espírito do lugar*.

A designação de arquitetura *menor*, atribuída por vezes às construções presentes nestas zonas, trai na verdade um preconceito; de facto, esta arquitetura e esta forma de construir são, no âmbito da história da evolução da estrutura urbana, tão ou mais significativas do que o grande edifício, a casa nobre, o palácio ou os edifícios religiosos ou do poder civil, já que para estas construções contribuem geralmente forças exteriores à comunidade e às suas vivências.

A salvaguarda do edificado corrente presente nessas zonas impõe-se assim não apenas pelo valor histórico, artístico ou técnico de toda e cada uma destas construções, mas sobretudo pelo carácter de todo coerente, pela unidade de conjunto que constitui no âmbito da cidade. De facto, e de acordo com o artigo 8.º da Carta de Cracóvia (Cracóvia 2000, 2000):

“[...] *Os edifícios que compõem as zonas históricas podem não apresentar valor arquitetónico especial em si mesmos, mas devem ser salvaguardados pela sua unidade orgânica, dimensões particulares e características técnicas, espaciais, decorativas e cromáticas, insubstituíveis dentro da unidade orgânica da cidade. [...]*”



## 2.1 Os centros urbanos antigos na segunda metade do século XX

As extensas necessidades de reconstrução em várias cidades europeias (como Varsóvia, Dresden, Berlim, Munique, Londres ou Saint-Malo) em resultado da II Guerra Mundial (Figura 2.1) vieram levantar vários debates sobre as abordagens a seguir. Na verdade, se a recusa dos restauros estilísticos indicada na Carta de Atenas (IMO, 1931) recolhia um consenso genérico, a escala da destruição material e civilizacional fazia reequacionar vários dos pressupostos antes aceites, que pareciam não se adequar a esta realidade.



Figura 2.1 – Centro urbano antigo de Varsóvia destruído na 2ª Guerra Mundial

Em alguns casos, os edifícios foram reconstruídos de acordo com a aparência que tinham antes da guerra, ou com pequenas alterações. Outros casos houve, em que se recorreu à introdução de materiais e da arquitetura moderna em zonas históricas consolidadas (Jokilehto, 1986).

Foi neste contexto de falta de uma abordagem uniformizada à conservação do património arquitetónico que, em 1964, teve lugar em Veneza o 2.º Congresso Internacional dos Arquitetos e Técnicos dos Monumentos Históricos, que culminaria na aprovação da Carta

Internacional de Conservação e Restauro dos Monumentos e Sítios (ICOMOS, 1964). Este documento, que ficaria conhecido como Carta de Veneza, não fazia qualquer referência à conservação de zonas urbanas, para além de servirem enquanto enquadramento para os edifícios monumentais. No entanto, a necessidade de salvaguardar estas zonas antigas foi um dos temas salientados no Congresso, sendo incluído, enquanto objetivo, na sua 8.<sup>a</sup> Resolução.

Ao longo da década de 1970, a salvaguarda das zonas históricas recolheria cada vez mais atenção, com a publicação de um conjunto de documentos que abordavam esta temática, como a Resolução do Simpósio sobre a Introdução da Arquitetura Contemporânea em Grupos Antigos de Edifícios (ICOMOS, 1972), as Resoluções de Bruges - Princípios da Reabilitação de Cidades Históricas (ICOMOS, 1975a), ou as Resoluções do Simpósio Internacional sobre a Conservação de Cidades Históricas Pequenas (ICOMOS, 1975b). Nestes documentos eram abordadas questões como a introdução harmoniosa da arquitetura contemporânea em zonas antigas, a necessidade de proteger os direitos dos moradores mais desfavorecidos, a necessidade de enquadrar a conservação das zonas e cidades antigas no âmbito do planeamento regional e urbano, ou de adaptar os núcleos antigos às necessidades da vida contemporânea.

A Carta Europeia do Património Arquitetónico (COE, 1975), adotada pelo Conselho da Europa em Setembro de 1975, e a Declaração de Amesterdão (Congresso sobre o Património Arquitetónico Europeu, 1975), publicada em Outubro do mesmo ano, assinalam o fim do vínculo exclusivo do entendimento de património à ideia de bem monumental. A partir daí, também esta arquitetura *corrente* dos centros urbanos passa a ser entendida como elemento de valor patrimonial.

A Carta Europeia do Património Arquitetónico (COE, 1975) chama a atenção para os perigos que as tecnologias modernas podem comportar para as estruturas antigas, se mal aplicadas, bem como para a importância da disseminação do conhecimento relativo à intervenção em construções antigas e da preservação e salvaguarda do *know-how* de artistas e artesãos versados nas práticas tradicionais. É também salientada a necessidade da integração da conservação arquitetónica no âmbito mais alargado do planeamento urbano, consubstanciada na noção de Conservação Integrada.

Estes dois textos traduzem ainda a primeira tentativa de desenvolver a conservação do património num alinhamento de desenvolvimento sustentável, reduzindo o desperdício e combatendo o *sprawl* urbano. Nestes documentos, era também perceptível a necessidade de adaptar os edifícios históricos de modo a que desempenhassem funções capazes de responder às necessidades contemporâneas. Este conceito de adaptar o existente aos novos usos e necessidades, dando um papel contemporâneo aos edifícios e às cidades históricas, viria a

servir de base, no ano seguinte, para um outro texto normativo, da responsabilidade da UNESCO, as Recomendações acerca da Salvaguarda e Papel Contemporâneo das Zonas Históricas (UNESCO, 1976).

Em todos estes documentos era perceptível a importância das dimensões humanas na definição da natureza específica das denominadas *áreas históricas*, bem como a necessidade de se estabelecer um compromisso entre as várias exigências aplicáveis à intervenção no edificado, por vezes conflitantes, como segurança estrutural, autenticidade histórica ou garantia de condições de conforto. Cada vez mais se reconhecia o papel destas zonas enquanto testemunho da especificidade de cada comunidade, o que era particularmente relevante face à universalização das técnicas construtivas e das formas arquitetónicas, que poderiam levar a uma homogeneização do ambiente construído e, em consequência, ao empobrecimento das experiências sociais e culturais. Emergia ainda a preocupação com as alterações no tecido social destas zonas, que deveriam ser evitadas, e a perceção da necessidade de acompanhar as ações de intervenção construtiva com iniciativas de revitalização.

As especificidades da salvaguarda e gestão de cidades e áreas urbanas históricas, entendidas para além do mero edificado, levariam à necessidade de alargar os princípios e metodologias definidos na Carta de Veneza. Em 1987 foi aprovada a Carta Internacional para a Salvaguarda das Cidades Históricas (ICOMOS, 1987), mais conhecida por Carta de Washington.

## **2.2 Abandono e recuperação de centros urbanos antigos**

Também durante a segunda metade do século XX, o surgimento de novos padrões de conforto e formas de habitar, que não se coadunavam com o edificado existente nem com a estrutura urbana dos centros históricos, levavam à desocupação progressiva destas zonas. Muitos edifícios foram assim abandonados, ficando, em consequência, mais expostos a um conjunto alargado de agentes de degradação (de origem natural e humana). Por outro lado, os residentes que permaneciam constituíam geralmente as camadas economicamente mais desfavorecidas, e, por isso, menos propensas a realizarem as necessárias operações de manutenção e conservação. Verificava-se assim uma tendência para, tanto o parque habitacional não habitado como o habitado, por insuficiência de meios dos proprietários, carecer de manutenção.

No caso português, não afetado pela guerra que assolou a Europa entre 1939 e 1945, é de referir o desenvolvimento de intervenções ditadas pelo regime do Estado Novo, que levaram, em alguns casos, ao completo redesenho da estrutura urbana (Figura 2.2), e o congelamento das rendas durante grande parte do século XX, situação que levou à diminuição gradual da

capacidade e do estímulo à realização, por parte dos proprietários, de obras de conservação e manutenção do edificado.



Figura 2.2 – Demolição do Largo do Castelo, atual Praça D. Dinis, Coimbra

Já nos últimos anos do século XX, as facilidades de acesso ao crédito à habitação impulsionariam o segmento da construção nova, geralmente nas periferias, provocando o aumento das áreas artificializadas e contribuindo cada vez mais para a desertificação destes núcleos antigos.

O nível de degradação a que chegaram grande parte dos centros urbanos antigos do nosso país, após anos de falta de manutenção — quando não mesmo abandono — representa assim uma ameaça não só para o património edificado, mas também para todo um património imaterial de relações sociais, hábitos, costumes e tradições. Estas zonas constituem assim um património que interessa proteger, tanto por meio de recuperação e reabilitação do edificado como de revitalização social.

### **2.3 Princípios de intervenção no edificado antigo**

Para além do seu valor artístico ou histórico, também a técnica construtiva utilizada contribui para o valor intrínseco da construção (Mascarenhas, 2002; ICOMOS, 2003), sendo a remoção da estrutura interior e manutenção da fachada um procedimento incompatível com os critérios de conservação. São por isso de privilegiar, quando possível, intervenções integradas de manutenção da estrutura e do seu funcionamento estático.

A escolha entre técnicas tradicionais e inovadoras deverá ser ponderada caso a caso, sendo que deve ser dada preferência às técnicas menos invasivas e mais consonantes com a preservação do valor patrimonial, tendo em consideração as exigências de segurança e durabilidade (ICOMOS, 2003). Por outro lado, muitos dos conhecimentos práticos tradicionais necessários à intervenção no edificado antigo das nossas cidades encontram-se em risco de desaparecimento; além do seu desaparecimento do seio da comunidade técnica (junto de arquitetos e engenheiros), nas últimas décadas vocacionada sobretudo para a construção em betão armado ou aço, verifica-se também o desaparecimento da própria mão-de-obra, os operários e mestres pedreiros e carpinteiros versados nas práticas tradicionais. Importa, pois, promover e propiciar a salvaguarda deste saber-fazer, através do inventário, promoção e recuperação dos saberes e das técnicas tradicionais, bem como a promoção de formações especializadas nestes processos de construção.

No âmbito do princípio da mínima intervenção, nenhuma ação deve ser empreendida sem se demonstrar que é indispensável. Para isto, é necessário um conhecimento aprofundado das características estruturais e materiais da construção a tratar, das técnicas e tecnologias construtivas presentes, das alterações que sofreu ao longo dos tempos, bem como do seu estado atual (ICOMOS, 2003). As intervenções deverão ser dirigidas às causas que provocaram os danos, e não apenas aos sintomas. A manutenção adequada pode limitar a necessidade de uma intervenção posterior (ICOMOS, 2003).

A adaptação destes edifícios às necessidades da vida contemporânea, um passo essencial para a sua preservação, deverá ser feita sem destruir a sua estrutura e autenticidade, sendo desejável que os novos usos sejam compatíveis com os originais (Valluzzi, 2007).

Frequentemente, a aplicação dos níveis de segurança adotados no dimensionamento de construções novas à avaliação da segurança de construções existentes requer medidas muito intrusivas, quando não técnica e financeiramente impossíveis de concretizar. Nestes casos, níveis de segurança inferiores podem ser aceites, se adequadamente justificados com base em critérios socioeconómicos (ISO, 2010).

## **2.4 Enquadramento normativo da intervenção estrutural em construções existentes**

A realização de acrescentos, expansões e renovações é uma característica inerente às construções existentes (e conseqüentemente das zonas em que se encontram inseridas); estas intervenções fazem parte da identidade da construção, contribuindo até, em alguns casos, para a sua riqueza patrimonial. Paralelamente, estas alterações não têm de acarretar necessariamente uma diminuição da segurança estrutural do edifício, desde que efetuadas com

competência, isto é, utilizando a mesma tecnologia construtiva utilizada na sua construção original (Carocci, 2001).

Verifica-se no entanto que em intervenções no edificado antigo, a avaliação das condições de segurança estrutural é frequentemente esquecida ou minorizada (Vicente, 2008). Nem mesmo ao nível de estratégias nacionais de reabilitação do edificado urbano a segurança estrutural tem recebido a devida atenção (Cóias, 2007), ao contrário do que se verifica, por exemplo, com outras exigências como os requisitos de estanquidade ou eficiência energética.

O Decreto-Lei n.º 307/2009, de 23 de outubro (Governo da República Portuguesa, 2009), que veio estabelecer o Regime Jurídico da Reabilitação Urbana, estipula, no seu artigo 51.º, que as obras de reabilitação “*observem as opções de construção adequadas à segurança estrutural e sísmica*” dos edifícios intervencionados.

Em 2010, a Resolução da Assembleia da República n.º 102/2010, “Adopção de medidas para reduzir os riscos sísmicos” (Assembleia da República Portuguesa, 2010), recomendava ao Governo que assegurasse a obrigatoriedade de segurança estrutural antissísmica nos programas de reabilitação urbana, existentes ou a criar.

Ao mesmo tempo, o Regime Jurídico da Urbanização e Edificação, consubstanciado no Decreto-Lei n.º 555/99, de 16 de dezembro, com redação dada atualmente pelo Decreto-Lei n.º 214-G/2015, de 02 de outubro (Governo da República Portuguesa, 2015), isenta de controlo prévio “*as obras de alteração no interior de edifícios ou suas frações que não impliquem modificações na estrutura de estabilidade*”, com exceção para “*as obras de conservação, reconstrução, ampliação, alteração ou demolição de imóveis classificados ou em vias de classificação, bem como de imóveis integrados em conjuntos ou sítios classificados ou em vias de classificação, e as obras de construção, reconstrução, ampliação, alteração exterior ou demolição de imóveis situados em zonas de proteção de imóveis classificados ou em vias de classificação*”, que sujeita a licença administrativa.

A lei é, no entanto, omissa quanto à forma como se avaliam as implicações das obras em termos de alteração estrutural. Este vazio legal faz com que esta decisão possa ser tomada com base em análises muitas vezes simplistas e pouco informadas.

Assim, apenas uma parte diminuta do parque edificado português (que não inclui a totalidade dos edifícios a que pode ser reconhecido valor patrimonial) se encontra sujeita a algum mecanismo de controlo prévio, podendo eventuais intervenções incidir sobre os elementos resistentes verticais (como a remoção de pilares, arcos e nembos em alvenaria, para a criação de espaços comerciais amplos, ou o seu corte parcial para execução de diversas instalações,

como o abastecimento de água, esgotos, rede elétrica e gás), sem que seja levada a cabo uma avaliação das suas implicações para a segurança estrutural e sísmica do edifício.

Ainda como exemplo claro da subvalorização da segurança estrutural, pode ser referido o Regime Excepcional de Reabilitação de Edifícios e Frações, instituído pelo Decreto-Lei n.º 53/2014, de 8 de abril (Governo da República Portuguesa, 2014), e posteriormente alterado pelo Decreto-Lei n.º 194/2015, de 14 de setembro (Governo da República Portuguesa, 2015), aplicável à reabilitação de edifícios ou de frações cuja construção tenha sido concluída até 9 de abril de 1984 ou estejam localizados em áreas de reabilitação urbana, e que se destinem a ser total ou predominantemente afetos a uso habitacional; no que respeita às exigências estruturais, o artigo 9.º deste diploma, o único que aborda as questões de segurança estrutural, refere apenas que “*As intervenções em edifícios existentes não podem diminuir as condições de segurança e de salubridade da edificação nem a segurança estrutural e sísmica do edifício*”. Iniciado em 2014, este Regime Excepcional tem uma duração de 7 anos, um período que se afigura demasiado longo para a prevalência de um diploma que legitima a colocação no mercado (muitas vezes com vários incentivos fiscais e financeiros) de edifícios de reconhecida vulnerabilidade sem que uma avaliação apurada da segurança estrutural seja efetuada, além de tornar mais difícil (por relutância dos proprietários) a realização posterior de uma campanha de intervenções mais informada.

Além da ausência de exposição recente à ação devastadora de um evento sísmico de moderada ou alta intensidade (Vicente *et al.*, 2005), o escasso conhecimento do comportamento destes edifícios, devido à sua complexidade geométrica, heterogeneidade e variabilidade dos materiais utilizados, e a ausência de disposições legais que regulem, do ponto de vista técnico, a intervenção no edificado antigo, são também fatores que ajudam a explicar esta quase total ausência de preocupação com as questões da segurança estrutural e da vulnerabilidade sísmica.

A consciência da necessidade da preservação dos testemunhos históricos de eras anteriores, por um lado, e a perceção das ameaças que os sismos causam a esses testemunhos, por outro, surgiram de forma muito vincada em Itália, quer devido à importância seminal que desempenharam na criação de uma identidade europeia e, por assim dizer, ocidental, os contributos culturais da antiga Roma, da Renascença ou da Igreja Católica, quer por o território italiano se ver frequentemente atingido por ocorrências sísmicas de moderada e elevada intensidade. O conhecimento técnico e científico, bem como a realidade legislativa, no que à proteção do edificado (corrente e monumental) diz respeito, encontram-se por isso, em Itália, num grau de desenvolvimento ímpar a nível internacional.

Em Portugal, a ausência de documentos normativos tem sido um obstáculo a que as intervenções em estruturas de alvenaria e madeira, que constituem grande parte das estruturas resistentes do edificado presente nos centros urbanos antigos do nosso país, sejam levadas a cabo com confiança pelos projetistas encarregues dos projetos de reabilitação do edificado. No caso das estruturas de madeira, é ainda de salientar a permanência de um conjunto de mitos infundados relativos à sua durabilidade e qualidades mecânicas, que fazem recluir a manutenção destes elementos, independentemente das suas efetivas propriedades (Machado *et al.*, 2003). Este desconhecimento tem assim feito proliferar intervenções intrusivas, muitas vezes com recurso à introdução de estruturas independentes de betão armado, conduzindo não só à adulteração patrimonial de uma parte importante do nosso parque edificado mas assumindo-se também, frequentemente, como fontes acrescidas de anomalias e vulnerabilidades, nomeadamente em caso de evento sísmico. A substituição de pavimentos de madeira por lajes de betão armado, em especial, tida como solução de qualidade indiscutível, provoca na esmagadora maioria das vezes um agravamento das condições de segurança estrutural e sísmica do edifício, pelo acréscimo de massa e rigidez que comporta.

Por outro lado, o enorme corpo legislativo que regula a atividade da construção, além de disperso por inúmeros documentos, encontra-se desajustado das especificidades técnicas do segmento da reabilitação (em particular as de reabilitação estrutural), por ter sido criado numa altura em que predominava a construção nova, geralmente à base de soluções em betão armado ou, em menor quantidade, aço estrutural.

Além disso, verifica-se frequentemente um desajuste (ou mesmo ausência) dos critérios relativos às qualificações a exigir a projetistas e outros técnicos com funções em obras de reabilitação, geralmente estabelecidos através de níveis de qualificação ou anos de experiência, sem a necessária especificidade.

Também o regime de acesso e permanência na atividade de construção, presentemente vertido na Lei n.º 41/2015, de 3 de junho (Assembleia da República Portuguesa, 2015), se encontra desajustado da complexidade técnica e científica do segmento da reabilitação, já que isenta do requisito de demonstração de capacidade técnica os empreiteiros de obras particulares. Este desajuste é ainda agravado tendo em consideração o facto de predominar em Portugal, no setor da construção, mão-de-obra de reduzidos níveis de escolaridade, geralmente pouco sensível à necessidade de formação, o que é tanto mais relevante quando o mercado da construção se tende a redirecionar para este segmento, depois da estagnação da construção nova.

Relativamente a documentos normativos, a entrada em vigor da Parte 3 do Eurocódigo 8 (CEN, 2005), que versa especificamente sobre a avaliação e o reforço de edifícios, constituirá



---

um primeiro passo para que técnicos e projetistas disponham de informação mais detalhada relativa ao comportamento destas estruturas, bem como das intervenções mais adequadas.

Impõem-se, no entanto, algumas considerações acerca da aplicabilidade deste documento a estruturas antigas de alvenaria de pedra, particularmente aquelas inseridas em edifícios de valor patrimonial. De facto, se bem que reconheça, na alínea (5) do parágrafo 1.1, a necessidade de abordagens específicas para os edifícios de valor patrimonial, distintas das aplicáveis aos edifícios correntes, a Parte 3 do Eurocódigo 8 é omissa relativamente a prescrições desse tipo. É igualmente omissa relativamente à qualidade da alvenaria, fator de extrema importância para a avaliação do seu comportamento. Um outro fator não abordado por esta norma diz respeito à existência de continuidade estrutural entre as construções presentes nos centros urbanos antigos, e às implicações para o comportamento mecânico das construções (Borri e de Maria, 2009).

Relativamente ao Eurocódigo 6 (CEN, 2005), em especial na sua Parte 1-1, são de salientar as prescrições que dizem respeito à definição de leis constitutivas e propriedades mecânicas de paredes de alvenaria. A aplicação desta norma a construções antigas de alvenaria de pedra encontra, no entanto, várias restrições, sendo a exigência de uma distribuição regular dos elementos que constituem a parede o maior entrave. Também a obrigatoriedade da existência de argamassa condiciona a aplicação deste documento, já que não é rara a existência de paredes de alvenaria de pedra de junta seca. Por outro lado, os elementos resistentes geralmente encontrados nas construções antigas (pedras de forma mais ou menos irregular) não se enquadram em qualquer dos tipos de unidades de alvenaria considerados nesta norma.

Destas considerações resulta a necessidade do desenvolvimento ou aprofundamento de documentos normativos que abordem explicitamente o comportamento estrutural de edifícios antigos de alvenaria de pedra, com foco nas construções de valor patrimonial.

Também a formação especializada de técnicos no domínio das construções antigas, conjugada com a vontade política (Roque, 2002) e a sensibilização da sociedade para a importância da conservação do parque edificado, bem como da segurança estrutural e sísmica, serão mais-valias na salvaguarda da vida humana e na preservação de um património de reconhecida importância na sociedade contemporânea.

## **2.5 Considerações finais**

Entendidos tanto no seu plano edificado como no imaterial, os núcleos urbanos antigos representam um importante património das sociedades atuais, que interessa salvaguardar e

potenciar, tanto por meio de recuperação e reabilitação do edificado como de iniciativas de revitalização social.

Relativamente ao edificado presente nestas zonas, um passo essencial para a sua preservação consiste na sua adaptação às necessidades da vida contemporânea; esta deverá ser feita sem destruir a autenticidade das construções, sendo desejável que os novos usos que se lhes atribuíam sejam compatíveis com os originais (Valluzzi, 2007).

Para além do seu valor histórico e artístico, também a tecnologia construtiva contribui para o valor patrimonial destas construções, devendo por isso, e sempre que possível, ser preservada. Esta manutenção justifica-se igualmente por questões de segurança estrutural, já que as alterações de massa e rigidez causadas pela introdução de distintas tecnologias se afiguram como fonte de vulnerabilidades, especialmente em caso de ação sísmica. Impõe-se assim a adequada caracterização geométrica, tipológica e mecânica destas construções, de modo a melhor prever o seu comportamento face às ações de variada natureza a que devem fazer face.

No âmbito das intervenções no edificado existente, tem-se verificado que a avaliação das condições de segurança estrutural é frequentemente esquecida ou minorizada (Vicente, 2008). Ao mesmo tempo, constata-se que o enquadramento legislativo do setor da construção se encontra desajustado das especificidades das intervenções de reabilitação estrutural. Verifica-se ainda a necessidade de documentos normativos que abordem explicitamente o comportamento estrutural de edifícios antigos de alvenaria de pedra.

---

### 3 ALVENARIAS DE PEDRA EM CENTROS URBANOS ANTIGOS — TECNOLOGIA CONSTRUTIVA, COMPORTAMENTO MECÂNICO E CARACTERIZAÇÃO TIPOLOGICA

Não só a disponibilidade de materiais naturais, mas também fatores como a exposição solar, o regime de ventos, a orografia, a hidrografia, etc., conjugam-se para originar o surgimento de diferentes culturas construtivas. Portugal, um país de fortes assimetrias climáticas e geográficas, vê assim surgir ao longo do seu território um repertório arquitetónico e construtivo rico e variado.

A análise destas culturas construtivas tem permitido constatar a existência, no território continental, do que se pode designar, no que respeita aos elementos resistentes verticais, uma "cultura da pedra", no norte, e uma "cultura da terra", a sul, distinção cardeal essa feita de modo simplificado pela linha que une Leiria a Castelo Branco (Oliveira e Galhano, 2003). Para além dos materiais predominantes, também o desenvolvimento em altura e a correspondente distribuição funcional ajudam a estabelecer um esquema conceptual de tipificação da arquitetura corrente, válido pelo menos em meio rural. Assim, no Norte predominam as construções de dois pisos, com o superior destinado a habitação, sendo o granito e o xisto os tipos de pedra mais frequentes, geralmente à vista; já no Sul, a escassez de pedra e a boa qualidade da terra desta zona causaram o surgimento de edifícios em adobe e taipa, não associados a grandes desenvolvimentos em altura e geralmente caiados de branco. Na região Centro são de salientar as construções em calcário, na região de Coimbra (Vicente, 2008), e de adobe na zona de Aveiro (Silveira *et al.*, 2013, Varum *et al.*, 2008).

Esta tipificação de carácter geral não deverá fazer esquecer uma característica singular da arquitetura corrente em meio urbano, decorrente do carácter evolutivo dos núcleos habitacionais, que é a existência de estratificações, sobreposições, reaproveitamentos e acrescentos; esta evolução, muitas vezes diacrónica, tanto em altura como em planta, contribui para a complexidade tipológica e estrutural das construções presentes nestas zonas, manifestada muitas vezes na partilha de paredes meeiras, o que se reflete na dificuldade do trabalho de caracterização geométrica e mecânica destes edifícios.

Os edifícios que compõem os centros urbanos antigos portugueses possuem, normalmente, uma estrutura constituída por fundações (na maior parte dos casos diretas), paredes resistentes exteriores (nos edifícios com maior área de implantação, também interiores), simples

prolongamento das primeiras, e pavimentos, coberturas, tetos e escadas, normalmente de madeira (Pinho, 2007). Segundo Appleton (1991), consideram-se como paredes resistentes aquelas que, devido às suas características geométricas e mecânicas, contribuem de forma decisiva para a estabilidade do edifício, quando sujeito quer à ação das forças verticais quer à atuação de forças horizontais de natureza aleatória, nomeadamente vento e sismos.

Derivado do árabe (*al-bannā* = pedreiro), o termo “alvenaria” descreve uma grande diversidade de soluções construtivas observadas nas construções antigas, não só em termos dos seus materiais constituintes, mas também da técnica construtiva que se usa para os aplicar e garantir a sua estabilidade. Em termos gerais, “alvenaria” designa uma associação de elementos resistentes, como pedras, blocos, tijolos, etc., que poderão ou não ser ligados por uma argamassa de assentamento.

A expressão “alvenaria de pedra” refere-se assim ao material resultante da associação de um conjunto de pedras, de forma mais ou menos regular, designando na prática corrente o caso particular em que os elementos pétreos são aplicados com recurso a uma argamassa de assentamento. Já a expressão “alvenaria de pedra seca” designa o caso em que os elementos de pedra são assentes por simples justaposição, sem utilização de argamassa; podendo, em teoria, empregar-se esta designação para qualquer tipologia de alvenaria em que as juntas não são preenchidas, ela implica geralmente o uso de pedras de forma e dimensão irregular, excluindo blocos talhados de forma regular (tipologia que se agrupa sob a designação de “cantaria”).

*“[...] Os muros das edificações ordinarias são feitos de alvenaria, que toma denominações diversas conforme a natureza, dimensões e grau de aparelho das pedras, e o modo por que se obtem a sua ligação. Os muros de cantaria são construidos com alvenaria de pedra aparelhada; a alvenaria diz-se ordinaria quando é feita com pedras toscas, irregulares na fôrma e dimensões, e ligadas com argamassa ordinaria [...] Se não se faz uso de argamassa e as pedras se dispõem de modo a manterem-se no logar em que são collocadas, travando-se convenientemente entre si, ter-se-ha a alvenaria de pedra secca e os empedrados. [...]”*

(Leitão, 1896)

O tipo de pedra utilizado dependia de vários fatores, sendo o mais condicionante a disponibilidade de materiais locais. Para além da simples recolha nos terrenos, da extração em pedreiras ou da recolha em cursos de água, era ainda comum o reaproveitamento dos

materiais provenientes de construções ou elementos a demolir. A facilidade de os recolher e/ou processar, bem como as competências da mão-de-obra disponível para a sua aplicação, desempenhavam também certamente um papel na escolha do material a utilizar. É ainda visível a variabilidade das tipologias de alvenarias consoante a posição social dos proprietários originais: o maior poder económico dos estratos sociais mais elevados permitia o acesso não só a pedras de melhor qualidade como a elementos de maior dimensão e forma mais regular, com as consequentes melhores características de comportamento global da parede, bem como permitia contratar trabalhadores mais especializados (Figura 3.1).



Figura 3.1 – *O estaleiro* (Canaletto, c. 1725)

Apesar da heterogeneidade das alvenarias em função da disponibilidade de pedra e da tecnologia construtiva local (Binda, 2000), as paredes resistentes apresentam um conjunto de características comuns, das quais importa referir a sua elevada espessura, que pode em alguns casos atingir 1.50 m. Esta dimensão permite, por via do elevado peso próprio que comporta, mobilizar momentos estabilizadores que equilibram as forças verticais excêntricas e as forças horizontais derrubadoras e deslizantes, resultantes por exemplo da ação de pavimentos, de impulsos de terra ou até de impulsos horizontais de arcos e abóbadas. Esta elevada espessura permite ainda minorar o risco de instabilidade por encurvadura e, no caso de paredes exteriores, fazer face aos requisitos de isolamento acústico, estanquidade à água e conforto térmico (isolamento térmico na estação de arrefecimento e inércia térmica na estação de aquecimento) que aquelas devem satisfazer.

A utilização de blocos talhados de forma paralelepípedica, geralmente com a mesma altura (permitindo portanto fiadas regulares), sem recurso a argamassa de assentamento, apresenta-se teoricamente como a melhor solução tendo em vista o equilíbrio da parede, uma vez que

as cargas são distribuídas de forma mais uniforme ao longo desta e não existem zonas de menor resistência. Por outro lado, a aplicação destes blocos talhados sem interposição de argamassa entre si leva a que a superfície de contacto efetiva entre pedras seja reduzida, dando origem a concentrações de tensões que podem comprometer a integridade destes elementos. Uma forma de obviar esta fragilidade consiste na introdução de juntas argamassadas, de modo a providenciar uma superfície de contacto contínua, que realize a transferência de cargas ao longo de toda a superfície exterior das pedras e não apenas de modo pontual. Um dos principais propósitos da argamassa é, assim, o de servir como elemento distribuidor de carga, mais do que funcionar como material adesivo (Geological Society, 1999). A utilização de argamassa permitia ainda recorrer a pedras menos regulares, geralmente aparelhadas apenas numa face. O maior custo de preparação de blocos talhados restringia também o seu uso a determinados programas, nomeadamente edifícios monumentais, em que as pedras ficavam à vista, tirando partido do impacto visual da sua regularidade dimensional, ou obras de arte, como pontes e aquedutos.

A despeito da sua menor qualidade, as alvenarias de pedra irregular, ou alvenarias ordinárias, apresentavam um conjunto de vantagens que popularizou o seu uso na denominada arquitetura corrente. Assim, em oposição à alvenaria de pedra talhada, a construção em alvenaria irregular saldava-se na maior facilidade de elevação e manuseio das pedras, menor custo, menor tempo de execução, e dispensa de mão-de-obra especializada.

Geralmente, estas paredes são constituídas por pedras de formas e dimensões irregulares (Figura 3.2), utilizadas tal como eram obtidas ou após um mínimo trabalho de preparo, e por vezes misturadas com fragmentos cerâmicos (ou mesmo tijolos maciços) ou outros elementos, aplicados com o propósito de preencher os vazios ou nivelar os elementos de maior dimensão.



Figura 3.2 – Paredes de alvenaria em centros urbanos antigos portugueses

---

Apesar da heterogeneidade das pedras utilizadas, no que concerne à forma e dimensões, as paredes não eram construídas de modo aleatório, antes a escolha, aplicação e disposição das pedras era conduzida de acordo com determinadas regras, parte da *praxis* do ofício.

Contrariamente às argamassas utilizadas na construção romana, com propriedades hidráulicas conferidas pelo uso de pozolanas, as argamassas geralmente presentes nas construções antigas datadas de períodos posteriores apresentavam resistências mecânicas bastante diminutas, manifestamente incapazes de conferir a coesão necessária para garantir à parede um comportamento monolítico (de Felice, 2011). Estas argamassas, cujo principal ligante era a cal aérea, em geral ao traço 1:3, eram assim utilizadas quase exclusivamente com o propósito de preencher os vazios e regularizar a superfície de contacto, distribuindo mais uniformemente a pressão pelos elementos pétreos (Pinho, 2007; Vicente, 2008; Ferreira, 2010). A utilização da cal aérea como principal ligante das argamassas de assentamento era ainda responsável pelos elevados tempos de endurecimento das argamassas, que se dá por fixação de dióxido de carbono, reagindo com o hidróxido de cálcio para formar carbonato de cálcio. Nalguns casos, a cal era substituída por outros ligantes mais pobres, como a terra ou o barro.

Algumas regras de boa construção consistiam em (Mascarenhas, 2002):

- Regar previamente as pedras, de modo a que não absorvessem rapidamente a água das argamassas;
- Assentar primeiramente as pedras da face, e só depois preencher o núcleo da parede;
- Garantir que nenhuma pedra estava em contacto com outra sem que entre estas estivesse interposta argamassa;
- Nivelar sistematicamente a parede, através da interposição de pedras mais regulares, com comprimento igual à espessura da parede, ou de tijolos; Breymann (1849), por exemplo, sugere um intervalo de 0.90 a 1.20 m entre fiadas de regularização;
- Providenciar um número suficiente de pedras que atravessem toda a espessura da parede, de modo a garantir a ligação entre os dois alçados, e consequentemente a estabilidade da parede; Swain (1927) sugere uma percentagem não inferior a 20 % da área do alçado.

---

A construção da parede prosseguia normalmente na direção horizontal, dispondo as pedras de modo a garantir tanto o travamento horizontal como a estabilização vertical, e com o cuidado de evitar a coincidência das juntas verticais.

As pedras estratificadas, como os calcários e os xistos, deveriam ser assentes segundo o leito da pedreira, i.e., de acordo com o seu plano de estratificação, de modo a evitar a delaminação ou rutura da pedra.

Mesmo em casos em que a zona corrente da parede era constituída por pedras de forma e dimensão irregulares, era comum o uso de pedras de maior dimensão e forma mais regular para reforço dos pontos singulares. O reforço dos cunhais, nomeadamente, adquiria especial importância, uma vez que estas são zonas de concentração de tensões que poderiam originar o desligamento das paredes ortogonais, bastando por vezes a ação térmica para desencadear esse processo. Os vãos das paredes (nomeadamente, as portas e janelas) poderiam ser também delimitados por tijolos cerâmicos. Em alguns casos, o reforço periférico dos vãos, bem como o dos cunhais, era também realizado com recurso a elementos de madeira (Vicente, 2008).

Os vãos das aberturas eram geralmente vencidos com recurso a arcos de ressalva realizados com tijolos cerâmicos, desviando as cargas provenientes das zonas superiores para os nembos de parede. Em décadas mais recentes, popularizar-se-ia o recurso a vergas de betão armado.

O guarnecimento dos vãos era executado com recurso a pedras de cantaria, que tomavam a designação de verga ou padieira, se recobriam a zona superior da abertura, ombreira, para os limites laterais, e peitoril ou soleira, no caso dos inferiores, para as janelas e portas respetivamente. Para a sua aplicação, deixava-se ao longo da parede um abaixamento, para acomodar a cantaria, que poderia ainda ser fixa à alvenaria da parede por meio de cavilhas (Pereira da Costa, 1955). O guarnecimento das aberturas poderia ainda ser realizado com argamassa.

Regra geral, a espessura das paredes resistentes de edifícios antigos não era constante em altura, diminuindo no sentido ascendente. Para além da otimização do material (as paredes dos pisos inferiores são naturalmente as mais solicitadas, necessitando por isso de maiores secções resistentes), esta diminuição de espessura permitia materializar o apoio da estrutura dos pavimentos de madeira, por meio de ressaltos no paramento inferior de cada parede, e ainda compensar a excentricidade da carga introduzida pelo pavimento, ajudando a manter a resultante dentro do núcleo central.



### 3.1 Dimensionamento

Antes do surgimento da análise estrutural moderna, a segurança das construções em alvenaria de pedra foi, ao longo dos séculos, garantida pela imposição de uma espessura mínima para as paredes, com base na altura da parede, número de pisos, tipo de ocupação, qualidade dos materiais empregues, distância entre fachadas, etc. Rondelet (1802), por exemplo, partindo da sistematização de diversas medições efetuadas, apresentou, para paredes de edifícios térreos construídas em alvenaria de tijolo, uma espessura mínima  $t$  dada em função da altura  $h$  da parede:

$$t = \frac{h}{8}; \frac{h}{10} \text{ ou } \frac{h}{12}$$

em ordem decrescente da estabilidade pretendida.

Para paredes em alvenaria de pedra eram considerados fatores corretivos, referidos no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Fatores corretivos para determinação da espessura de paredes de alvenaria de pedra (Rondelet, 1802)

Tipologia	Fator corretivo
Pedra talhada	$\frac{5}{8}$ a $\frac{3}{4}$
Alvenaria ordinária de pedra calcária regular e argamassa	$\frac{5}{4}$
Alvenaria ordinária com blocos irregulares de pedra calcária e argamassa	$\frac{7}{4}$ a $\frac{15}{8}$

Esta exigência de espessuras mínimas traduz na verdade condições de estabilidade ao derrube; a espessura deveria ser tal que aportasse à parede uma massa suficiente para garantir a estabilidade perante a rotação provocada por uma força horizontal equivalente a determinada percentagem das cargas gravíticas atuantes.

O Regulamento Geral de Edificações Urbanas (RGEU) (Ministério das Obras Públicas, 1951), cuja primeira versão foi publicada em 1951, já no período final da utilização das soluções construtivas em alvenaria de pedra, prescreve que a resistência das paredes das edificações correntes destinadas a habitação, quando construídas em alvenaria de pedra, poderia considerar-se assegurada se se adotassem as espessuras mínimas indicadas no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Espessura, em centímetros, de paredes de alvenaria de pedra (artigo 25.º do RGEU)

Ordem do andar (a partir de cima)		1	2	3	4	5	6	7
Paredes das fachadas	Talhada	28	28	32	-	-	-	-
	Irregular	40	40	50	60	72	80	90
Paredes das empenas	Talhada	28	28	32	32	32	-	-
	Irregular	40	40	40	50	50	60	60
Paredes de separação de habitações, paredes de caixa de escada e paredes interiores carregadas em geral	Talhada	22	22	22	22	28	28	32
	Irregular	-	-	-	-	40	40	50

### 3.2 Comportamento mecânico

Sendo constituída pela associação de diferentes materiais, dispostos e interligados com diferentes níveis de continuidade, e por vezes de geometria desconhecida, a alvenaria de pedra apresenta um comportamento mecânico cuja caracterização se reveste de particulares dificuldades. De facto, este material não cumpre qualquer das hipóteses normalmente assumidas para outros materiais de construção, como o betão e o aço (Binda e Saisi, 2002); de acordo com Huerta (2001):

*“[...] homogeneidade, isotropia, propriedades mecânicas uniformes, etc., todas as habituais assunções da moderna análise estrutural não podem neste caso ser feitas sem violência para o mais básico bom senso. [...]”*

Por esta razão, o comportamento de paredes de alvenaria de pedra irregular assente com argamassa de reduzida eficácia não pode ser adequadamente previsto com recurso a modelos derivados da Mecânica dos Meios Contínuos (Giuffré *et al.*, 1994).

O comportamento mecânico da alvenaria face a cargas gravíticas é representado pela resistência e pelo módulo de elasticidade em compressão, enquanto a resistência à tração e ao corte e o módulo de distorção condicionam a resposta da parede face a cargas horizontais, como as devidas à ação sísmica (Tomažević, 2005).

Enquanto material compósito, a alvenaria de pedra apresenta um comportamento dependente das características dos seus componentes. Quando submetidas a cargas gravíticas, as paredes de alvenaria exploram geralmente a sua capacidade resistente a esforços de compressão, situação para a qual apresentam bom desempenho, conferido pela elevada resistência mecânica das unidades de pedra a esta solicitação. No entanto, quando solicitadas à tração, as unidades de pedra apresentam, além de um comportamento frágil, uma reduzida resistência, geralmente inferior a um décimo da resistência à compressão (Quelhas *et al.*, 2014). Isto, em conjunto com a reduzida resistência da argamassa à tração (situação agravada com a perda de coesão ao longo do tempo, provocada por repetidos ciclos de gelo-degelo), confere à alvenaria de pedra uma diminuta resistência a esforços de tração. Esta reduzida resistência é a causa de algumas das mais importantes anomalias em estruturas de alvenaria, provocadas, nomeadamente, pela solicitação em tração resultante de ações de natureza aleatória (por exemplo, assentamentos diferenciais ou sismos).

Na maior parte dos casos, a argamassa constitui a componente menos resistente da alvenaria. Em alvenarias irregulares, no entanto, tanto as propriedades da argamassa como as características do aparelho assumem preponderância face à resistência das unidades de pedra, podendo controlar o comportamento global da alvenaria (Lourenço *et al.*, 2005; Pinho, 2007; Proske e van Gelder, 2009; Andreini *et al.*, 2014).

Verifica-se ainda que a redução da dimensão das unidades e o aumento da sua irregularidade, bem como da variabilidade das suas dimensões, implicam o aumento da quantidade de argamassa necessária para o assentamento, bem como da irregularidade das juntas, o que afeta negativamente as características mecânicas da alvenaria (Baggio e Carocci, 2000; Magenes *et al.*, 2010).

A influência da rugosidade da superfície de assentamento e do seu preenchimento no comportamento da alvenaria de pedra foram estudadas por Vasconcelos (2005), numa campanha experimental de ensaio de prismas de alvenaria de granito à compressão (Figura 3.3).

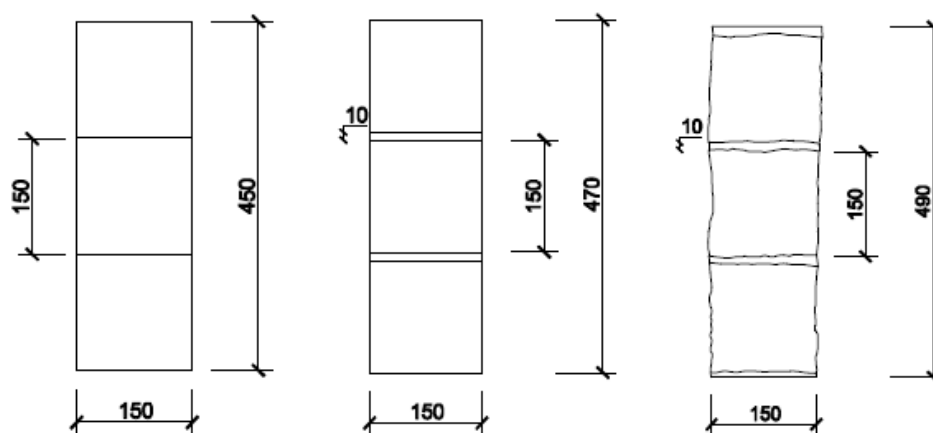


Figura 3.3 – Prismas de alvenaria de granito ensaiados à compressão (Vasconcelos, 2005)

Nesta campanha, face à situação de referência de pedras geometricamente regularizadas por corte mecânico, sobrepostas sem interposição de qualquer material intermédio, verifica-se que a rugosidade das juntas de assentamento se traduz numa diminuição tanto da resistência à compressão como do módulo de elasticidade, mais pronunciada neste último (29 % e 46 %, respetivamente). O preenchimento das juntas intermédias traduz-se igualmente numa diminuição das propriedades mecânicas da alvenaria, de magnitude diferente consoante o material considerado. Para além da utilização de argamassas de cal, também a terra era um material comumente utilizada no preenchimento das juntas de paredes de alvenaria de pedra. Por esse motivo, ambas as situações foram consideradas e analisadas no âmbito da campanha experimental conduzida por Vasconcelos (2005); para a primeira situação, verifica-se uma diminuição das propriedades mecânicas em cerca de 50 % e 70 % (resistência à compressão e módulo de elasticidade, respetivamente), enquanto na segunda a redução face à situação de referência é bem menor, de cerca de 12 % e 40 %. A utilização de unidades de pedra irregulares com argamassa de cal salda-se numa diminuição ainda maior das propriedades mecânicas, de cerca de 75 % e 90 %.

Apesar de se referirem apenas ao caso do granito e de não permitirem uma análise mais detalhada em função das propriedades mecânicas das pedras e da argamassa empregues, estes resultados permitem perceber, mesmo que apenas qualitativamente, a influência dos fatores acima mencionados no comportamento mecânico das alvenarias de pedra.

### 3.3 Estimativa das propriedades mecânicas da alvenaria

Na impossibilidade de realizar ensaios *in situ* que permitam obter valores das propriedades mecânicas específicos dos elementos estruturais em causa, existem já algumas expressões na bibliografia que podem ser utilizadas na estimativa da resistência de paredes de alvenaria, face a diversos tipos de solicitações, ou das suas propriedades de deformabilidade.

É comum assumir-se uma relação linear entre o módulo de elasticidade,  $E_{mas}$ , e a resistência à compressão da alvenaria,  $f_{mas}$ , dada por:

$$E_{mas} = k \times f_{mas} \quad (3.1)$$

onde o coeficiente  $k$  expressa a relação entre estas duas grandezas. O Eurocódigo 6 (CEN, 2005), por exemplo, sugere um valor de  $k$  igual a 1000. Outros códigos e autores indicam relações inferiores, como 550 (FEMA, 1999; Kaushik *et al.*, 2007), ou 700 (MSJC, 2002; IBC, 2003).

No entanto, resultados experimentais de diversos programas de caracterização mecânica de alvenarias antigas de pedra indicam uma relação muito menor entre aquelas duas propriedades (Vasconcelos, 2005; Silva, 2012; Almeida, 2013). Almeida, por exemplo, obteve uma relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão de 85 (Almeida, 2013); Vasconcelos (2005), por seu lado, obteve uma relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão de alvenarias de granito dada por:

$$E_{mas} = 240 \times f_{mas} + 3937 \quad (3.2)$$

A mesma autora apresenta também uma relação não-linear entre as duas grandezas, que apresenta ainda maior coeficiente de correlação que a anterior (respetivamente,  $r^2 = 0.96$  e  $r^2 = 0.88$ ):

$$E_{mas} = 6.29 \times f_{mas}^{1.8} \quad (3.3)$$

Para determinação da capacidade resistente da alvenaria à compressão, são também comuns fórmulas semi-empíricas, geralmente do tipo exponencial, obtidas por regressão matemática de resultados experimentais, em função das propriedades resistentes das unidades de alvenaria,  $f_b$ , e da argamassa,  $f_m$ :

$$f_{mas} = K \times f_b^\alpha \times f_m^\beta \quad (3.4)$$

O parâmetro  $K$  traduz a influência do tipo de bloco, do tipo de argamassa, da direção de carregamento e da configuração das juntas, enquanto os expoentes  $\alpha$  e  $\beta$  traduzem o peso das resistências dos componentes da alvenaria para a resistência total. Geralmente, o valor do expoente  $\alpha$  é superior ao de  $\beta$ , traduzindo a maior sensibilidade da resistência da alvenaria à variação da tensão resistente de compressão da unidade de alvenaria face à da argamassa.

De acordo com o Eurocódigo 6 (CEN, 2005), o parâmetro  $K$  toma, para argamassa convencional e pedra natural regularizada, o valor de 0.45, enquanto para juntas de argamassas convencionais de espessura corrente  $\alpha$  e  $\beta$  assumem valores de 0.7 e 0.3, respetivamente:

$$f_{mas} = 0.45 \times f_b^{0.7} \times f_m^{0.3} \quad (3.5)$$

A evidência experimental parece, no entanto, desaconselhar a aplicação desta expressão a alvenarias antigas de pedra; Pinho (2007), por exemplo, obteve, em ensaios experimentais em muretes de alvenaria irregular de pedra calcária, valores de resistência inferiores, num fator de cerca de 10, aos valores obtidos por aplicação desta fórmula. Almeida (2013), por seu turno, obteve com esta expressão valores quase duas vezes e meia superiores aos obtidos em ensaios de compressão uniaxial em paredes de granito com uma folha e unidades regulares (tidas como representativas das alvenarias da cidade do Porto).

Estes desajustes devem-se grandemente ao facto de esta expressão ter sido formulada para alvenarias com juntas totalmente preenchidas; a presença de vazios ao longo da secção transversal, situação comum em alvenarias tradicionais de pedra, reduz a sua aplicabilidade a estas alvenarias.

Estes resultados reforçam a necessidade de aprofundar, para alvenarias antigas de pedra, com vários níveis de regularidade, o desenvolvimento de modelos exponenciais de determinação das propriedades de alvenaria a partir das propriedades dos seus elementos constituintes, seja limitando superiormente a utilização desta expressão ao valor da resistência da argamassa (Pinho, 2007; Andreini *et al.*, 2014), seja calibrando o parâmetro  $K$  e/ou os expoentes  $\alpha$  e  $\beta$  (Almeida, 2013).

Também Männ (1982) sugere uma expressão do tipo exponencial:

$$f_{mas} = 0.83 \times f_b^{0.66} \times f_m^{0.18} \quad (3.6)$$

A norma alemã Ril 805 (DIN, 1999) sugere uma expressão calibrada para pedra natural:

$$f_{mas} = 0,8 \times f_b^{0.70} \times f_m^{0.20} \quad (3.7)$$

Outras formulações são também possíveis (Warnecke, 1995; Proske e van Gelder, 2009).

Männ e Rustmeier (1982) apresentam uma formulação para a determinação da capacidade resistente de alvenaria de pedra irregular, desenvolvida partindo da premissa de que a rutura da alvenaria é governada pela rutura da argamassa:

$$f_{mas} = f_{mc} \times f \times \ddot{u} \quad (3.8)$$

em que

$$f = \frac{8}{9} \times \frac{1}{1 - \left[1 - \frac{2}{3} \times \frac{t_h}{b}\right]^2 \cos^4 \alpha} \quad (3.9)$$

e

$$\ddot{u} = \frac{A_s}{A_{MW}} \quad (3.10)$$

sendo:

- $f_{mc}$  - resistência da argamassa, obtida a partir de cubos, de acordo com a norma DIN 18555
- $f$  - fator de forma que tem em consideração o aumento da resistência da argamassa quando sujeita a um estado multi-axial de tensão
- $t_h$  - altura da junta
- $b$  - largura da pedra
- $\ddot{u}$  - fator de transferência
- $A_s$  - área transversal das juntas impedidas de se deformarem transversalmente
- $A_{MW}$  - área da secção transversal da alvenaria

De acordo com Proske e van Gelder (2009), esta formulação fornece bons resultados para alvenaria irregular de pedra.

### 3.4 Caracterização de alvenarias de pedra

A existência de diversas tipologias de alvenaria, devida quer à diversidade de materiais empregues, quer à técnica que se usa para os dispor, torna necessária uma sistematização e classificação das diferentes técnicas construtivas, por vezes numa base regional.

Um primeiro nível de caracterização diz respeito ao número de paramentos e tipo de ligação entre si. Em Portugal, a existência de alvenarias construídas por pedras que ocupam toda a espessura da parede (perpianhos) é característica da cidade do Porto (Almeida, 2013). Geralmente, no entanto, as paredes de alvenaria apresentam mais do que um paramento, com diferentes níveis de ligação entre si. A existência de um núcleo central menos coeso (constituído por terra, seixos, fragmentos de tijolos cerâmicos, material pétreo de menor dimensão obtido pelo processamento das pedras maiores, ou até fibras vegetais) envolvido por dois paramentos de alvenaria constitui também uma situação frequente em paredes antigas. São geralmente paredes de grande espessura, em regra superior a 50 cm.

No caso das paredes de dois ou mais paramentos, destaca-se a importância da ligação entre panos (Giuffré, 1996; Carocci, 2001; de Felice, 2011). De acordo com Swain (1927):

*“[...] de modo a ligar a parede transversalmente, deverá haver um número suficiente de ligadouros estendendo-se de um lado ao outro de paredes delgadas, e de fora para dentro de paredes mais espessas. [...]”*

Giuffré (1996), um dos primeiros autores a debruçar-se, em décadas mais recentes, sobre esta temática, descobriu, numa série de investigações em modelos de *opus quadratum*, uma diminuição quase linear da resistência à flexão com o aumento do rácio entre a distância vertical entre elementos de travamento e a espessura da parede (Figura 3.4).

Entre as características que devem ser analisadas, de modo a conhecer o comportamento de uma parede de alvenaria, podem referir-se ainda a dimensão, forma e características físicas, químicas e mecânicas dos elementos de pedra, a qualidade da argamassa e estado das juntas de assentamento, o tipo de assentamento da alvenaria, e a presença de calços ou fiadas horizontais de regularização (Binda, 2000).



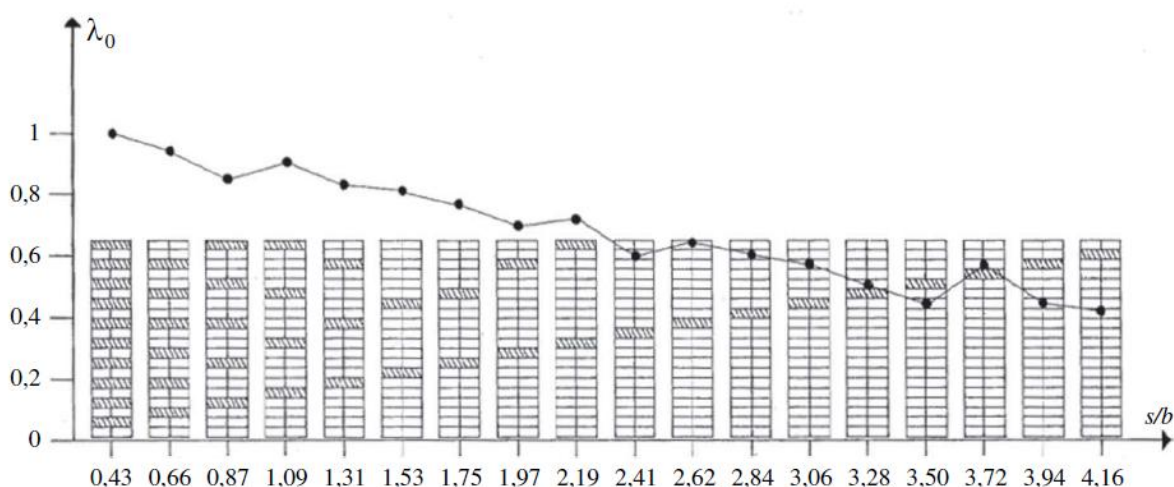


Figura 3.4 - Diminuição da resistência da parede face a ações para fora do plano devido à diminuição do número de elementos de travamento (Giuffré, 1996, como apresentado em de Felice, 2011)

Esta análise consiste, na verdade, na verificação do cumprimento de um conjunto de preceitos, derivados da observação direta e solidificados nas regras de bem construir ao longo dos tempos; este conjunto de preceitos, designado “regra de arte” (do italiano *regola dell’arte*), traduz os fatores que mais influência apresentam no comportamento da alvenaria, podendo a sua maior ou menor verificação ser considerada para uma avaliação da qualidade da alvenaria.

Por outro lado, há que ter em conta que uma parede aparentemente regular, quando analisada do exterior, poderá apresentar uma secção transversal extremamente irregular (Binda, 2005); várias investigações em edifícios antigos de alvenaria revelam o hábito de usar pedras bem aparelhadas na face destinada a ficar à vista, sendo a zona interior bastante irregular (Magenes *et al.*, 2010). O contrário também é verdadeiro; uma parede cujo alçado indique uma alvenaria de má qualidade pode na verdade, devido a uma secção interior bem construída, garantir um comportamento monolítico tanto sob cargas verticais como horizontais (Cardani e Binda, 2013). Para uma análise representativa do comportamento da parede deverá por isso ser efetuado um estudo em detalhe tanto do alçado como da secção interior, nomeadamente em termos da área ocupada por cada um dos materiais presentes, do número e espessura de paramentos, e do nível da sobreposição entre estes.

Um procedimento de registo visual da secção foi desenvolvido em Itália, e aplicado a um conjunto de paredes cuja secção transversal ficou exposta na sequência de eventos sísmicos.

Tal como se observa na Figura 3.5, a secção transversal das paredes foi fotografada, tendo sido utilizada uma barra graduada como elemento de escala.



Figura 3.5 – Levantamento geométrico da secção transversal de paredes de alvenaria (CNR-GNDT, 2000)

Posteriormente, com recurso a ferramentas informáticas de tratamento de imagem, foi feito o redimensionamento da imagem e a medição, em percentagem, das áreas de pedra, argamassa e vazios (Binda *et al.*, 2004). Foram analisadas com base neste procedimento mais de 300 secções de paredes, depois compiladas numa base de dados (Binda *et al.*, 1999). A informação recolhida permitiu fazer um estudo comparativo das percentagens de material e vazios entre várias regiões italianas (Figura 3.6). Os dados obtidos em estudos deste género permitem ainda inferir acerca da relação entre as dimensões dos diferentes panos da parede (bem como entre a dimensão de cada um e a espessura total), assim como obter informação acerca da dimensão e distribuição de vazios na secção.

Esta base de dados permitiu ainda fornecer informação utilizada em modelações numéricas realizadas com o objetivo de investigar o comportamento de paredes de alvenaria para fora do plano em função da disposição das unidades de pedra (de Felice, 2011).

Apesar da influência do arranjo dos componentes (tanto no alçado como na secção transversal) no comportamento das paredes de alvenaria (de Felice, 2011), as normas classificam geralmente a alvenaria de acordo com a resistência dos seus elementos constituintes, como a fórmula semi-empírica proposta pelo Eurocódigo 6 (CEN, 2005). Como se viu, no entanto, estas fórmulas apresentam aplicação limitada, requerendo ainda meios experimentais que podem ser financeira ou logisticamente inoportáveis. Além disso, em

algumas situações, como em cenários pós-sísmicos, importa dispor de ferramentas expeditas, que possam ser utilizadas por pessoal não-especializado, com vista à tipificação e classificação das alvenarias, bem como indicação genérica do estado de segurança e das modalidades de intervenção estrutural mais adequadas. No âmbito de programas municipais ou regionais de reabilitação urbana e valorização do património, a caracterização tipológica de alvenarias assume igualmente importância.

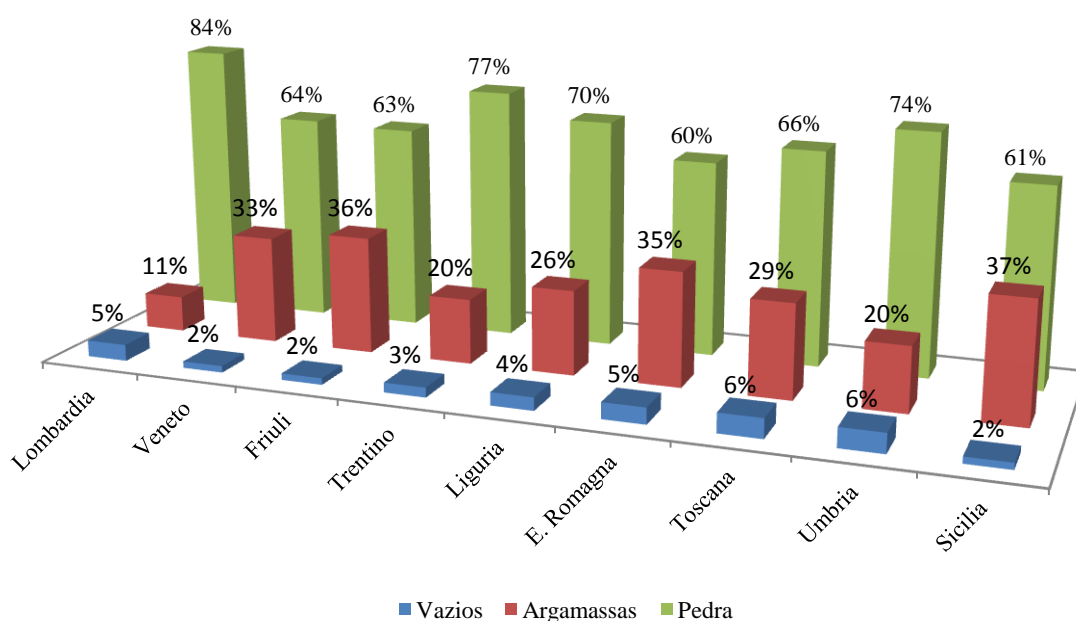


Figura 3.6 – Percentagem dos materiais (pedra, argamassa e vazios) em secções de paredes das regiões italianas (Binda *et al.*, 1999)

A experiência de levantamento e caracterização mecânica de alvenarias antigas de pedra desenvolvida em Itália permitiu compilar uma tabela com valores de referência para as propriedades resistentes e de deformabilidade, bem como para o peso próprio, de diversas tipologias de alvenaria de pedra, indicada no regulamento de construção italiano, a NTC 08 (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2008), e aqui transcrita no Quadro 3.3.

Estes valores foram estabelecidos para determinadas condições: argamassa de fraca qualidade, ausência de fiadas de nivelamento, paramentos simplesmente dispostos lado a lado ou deficientemente ligados, alvenaria não consolidada e, no caso de elementos regulares, textura realizada de acordo com as “regras da arte”. Tanto os valores do módulo de elasticidade,  $E$ ,

como do módulo de distorção,  $G$ , se reportam a casos em que a alvenaria não se encontra fissurada, devendo por isso ser reduzidos em caso contrário.

Quadro 3.3 – Valores (médios) de referência de propriedades mecânicas (mínimos e máximos) e do peso específico de alvenarias de Itália (Tabela C8A.2.1 da NTC 08)

Tipologia de alvenaria	$f_{mas}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\tau_0$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{mas}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$G$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
Alvenaria de pedra irregular (seixos e pedras irregulares)	1.0	0.020	0.69	0.23	19
	1.8	0.032	1.05	0.35	
Alvenaria de pedra não aparelhada com paramentos de espessura limitada e núcleo interno	2.0	0.035	1.02	0.34	20
	3.0	0.051	1.44	0.48	
Alvenaria de pedra aparelhada com boa ligação	2.6	0.056	1.50	0.50	21
	3.8	0.074	1.98	0.66	
Alvenaria de pedra macia (tufo, calcário, etc.)	1.4	0.028	0.90	0.30	16
	2.4	0.042	1.26	0.42	
Cantaria de pedra	6.0	0.090	2.40	0.78	22
	8.0	0.120	3.20	0.94	

Salienta-se ainda a relação entre os valores do módulo de elasticidade e da resistência à compressão (o coeficiente  $k$  referido na expressão 3.1), que varia entre 400 (cantaria de pedra) e cerca de 700 (alvenaria de pedra irregular), deixando uma vez mais em evidência o desajuste do Eurocódigo 6 (CEN, 2005) no que às alvenarias antigas de pedra diz respeito.

No caso de as paredes analisadas apresentarem melhores características que as assumidas, os valores indicados para as propriedades mecânicas podem ser corrigidos de acordo com os fatores corretivos indicados no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Fatores corretivos das propriedades mecânicas de alvenarias de Itália (Tabela C8A.2.2 da NTC 08)

<b>Tipologia de alvenaria</b>	Argamassa de boa qualidade	Presença de fiadas de nivelamento	Paramentos bem ligados
Alvenaria de pedra irregular (seixos e pedras irregulares)	1.5	1.3	1.5
Alvenaria de pedra não aparelhada com paramentos de espessura limitada e núcleo interno	1.4	1.2	1.5
Alvenaria de pedra aparelhada com boa ligação	1.3	1.1	1.3
Alvenaria de pedra macia (tufo, calcário, etc.)	1.5	-	1.5
Cantaria de pedra	1.2	-	1.2

Importa referir que apenas em algumas situações se faz referência explícita ao material pétreo de que é constituída a parede, sendo as tipologias normalmente definidas em termos de qualidade de assentamento, regularidade das fiadas, ligação entre paramentos, etc. Isto vem na linha da tradição construtiva; vários tratados e manuais de construção referem que a disposição das pedras é mais importante que o material em si (de Felice, 2011). De facto, de acordo com Alberti:

*“[...] É certamente de grande consequência de que maneira se dispõe e aglomera a pedra.[...]”*

Uma questão ainda em aberto diz respeito à standardização da classificação das diferentes tipologias de paredes de alvenaria. Na verdade, as designações das várias tipologias são muitas vezes genéricas, tornando-se difícil atribuir determinada classificação à parede em

---

questão. Por outro lado, e considerando as tipologias e valores indicados na NTC 08, verificam-se várias sobreposições dos intervalos de valores para as propriedades mecânicas nas várias tipologias, questão agravada com a existência de uma segunda tabela de fatores corretivos. Tudo isto dificulta a atribuição de valores de propriedades mecânicas a determinada parede de alvenaria de pedra.

Para além da identificação das tipologias de alvenaria características de determinada região ou país, é necessário que as mesmas tenham associados determinados parâmetros quantificáveis de modo a diminuir a subjetividade inerente à indexação da parede a determinada categoria (Cescatti *et al.*, 2016). Salienta-se que a caracterização mecânica (atribuição de valores realistas para as propriedades mecânicas) poderá desempenhar um papel ainda mais crucial do que a precisão computacional quando se recorre apenas à inspeção visual da alvenaria existente para avaliação das suas propriedades (Augenti *et al.*, 2012).

Relativamente à caracterização tipológica de alvenarias em Portugal, salientam-se os estudos de Casella (2003), que desenvolveu um levantamento de tipologias de construção murária a nível nacional.

Pagaimo (2004) levou a cabo um estudo de caracterização tipológica de alvenarias na vila de Tentúgal, e propôs uma metodologia de recolha de dados com vista à criação de uma base de dados a nível nacional.

Finalmente, Sousa (2010) e Almeida (2013) realizaram estudos de identificação das tipologias mais frequentes, bem como de quantificação de índices numéricos e classes de regularidade, de alvenarias de pedra típicas da cidade do Porto.

### **3.5 Considerações finais**

Em intervenções sobre edifícios existentes, é da maior importância dispor de informação que represente, de forma fiável, tanto o sistema estrutural como as propriedades dos materiais (ICOMOS, 2003). Como princípio geral, as hipóteses assumidas nos modelos de cálculo, em termos de propriedades resistentes e leis constitutivas, deverão replicar o mais fidedignamente possível as características dos materiais, sob pena de se assumirem pressupostos irrealistas que resultem quer em falta de segurança (se a capacidade resistente for sobrestimada), quer em intervenções desnecessárias, antieconómicas ou excessivamente intrusivas (se a capacidade resistente for subestimada).

---

O conhecimento acerca das propriedades mecânicas da alvenaria de pedra, bem como da sua construção, permite ainda documentar um testemunho histórico da inventividade e do génio do ser humano, bem como potenciar a continuidade de práticas tradicionais.

No entanto, a escassez de dados acerca do comportamento mecânico da alvenaria de pedra é uma questão com a qual os projetistas geralmente se deparam quando lidam com intervenções em construções antigas.

A dificuldade de reproduzir em laboratório condições representativas das construções antigas, tanto em termos das propriedades dos materiais como das condições de fronteira (dificuldades acrescidas no caso de elementos construídos a escala reduzida, mesmo que se usem leis de semelhança adequadas (Costa, 2012; Ferreira, 2015)), afigura-se como uma das principais causas da reduzida informação relativa ao comportamento de construções antigas de alvenaria de pedra. No que concerne a esta questão, importa referir a necessidade de controlar as propriedades mecânicas dos materiais utilizados, de modo a que sejam representativos dos encontrados em estruturas reais (nomeadamente das argamassas, quando se recorre a formulações pré-doseadas (Vasconcelos, 2005; Magenes *et al.*, 2010)), de construir provetes de dimensão suficiente de modo a que a rutura seja influenciada pela argamassa (Milosevic, 2013), e da utilização, na construção destes, de técnicas tradicionais e mão-de-obra especializada neste tipo de práticas. Por outro lado, o corte *in situ* e posterior transporte para laboratório de troços de paredes existentes reveste-se de particulares dificuldades técnicas e logísticas, resultando geralmente num procedimento demorado e dispendioso (Tomažević, 2005), que assume ainda maior complexidade no caso de paredes de múltiplas folhas, e onde nem sempre é possível garantir a manutenção das condições estáticas originais.

Também a impossibilidade de realizar ensaios destrutivos, em paredes existentes, em número alargado, contribui para a falta de conhecimento relativo ao comportamento de construções antigas de alvenaria de pedra.

A aplicação de determinadas formulações analíticas de estimativa das propriedades mecânicas da alvenaria, de utilização relativamente fiável nas alvenarias de tijolo de produção industrial, deverá ser encarada com reservas no caso de construções antigas de pedra, podendo fornecer valores que sobrestimem grandemente a capacidade resistente da estrutura (Pinho, 2007; Almeida, 2013). A consulta de tabelas que apresentam valores de propriedades mecânicas para determinadas tipologias de alvenarias deverá igualmente ser alvo de precauções, tendo em conta as realidades construtivas para as quais as mesmas foram calibradas.

Considerando estas restrições, assumem relevância, como forma de aumentar o conhecimento sobre o comportamento mecânico de alvenarias antigas de pedra, os procedimentos não- ou semi-destrutivos.



## 4 CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE PAREDES DE ALVENARIA DE PEDRA NO NÚCLEO URBANO ANTIGO DE VISEU

Tanto com vista à manutenção da autenticidade histórica do edificado, como na linha do desenvolvimento sustentável, o princípio de intervenção mínima consagrado em vários documentos de referência na área da conservação e reabilitação implica a adequada caracterização mecânica dos elementos estruturais que constituem as construções presentes nos núcleos urbanos antigos. Tal é ainda mais relevante no caso dos edifícios cujos elementos resistentes verticais consistem em paredes de alvenaria de pedra, situação predominante nos núcleos urbanos antigos portugueses, devido quer à variabilidade das propriedades mecânicas desta tecnologia construtiva (devida não apenas às características dos seus componentes, mas também à forma como os mesmos são dispostos), quer à degradação que porventura tenham sofrido ao longo do tempo. No caso de edifícios inseridos em conjuntos urbanos de valor patrimonial, a realização de ensaios destrutivos é normalmente desaconselhável, impondo-se a realização de procedimentos semi- ou não-destrutivos que permitam obter, com o mínimo de dano possível, os dados a utilizar nos modelos de análise estrutural para aferição da segurança.

### 4.1 Caracterização mecânica de paredes resistentes — Ensaio de macacos planos

Um dos métodos mais utilizados para determinação das propriedades mecânicas fundamentais de alvenarias (nomeadamente, a resistência e o módulo de elasticidade em compressão) consiste no ensaio de macacos planos (do inglês *flat-jack*) (Figura 4.1).



Figura 4.1 – Ensaio de macacos planos numa parede de alvenaria

Este ensaio envolve apenas a execução de um ou dois rasgo(s) de pequena dimensão e espessura, que pode(m), depois de realizado o ensaio e retirado(s) o(s) macaco(s), ser de novo preenchido(s) de modo a restaurar a integridade da parede. Esta técnica pode ser assim considerada um procedimento semi-destrutivo.

Oriundo da Mecânica das Rochas, em que é utilizado para medir a deformabilidade de maciços rochosos, a transposição e calibração deste ensaio para o caso das alvenarias deve-se a Rossi (1982), no início da década de 1980. A aplicação desta técnica na caracterização de alvenarias conta assim com mais de três décadas, sendo reconhecida hoje em dia como uma das mais versáteis (Vicente *et al.*, 2015; Cescatti *et al.*, 2016) para caracterização *in situ* do comportamento à compressão de paredes de alvenaria.

Com base nesta técnica, é possível realizar dois tipos de ensaios: o ensaio simples, que permite obter informação relativa ao estado de tensão instalado na parede, e o ensaio duplo, que permite estimar características de deformabilidade e resistência à compressão da alvenaria.

Há que lembrar que, no caso de alvenarias de múltiplos paramentos, este ensaio fornece resultados respeitantes apenas ao paramento exterior (Binda *et al.*, 1999). No caso de paredes de dois panos dispostos lado a lado, sem núcleo interno preenchido, é possível aplicar esta técnica no pano de parede mais afastado, recorrendo à realização de janelas no pano mais próximo.

#### **4.1.1 Princípios do ensaio de macacos planos**

A realização do ensaio de macacos planos assume um conjunto de princípios relativamente ao estado e comportamento da alvenaria ensaiada (Lourenço *et al.*, 2005; Vicente *et al.*, 2015):

- A parede de alvenaria está sujeita a um estado de tensão de compressão uniforme ao longo da sua espessura, desprezando-se assim estados de tensão diferentes numa e noutra face da parede ou a existência de um núcleo interno de pior qualidade;
- A alvenaria na vizinhança dos cortes é homogénea;
- A deformação da alvenaria é simétrica em relação ao eixo do corte horizontal, assumindo que as deformações inelásticas se encontram distribuídas ao longo do comprimento do corte;
- A tensão aplicada pelos macacos planos sobre a alvenaria é considerada uniforme;

- Antes do ensaio, a alvenaria encontra-se em regime elástico linear, o que pode ser confirmado pela análise da curva tensão-extensão registada durante o ensaio simples.

#### 4.1.2 Ensaio de macaco plano simples

O ensaio de macaco plano simples consiste na determinação da pressão necessária para repor a geometria inicial de uma parede, perturbada pela eliminação do seu estado de tensão inicial vertical por meio de um corte horizontal realizado na alvenaria (geralmente, ao longo da junta de assentamento) (Figura 4.2,c). Após este corte, e correspondente diminuição da distância entre pontos de referência situados, acima e abaixo, no mesmo alinhamento transversal ao corte, insere-se no rasgo um macaco que se pressuriza de modo a que se deforme transversalmente e exerça pressão sobre (ou contra) a alvenaria onde está inserido. A pressão requerida para repor a distância inicial entre pontos de referência corresponde assim, após corrigida a rigidez do macaco plano e a área efetiva de contacto entre este e a alvenaria, à tensão vertical a que a zona da parede ensaiada se encontrava sujeita antes do corte (Figura 4.2,d).

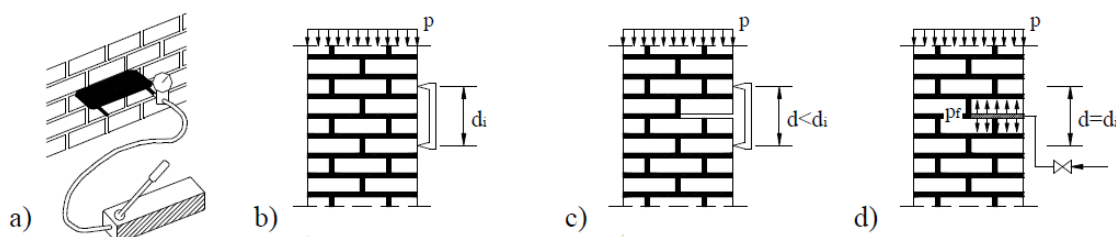


Figura 4.2 – Realização do ensaio de macaco plano simples (adaptado de Lourenço e Gregorczyk, 2000)

O valor médio da tensão instalada na parede ( $\sigma_m$ ) é estimado de acordo com a equação:

$$\sigma_m = k_m \times k_a \times p \quad (4.1)$$

em que:

- $k_m$  – constante adimensional que traduz a rigidez do macaco plano e o atrito do sistema hidráulico, determinada no procedimento de calibração do macaco (conduzido de acordo com a ASTM C 1197-91 (ASTM, 1991b));
- $k_a$  – coeficiente que traduz a relação entre a área de contacto do macaco com a alvenaria e a área do macaco;

$p$  – valor da pressão aplicada pelo macaco que restaura a configuração inicial da alvenaria.

A aplicação deste procedimento, num mesmo alinhamento horizontal, em cada um dos alçados da parede, permite também aferir acerca da existência de carregamentos excêntricos (Rossi, 1982). Após a realização do ensaio simples, o macaco plano pode ainda permanecer inserido na alvenaria durante o período desejado, funcionando como uma célula de carga que regista a evolução da tensão instalada na parede (Rossi, 1982; Vicente, 2008).

#### 4.1.3 Ensaio de macacos planos duplo

Apesar de se basear na aplicação de pressão e medição dos deslocamentos correspondentes, o ensaio de macaco plano simples não é adequado para a determinação das características de deformabilidade das alvenarias, devido ao comportamento marcadamente anisotrópico que estas apresentam. Para isto, recorre-se a dois macacos planos, situados em dois entalhes paralelos (aproveitando geralmente o corte onde já se realizou o ensaio simples), reproduzindo assim condições análogas às de um ensaio de compressão uniaxial convencional de um provete de parede (Figura 4.3). É possível então, partindo da curva tensão-extensão obtida, estimar valores do módulo de elasticidade, da resistência à compressão, e de outras características e parâmetros do comportamento mecânico da alvenaria (Ferreira, 2010; Miranda, 2011).



Figura 4.3 – Realização do ensaio de macacos planos duplo (Ferreira, 2010, à esquerda, e Miranda, 2011, à direita)

A realização de dois ensaios duplos, antes e após uma intervenção, permite aferir a eficácia de algumas técnicas de reforço, nomeadamente o refechamento das juntas de assentamento e o preenchimento dos vazios interiores por injeção de argamassas (Binda *et al.*, 1999), pela comparação dos parâmetros de deformabilidade iniciais e finais.

Face ao ensaio de compressão em laboratório, o ensaio de macaco plano duplo sobrestima geralmente o valor do módulo de elasticidade de 15 a 20 % (ASTM, 1991b). Este valor é válido para alvenarias de tijolo, sendo expectável que o desvio seja superior em alvenarias de pedra (Cescatti *et al.*, 2016).

Em construções de reduzida altura, com um ou dois pisos (ou no caso mais genérico dos pisos superiores de um edifício), a realização do ensaio duplo poderá ser inviável, uma vez que, devido à insuficiente reação conferida pela zona de parede situada acima do nível do ensaio, a grandeza do erro associado a este procedimento pode ser da ordem de 100 % do valor da tensão efetiva (Binda, 2000).

#### 4.1.4 Normalização

A metodologia da técnica de macacos planos encontra-se normalizada, seguindo, para o ensaio simples, o disposto na norma ASTM C 1196-91 (ASTM, 1991a), e a ASTM C 1197-91 (ASTM, 1991b) para o ensaio duplo. Na Europa são também seguidas as normas RILEM LUM.D.2 (RILEM, 1991a) e RILEM LUM.D.3 (RILEM, 1991b), para ensaios simples e duplos, respetivamente.

Existem diversas configurações de macacos planos, consistindo genericamente em duas chapas metálicas sobrepostas, soldadas ao longo do seu perímetro, formando assim um reservatório. Há macacos com configuração retangular, circular ou semicircular (Figura 4.4).

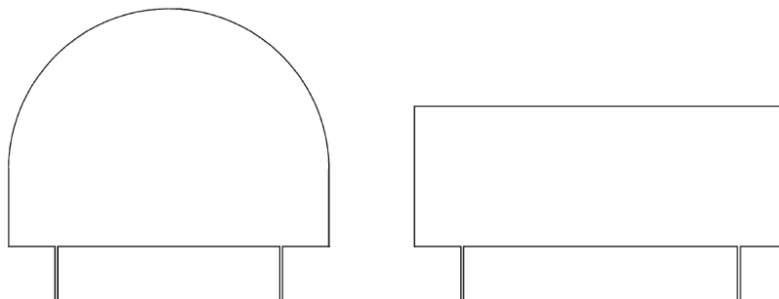


Figura 4.4 – Algumas configurações possíveis de macacos planos (Simões *et al.*, 2016)

Em todos os casos, o macaco dispõe de dois orifícios de comunicação com o exterior: um que se liga a uma bomba hidráulica, responsável pela injeção de óleo para o interior do macaco, e um outro que o permite purgar, expelindo o ar que se encontra no seu interior.

A configuração do macaco plano a utilizar depende da forma de realização do corte na parede. Macacos planos circulares ou semicirculares são usados quando o corte é realizado com uma serra circular. Macacos planos de forma retangular destinam-se a ser aplicados quando a argamassa é retirada manualmente ou com recurso a furação. O macaco plano deve ajustar-se adequadamente ao rasgo efetuado, podendo, se necessário, recorrer-se a chapas adicionais para melhor garantir o contacto.

As dimensões mínimas dos macacos planos encontram-se definidas nos documentos normativos. A maior dimensão é especificada em função do comprimento das unidades de alvenaria: a norma ASTM indica que o comprimento do macaco plano não deverá ser inferior ao comprimento de uma unidade de alvenaria nem a 200 mm, enquanto a norma RILEM indica que não deverá ser inferior a uma vez e meia ou duas vezes o comprimento da unidade de alvenaria, consoante este seja ou não superior a 200 mm. Quanto à profundidade do macaco, as duas normas indicam que não deve ser inferior à espessura das unidades de alvenaria, enquanto a norma ASTM impõe ainda que não seja inferior a 75 mm.

O espaçamento vertical entre as miras (pontos de referência para medição dos deslocamentos) e o espaçamento vertical entre os macacos no ensaio duplo é estabelecido, direta ou indiretamente, em função do comprimento mínimo do macaco, e, portanto, do comprimento da unidade de alvenaria.

#### **4.1.5 Ensaio de macacos planos em alvenaria irregular**

A aplicação do ensaio de macacos planos afigura-se como uma potente técnica de determinação de propriedades mecânicas de alvenarias, que tem sido aplicada com sucesso na determinação das propriedades mecânicas de alvenarias regulares de tijolo e pedra (Binda *et al.*, 1999); por outro lado, a sua aplicação em alvenarias de pedra irregular tem sido alvo ainda de poucos estudos (Vicente *et al.*, 2015; Uranjek *et al.*, 2012; Lombillo *et al.*, 2013; Andreini *et al.*, 2014; Simões *et al.*, 2016). Nestas paredes, a não-verificação de todas as prescrições normativas é uma contingência com a qual o operador terá de se deparar.

No caso de alvenaria de pedra mais ou menos irregular, a variabilidade de formas e dimensões dos elementos de pedra torna difícil cumprir a prescrição relativa ao comprimento mínimo, sendo de assumir, em algumas tipologias, a existência de pedras de comprimento superior ao dos macacos utilizados (Miranda, 2011). Na verdade, a referência a unidades de três

dimensões lineares parece direcionada para alvenarias de elementos quase ou perfeitamente paralelepípedicos, como tijolo cerâmico ou pedras de forma mais ou menos regular (aparelhadas ou de cantaria). É de referir que as normas que regem a realização do ensaio de macacos planos datam do início da década de 1990, quando a aplicação desta técnica, já consagrada nas alvenarias de unidades cerâmicas, era ainda reduzida nas alvenarias de pedra, especialmente naquelas de morfologia irregular (tal como ainda hoje).

Por outro lado, a variabilidade geométrica característica das alvenarias de pedra, face às de tijolo, diminui a fiabilidade dos resultados obtidos a partir de ensaios realizados numa zona localizada da parede (Andreini *et al.*, 2014).

A dificuldade de encontrar juntas regulares constitui uma complexidade adicional da aplicação deste procedimento a alvenarias irregulares; assim, o corte tem de ser feito através das pedras (Gelmi, 1992). Neste caso, é vantajoso dispor de um sistema que garanta a horizontalidade do corte (Binda e Tiraboschi, 1999). Também a presença de elementos adicionais, como fragmentos cerâmicos, calços, etc., menos resistentes, representam uma condicionante adicional, já que o procedimento de corte ou a mera vibração induzida à parede fragilizam sobretudo estes elementos, provocando descontinuidades locais que comprometem o caminho de cargas existente. As características geométricas das alvenarias de pedra condicionam igualmente a escolha dos pontos de fixação das miras; além disso, ao configurarem distribuições irregulares de pedra e argamassa, e assim de zonas de comportamento diferente, podem causar anomalias localizadas, devido a rotações e desvios das miras, que influenciam os resultados.

Para além destas, a experiência adquirida ao longo do programa experimental desenvolvido permitiu identificar limitações adicionais da aplicação da técnica de macacos planos em alvenarias de pedra irregular, que serão referidas mais adiante.

## **4.2 Caracterização *in situ* de paredes de alvenaria do núcleo urbano antigo de Viseu**

Apresenta-se de seguida uma campanha de caracterização tipológica e experimental *in situ* de paredes de alvenaria presentes no núcleo urbano antigo de Viseu. A análise levada a cabo pretende contribuir para a identificação das tipologias e estimativa das propriedades mecânicas de paredes de alvenaria de pedra presentes no núcleo antigo de Viseu, com vista a informar a intervenção estrutural neste edificado. As propriedades mecânicas das paredes foram estimadas com recurso à técnica de macacos planos. As paredes foram igualmente alvo de uma descrição e enquadramento tipológicos, com vista a, por um lado, identificar as

técnicas construtivas presentes, e, por outro, melhor compreender a informação obtida com o ensaio experimental.

Os edifícios estudados são propriedade da Câmara Municipal de Viseu, tendo sido selecionados para incorporar a primeira fase do projeto Viseu Património, com o propósito de acolherem intervenções que se assumam como exemplares do ponto de vista da reabilitação do edificado e ilustrativas de boas práticas de preservação do património.

A seleção das paredes a caracterizar foi grandemente condicionada por limitações em termos de acesso, tendo a escolha final resultado de uma análise em que se consultaram vários especialistas na caracterização mecânica de paredes de alvenaria de pedra.

#### 4.2.1 Granito e construções em granito

As pedras utilizadas na construção de alvenaria podem apresentar diferentes naturezas (ígneas, sedimentares e metamórficas), consoante o seu processo de formação geológica. O granito, uma rocha ígnea intrusiva (i.e., resultante da consolidação do magma a grandes profundidades), constitui a pedra mais comumente utilizada na construção de edifícios no norte de Portugal, tanto em edifícios monumentais como de arquitetura corrente.

Esta rocha é constituída por quartzos (que podem ocorrer em diferentes percentagens, por definição, superiores a 20 %), feldspatos (ortóclase, sanidina e microclina), micas (biotite e/ou moscovite), anfíbolas (sobretudo hornblenda), piroxenas (augite e hiperstena) e turmalinas, podendo em alguns casos verificar-se a ausência de um ou mais destes minerais. O quartzo apresenta-se em grãos irregulares e incolores, o feldspato em cristais alongados e a mica, geralmente responsável pela cor negra do granito, sob a forma de palhetas brilhantes. Os quartzos e os feldspatos são os minerais presentes em maiores quantidades, podendo chegar a ocupar cerca de 85 % a 95 % da composição da rocha. Dependendo do tipo de feldspato presente, os granitos podem apresentar diferentes variedades cromáticas, desde tons acinzentados até aos avermelhados, rosa ou creme (Figura 4.5).



Figura 4.5 – Diferentes tipos de granitos



A resistência à compressão e o módulo de elasticidade do granito podem exibir uma gama alargada de valores, em função da composição mineralógica, tamanho e forma dos grãos, e estado de alteração; Vasconcelos (2005) obteve, numa campanha experimental de caracterização de vários tipos de granito presentes no Norte de Portugal, valores entre 11.0 e 63.8 GPa, para o módulo de elasticidade, e de 26.0 a 148.5 MPa, para a resistência à compressão. Para cada tipo de granito ensaiado, foram obtidos coeficientes de variação relativamente reduzidos: de 1.8 a 13.8 % e de 2.5 a 11.1 %, para o módulo de elasticidade e a resistência à compressão, respetivamente.

Nas zonas em que o granito constitui o principal material de construção de alvenarias, as paredes mais comuns são de dois paramentos ligados pontualmente entre si por ligadouros (Ferreira *et al.*, 2015), dois paramentos ligados ou não por ligadouros e com um núcleo central de pior qualidade (Oliveira e Lourenço, 2006), ou paredes constituídas por blocos de pedra que ocupam toda a espessura da parede (Almeida, 2013).

No caso particular da cidade de Viseu, verifica-se a ausência, na literatura, de informação relativa às propriedades mecânicas das paredes de alvenaria de pedra de granito presentes no seu núcleo antigo.

## 4.2.2 Descrição dos edifícios

### 4.2.2.1 Orfeão de Viseu

O edifício situado no número 149 da Rua Direita (implantado sensivelmente a meio desta artéria, fazendo esquina com a Travessa das Escadinhas da Sé), propriedade do Montepio Filantrópico Viseense, funcionou como sede do Orfeão de Viseu entre 9 de Dezembro de 1955 e 7 de Março de 2006 (Figura 4.6).



Figura 4.6 – Fachada do edifício do Orfeão de Viseu

Trata-se de um edifício de dois pisos, possuindo, além da entrada principal pela Rua Direita, para o piso térreo, também entrada pela Rua Senhora da Boa Morte, para o piso superior, onde se encontra o salão principal. Estruturalmente, segue a tecnologia habitual à data da sua construção, com paredes resistentes de alvenaria de pedra e pavimento e cobertura em madeira. De dimensões invulgares para a zona, deste edifício sabe-se que foi reconstruído após um incêndio em 15 de Julho de 1926 (Aragão, 1936). No seu interior destaca-se a escadaria, com corrimão em ferro forjado, e azulejos de motivos florais, datados de 1912 (Figura 4.7).

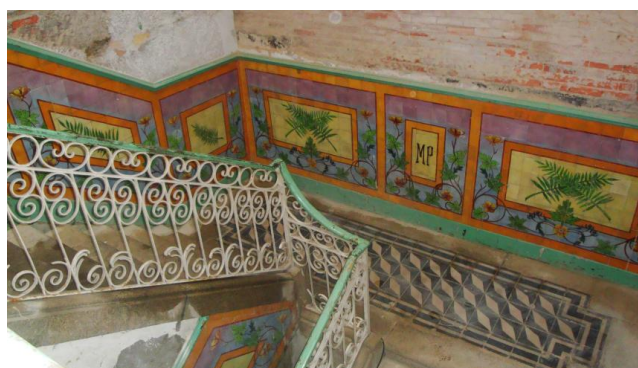


Figura 4.7 – Escadaria e azulejos do edifício do Orfeão de Viseu

No salão nobre destaca-se a utilização de carris de caminho-de-ferro como parte do sistema resistente das paredes. Relativamente às paredes divisórias, constata-se, para além da alvenaria de pedra, a presença de tabiques de madeira, com ripado retangular disposto sobre tábuas costaneiras (Figura 4.8).



Figura 4.8 – Paredes divisórias em tabique de madeira

Está prevista a adaptação deste edifício para acolher as futuras instalações da Escola Profissional Mariana Seixas.

#### 4.2.2.2 Edifício das Águas de Viseu

O imóvel data dos anos 20 do século passado e ocupa três frentes, confrontando com a rua Dr. Luís Ferreira (antiga Rua do Comércio), a Rua D. Duarte e a Travessa de São Domingos (Figura 4.9 e Figura 4.10). É composto por rés-do-chão (em tempos, com função comercial), três andares e uma cave, e tem uma área bruta de 1400 m<sup>2</sup>.



Figura 4.9 – Águas de Viseu (vista da Rua do Comércio)



Figura 4.10 – Águas de Viseu (vista da Rua D. Duarte)

A designação “Águas de Viseu” deve-se a estar prevista a instalação dos Serviços Municipalizados de Águas e Saneamento neste edifício.

A Sociedade de Reabilitação Urbana Viseu Novo classificou este edifício como imóvel de “relevante valor arquitetónico e patrimonial”. Salientam-se os fingidos de pedra que ornamentam a fachada do rés-do-chão (Figura 4.11).



Figura 4.11 – Fingidos de pedra na fachada do rés-do-chão

Presentemente, o edifício encontra-se devoluto e em avançado estado de degradação.

### 4.2.3 Caracterização geométrica e tipológica — Alçado

#### 4.2.3.1 Orfeão de Viseu

A parede caracterizada é resistente e interior, paralela à parede da fachada principal e localiza-se no salão nobre do 1.º piso (Figura 4.12).



Figura 4.12 – Parede caracterizada no Orfeão de Viseu

A alvenaria de pedra encontra-se à vista, sendo possível observar a presença de pedras de granito de cor acinzentada, assentes com argamassa de cor creme. A parede tem uma espessura de 50 cm. Verifica-se a existência de pedras com faces quer marcadamente retangular, com um rácio comprimento/altura aproximadamente igual a três, quer aproximadamente quadrangular. Constata-se, no geral, uma predominância de comprimentos em torno de 70 cm, para as maiores pedras retangulares, e de cerca de 20 cm, para as pedras mais quadrangulares. O assentamento apresenta alguma irregularidade. A presença de calços de assentamento é pouco significativa.

Não foi possível aceder ao alçado posterior desta parede, o que seria interessante, de modo a verificar uma possível correspondência com o assentamento visível do salão, e intuir acerca da existência ou não de múltiplos paramentos e/ou de ligadouros. Salienta-se que, devido ao refechamento das juntas, a dimensão aparente das pedras pode não corresponder à sua real dimensão, resultado da sobreposição de argamassa no seu contorno.

Não foi possível nesta fase observar a secção transversal da parede, por os topos se encontrarem revestidos por guarnições de madeira, e não se ter procedido ao corte de troços de parede.

#### 4.2.3.2 Edifício das Águas de Viseu

A parede caracterizada é resistente e interior, perpendicular à parede da fachada que confronta com a Rua D. Duarte, e localiza-se no rés-do-chão (Figura 4.13).



Figura 4.13 – Parede caracterizada no edifício das Águas de Viseu

A alvenaria de pedra encontra-se à vista, sendo possível constatar a presença de pedras de granito de diferentes tonalidades, desde o cinzento ao amarelado e rosa. A argamassa, de cor acinzentada, parece evidenciar refechamento recente.

As pedras são de forma e dimensão irregulares. O assentamento apresenta marcada irregularidade, por vezes com disposição da maior dimensão da pedra na direção vertical. A presença de calços de assentamento é pouco significativa.

Também neste caso não foi possível aceder ao alçado posterior da parede, com os inconvenientes acima referidos. Verificou-se igualmente algum refechamento das juntas, que pode comprometer a fiabilidade da análise visual do alçado.

Não foi possível, numa fase inicial, fazer uma análise da secção transversal da parede, uma vez que não se previu o corte de painéis de parede (para ensaios destrutivos *in situ* ou em laboratório).

#### 4.2.4 Caracterização mecânica — Ensaio de macacos planos

Em Portugal, a técnica de macacos planos tem sido utilizada no âmbito de campanhas de levantamento, caracterização construtiva e verificação da segurança estrutural de núcleos urbanos antigos. Neste âmbito, salientam-se os trabalhos realizados por Roque (2002), Pagaimo (2004), Vicente (2008), Ferreira (2010), Miranda (2011) e Simões *et al.* (2016). Refira-se que escasseiam na literatura estudos de caracterização das propriedades mecânicas de alvenarias de granito com recurso à técnica de macacos planos, sendo de salientar a campanha levada a cabo por Miranda (2011).

##### 4.2.4.1 Equipamento utilizado

Para a realização dos ensaios com macacos planos foi necessário o seguinte equipamento:

- Um (para o ensaio simples) ou dois (para o ensaio duplo) macacos planos;

Foram utilizados macacos planos semicirculares, da marca BOVIAR, modelo MPA-A, com dimensões 350x260x4 mm e pressão máxima de utilização de 60 bar (Figura 4.14).



Figura 4.14 – Macacos planos semicirculares

A calibração dos macacos planos (determinação do coeficiente  $k_m$  que relaciona a pressão aplicada pelo sistema hidráulico com a pressão efetivamente exercida contra a alvenaria) nesta campanha foi realizada de acordo com a norma ASTM C1197-2009, no *Laboratorio della Facoltà di Ingegneria dell' Università di Genova*, sobre uma amostra de 20 macacos

planos retirados aleatoriamente do mesmo lote de 100 exemplares. Para todos os macacos planos utilizados nesta campanha (provenientes do mesmo lote), foi assumido um valor de  $k_m$  igual a 0.902, de acordo com o indicado no respetivo certificado de calibração.

– Equipamento de corte;

Foi utilizada uma máquina de corte modelo HUSQVARNA k970 Ring, com motor de 93,6 cm<sup>3</sup> de cilindrada e 4,8 kW de potência (Figura 4.15). O disco de corte, diamantado, com 300 mm de diâmetro, permite uma profundidade máxima de corte de 270 mm (devido ao suporte excêntrico do disco, a profundidade do corte não é limitada pela posição do seu eixo).



Figura 4.15 – Máquina de corte

– Sistema hidráulico transmissor de pressões;

Foi utilizada uma bomba ENERPAC, com capacidade para 500 bar e depósito de capacidade de 3 litros, e manómetros para controlo da pressão (Figura 4.16). A ligação entre o sistema transmissor hidráulico e os macacos planos é efetuada por meio de tubagem de altas pressões.



Figura 4.16 – Bomba hidráulica

- Transdutores de deslocamento;

Foram utilizados potenciômetros da marca GEFRAN, com fixação por rótulas autoalinhantes, precisão de  $10^{-3}$  mm e curso de 50 mm. Para a fixação dos potenciômetros na parede, foram empregues varões roscados, com 5 mm de diâmetro, aplicados com bucha química corrente, numa profundidade de 50 mm (Figura 4.17).

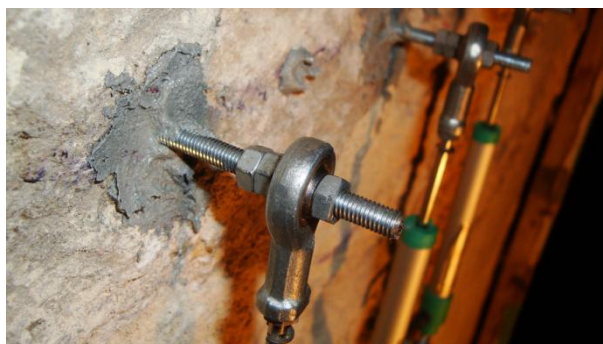


Figura 4.17 – Fixação dos potenciômetros na alvenaria

- Sistema de aquisição e registo de dados.

Foi utilizada uma célula de pressão, uma placa de aquisição de dados da marca NATIONAL INSTRUMENTS, um computador portátil e *software* de aquisição desenvolvido para o efeito com recurso ao software LabVIEW (National Instruments, 2010) (Figura 4.18).



Figura 4.18 – Sistema de aquisição e registo de dados

#### 4.2.4.2 Protocolo de ensaio

O ensaio de macacos planos simples comportou os seguintes passos:



- Seleção das zonas a ensaiar, tendo em conta as prescrições normativas. Marcação dos pontos de fixação dos potenciómetros (pontos de referência) e das zonas de corte. Abertura dos orifícios para a colocação dos varões roscados, incluindo os necessários à realização do ensaio duplo;
- Injeção de bucha química. Colocação dos varões roscados (incluindo os necessários à realização do ensaio duplo). Introdução de porca e contraporca. Ligação dos potenciómetros e dos macacos planos ao sistema de aquisição de dados. Aplicação dos potenciómetros. Medição das distâncias iniciais entre pontos de referência;
- Retirada dos potenciómetros. Abertura do rasgo na alvenaria;
- Montagem do macaco plano e do sistema hidráulico. Inserção do macaco plano no rasgo. Reintrodução dos potenciómetros. Introdução de porca. Medição das distâncias entre pontos de fixação dos potenciómetros após realização do rasgo;
- Pressurização manual do macaco plano, com incrementos de 1 bar, e registo da deformação verificada nos vários alinhamentos até à restituição da distância inicial entre pontos de referência.

De modo a estimar a área de contacto entre o macaco plano e a alvenaria, adotou-se o procedimento sugerido por Lourenço e Gregorczyk (2000): interpôs-se, entre cada uma das faces do macaco e a alvenaria circundante, uma folha de papel químico envolta em duas folhas de papel. As zonas em que há contacto entre o macaco plano e a alvenaria ficam assim indicadas no papel, sendo possível medir a respetiva área por tratamento informático da imagem (Figura 4.19).

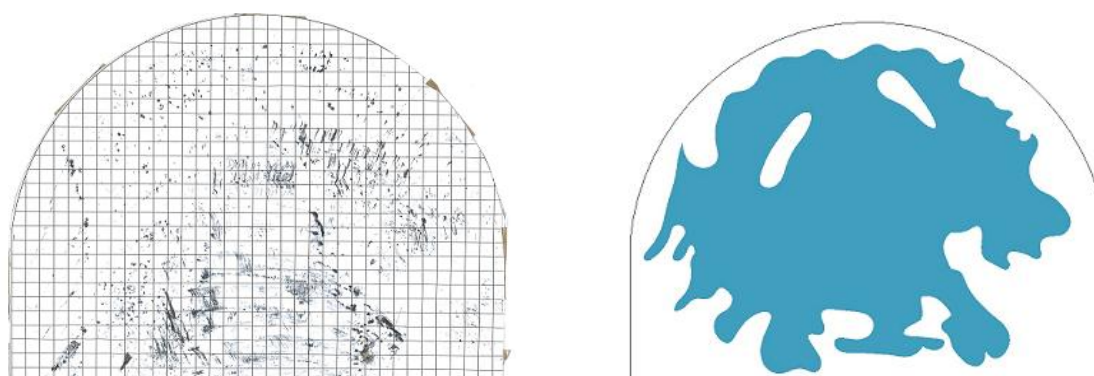


Figura 4.19 – Medição da área de contacto entre o macaco plano e a alvenaria

Como se verá adiante, nem sempre este procedimento permitiu obter a área de carregamento, devido aos danos que os papéis químicos sofrem (sobretudo na sua remoção), tendo-se optado nessas ocasiões por aproximações mais expeditas.

A figura 4.20 ilustra a realização do ensaio de macaco plano simples, no âmbito da campanha experimental levada a cabo.



Figura 4.20 – Realização do ensaio de macacos planos simples, no edifício do Orfeão de Viseu (à esquerda), e no edifício das Águas de Viseu (à direita)

Importa referir que, apesar de as mesmas poderem afetar os resultados obtidos (Vicente, 2008), não foi possível controlar as condições de humidade e temperatura das paredes ensaiadas.

Geralmente a distância inicial entre pontos de referência não é atingida simultaneamente nos vários alinhamentos, o que se deve, entre outros fatores, a diferentes distribuições de pedra e argamassa ao longo destes (zonas em que haja maior proporção de argamassa tenderão a deformar-se mais, comparativamente a outras com uma maior quantidade de pedra). Assim, considerou-se como valor de reposição da configuração inicial a média dos valores que restauram a deformação de cada alinhamento.

Os ensaios de macacos planos duplos foram realizados nas mesmas zonas onde se havia já precedido ao ensaio simples, aproveitando assim o rasgo existente. O procedimento de ensaio de macacos planos duplo comportou os seguintes passos:

- Substituição do registo químico. Montagem dos macacos planos e do sistema hidráulico. Inserção dos macacos planos nos rasgos;

- Ligação dos potenciômetros e dos macacos planos ao sistema de aquisição de dados. Aplicação dos potenciômetros. Introdução de porca. Medição das distâncias entre pontos de fixação dos potenciômetros;
- Pressurização manual dos macacos planos. Em cada ensaio foram realizados três ciclos de carga/descarga;
- Obtenção do gráfico de tensão-deformação da zona ensaiada.

A figura 4.21 ilustra a realização do ensaio de macacos planos duplo.

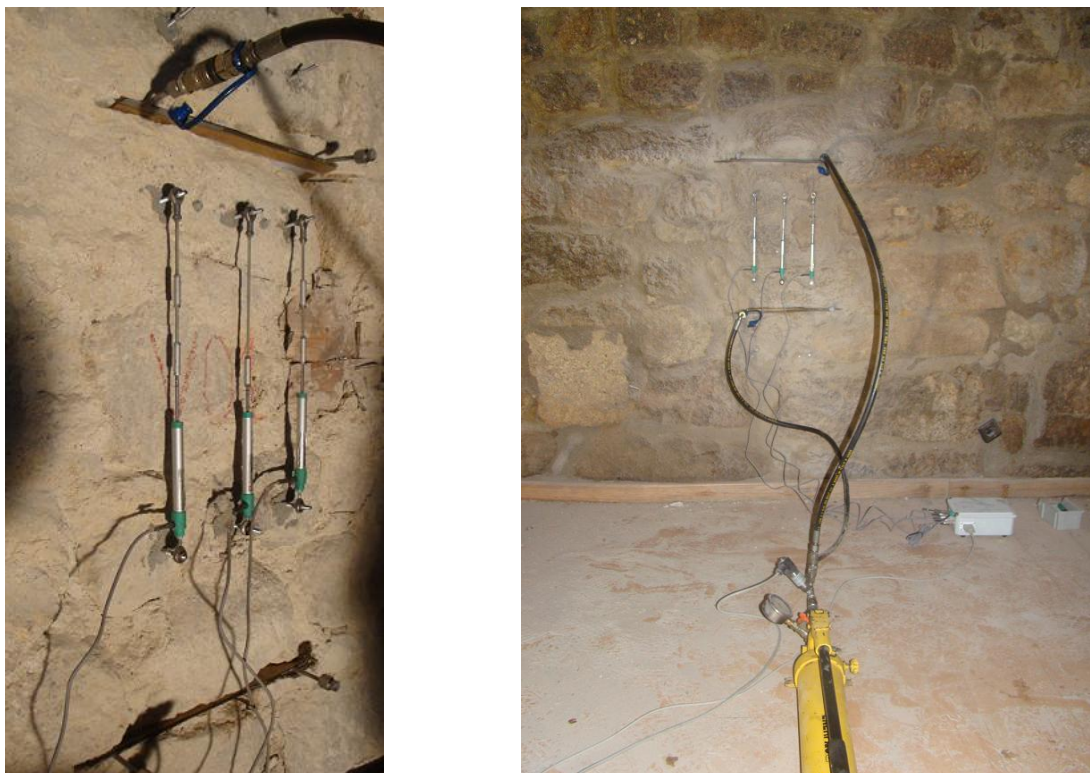


Figura 4.21 – Realização do ensaio de macacos planos duplo, no edifício do Orfeão de Viseu (à esquerda), e no edifício das Águas de Viseu (à direita)

#### 4.2.4.3 Estimativa das tensões instaladas e das propriedades de deformabilidade e resistência

Foram realizados dois ensaios simples e um ensaio duplo no edifício do Orfeão de Viseu (a realização de um segundo ensaio duplo foi impedida pela necessidade de desmonte localizado da parede, para se conseguir remover a serra de corte, que ficou presa durante a realização do

segundo rasgo para o ensaio duplo). Sentiram-se dificuldades na remoção dos macacos planos da alvenaria, nomeadamente após a realização do ensaio duplo, havendo também aqui que proceder ao desmonte localizado da parede. As Figuras 4.22 e 4.23 apresentam os resultados relativos aos ensaios de macaco plano simples (evolução dos deslocamentos relativos, nos diversos alinhamentos, em função da tensão aplicada pelo macaco plano, já corrigida com os coeficientes  $k_m$  e  $k_a$ ), enquanto a Figura 4.24 apresenta os resultados do ensaio duplo (diagrama tensão-extensão).

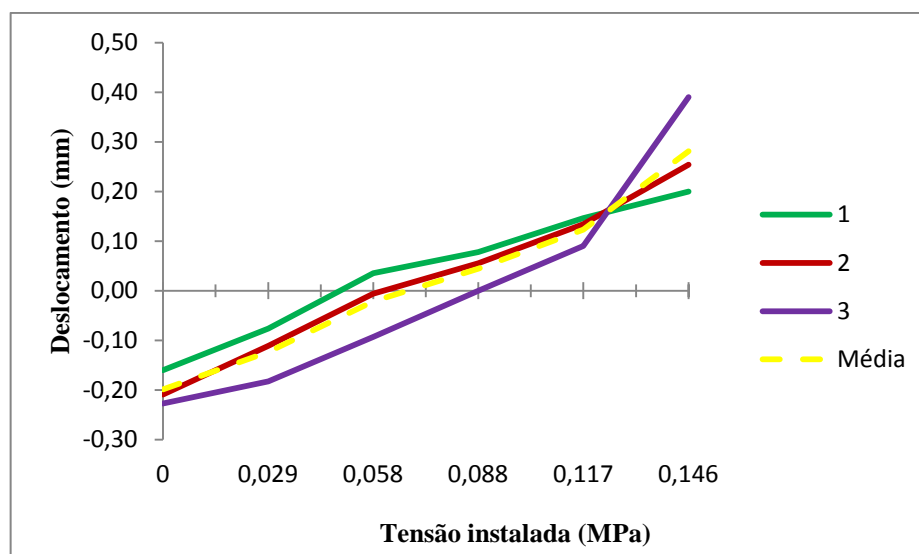


Figura 4.22 – Resultados do ensaio simples 1

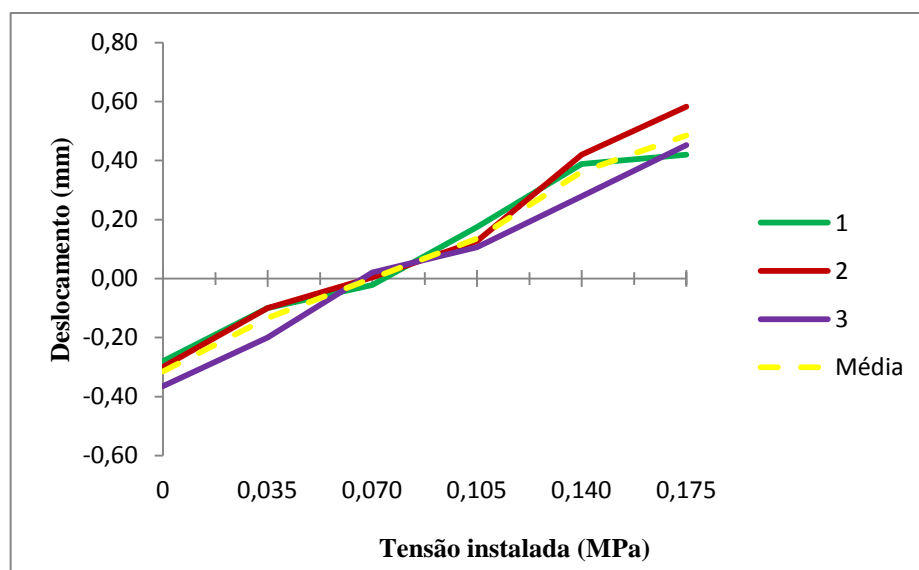


Figura 4.23 – Resultados do ensaio simples 2

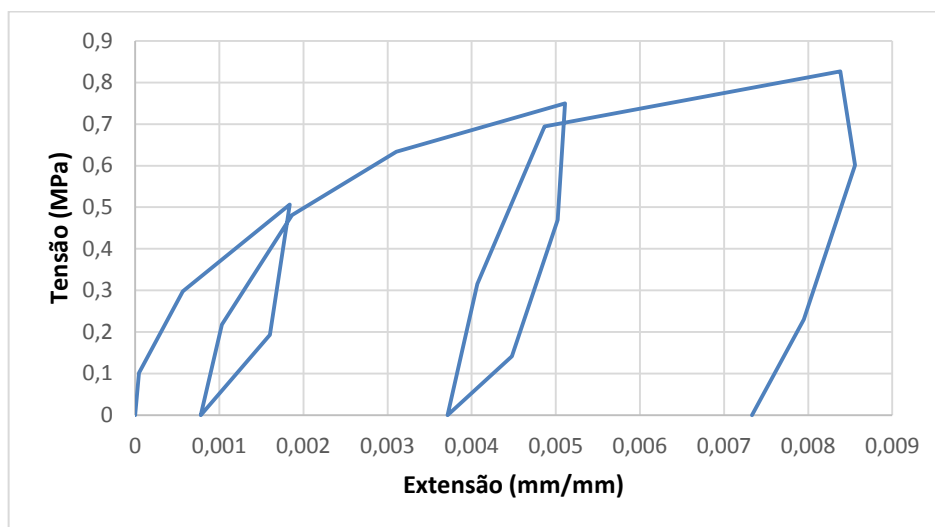


Figura 4.24 – Resultados do ensaio duplo 1

No edifício das Águas de Viseu, foram realizados um ensaio simples e dois ensaios duplos. Também aqui houve que proceder ao desmonte localizado da parede após o ensaio duplo, para remoção dos macacos. Devido ao manifesto mau estado em que se encontravam os registos químicos após a retirada, e tendo em conta a deformação observável nos macacos planos, optou-se nesta ocasião por estimar o coeficiente  $k_a$  por observação visual dos macacos. A Figura 4.25 apresenta os resultados relativos ao ensaio de macaco plano simples, enquanto as Figuras 4.26 e 4.27 apresentam os resultados relativos aos ensaios duplos.

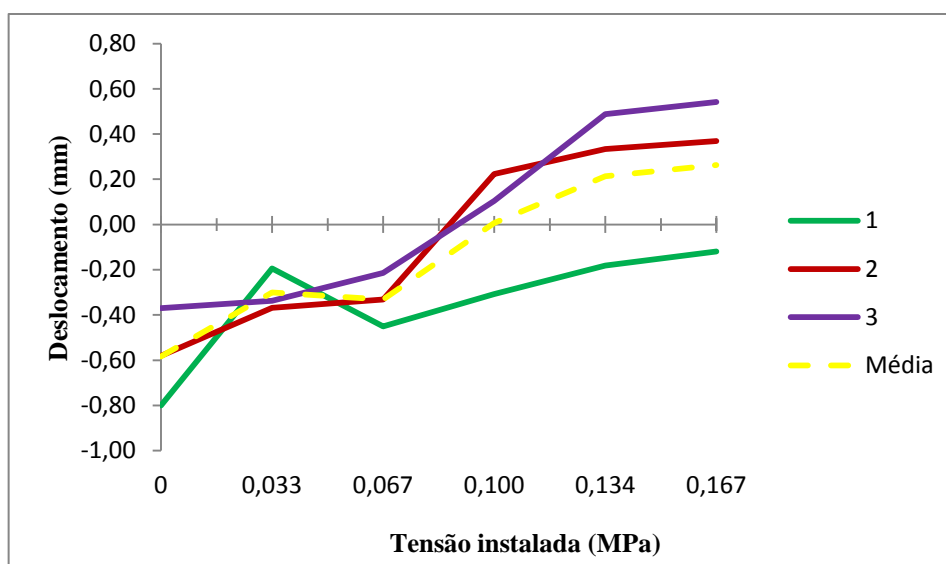


Figura 4.25 – Resultados do ensaio simples 1

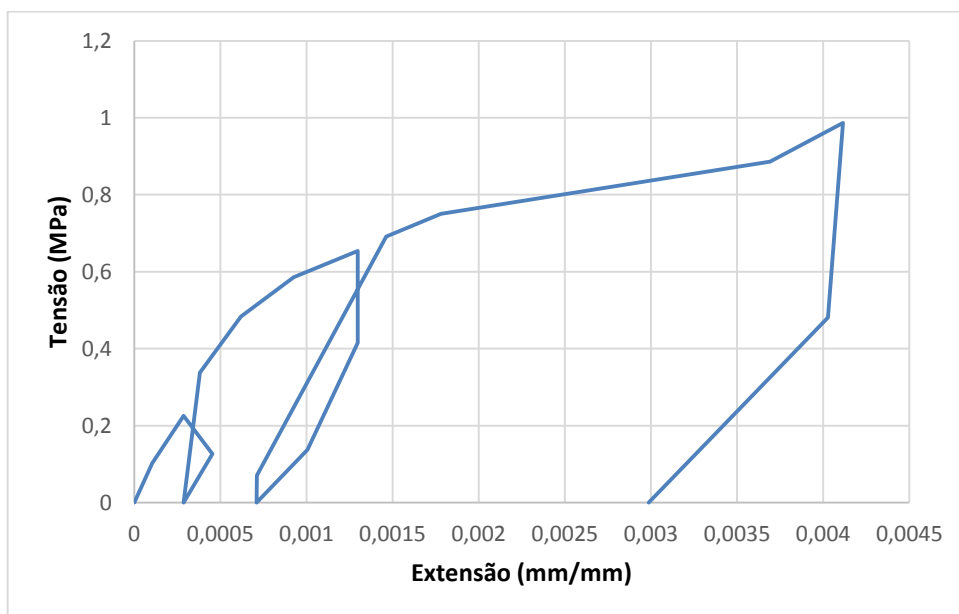


Figura 4.26 – Resultados do ensaio duplo 1

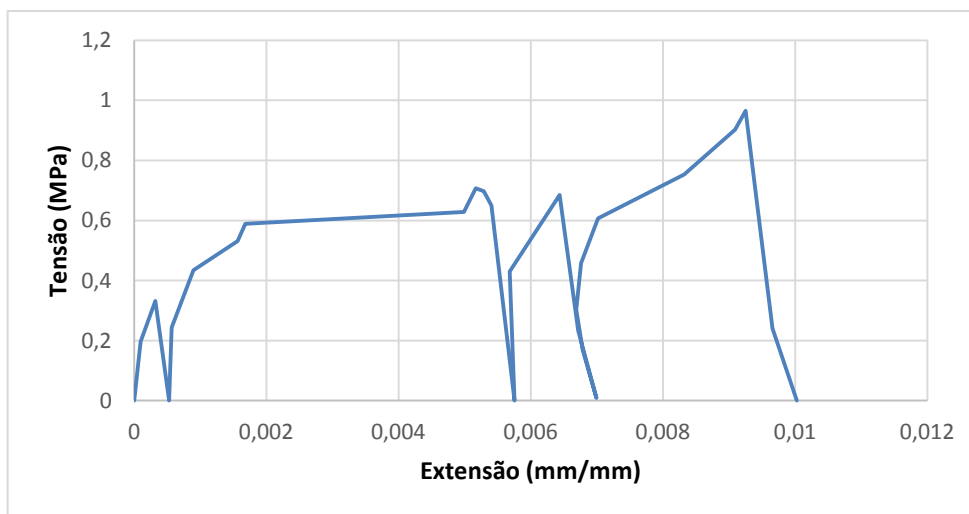


Figura 4.27 – Resultados do ensaio duplo 2

No Quadro 4.1 indicam-se os resultados mais importantes da campanha experimental de ensaios com macacos planos, nomeadamente a tensão instalada *in situ*, a tensão máxima atingida (que constitui um limite inferior da capacidade resistente da parede) e o módulo de elasticidade inicial,  $E_0$ , afetado de um fator de redução de 15 % (ASTM, 1991b).

Quadro 4.1 – Resultados dos ensaios com macacos planos

	Orfeão de Viseu			Águas de Viseu		
	Simples 1	Simples 2	Duplo 1	Simples 1	Duplo 1	Duplo 2
Tensão instalada <i>in situ</i> (kPa)	68.0	70.0	-	99.0	-	-
Tensão máxima atingida (kPa)	-	-	915.0	-	1098.0	1119.0
Módulo de elasticidade inicial, $E_0$ (MPa)	-	-	1993.81	-	832.59	1715.95

No Quadro 4.2 indicam-se os valores da tensão máxima atingida e de módulo de elasticidade obtidos em outras campanhas experimentais realizadas em paredes alvenarias de granito, em Portugal, *in situ* (Miranda, 2011) e em laboratório, sobre painéis de paredes recolhidos de edifícios existentes (Almeida, 2013).

Quadro 4.2 – Valores da tensão máxima atingida e de módulo de elasticidade obtidos em outras campanhas experimentais realizadas em alvenarias de granito, em Portugal

	Tensão máxima atingida (kPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
Miranda (2011)	49 – 840	800 – 3300
Almeida (2013)	2500 – 3940	220 – 320

Conclui-se que os valores obtidos nesta campanha experimental se enquadram no intervalo de valores obtidos em outras campanhas de caracterização mecânica, de paredes de alvenaria de

granito, no território português. Importa referir, no entanto, as diferenças entre as paredes ensaiadas nesta campanha e as paredes analisadas nas restantes campanhas, nomeadamente ao nível de tipologia (sobretudo número de paramentos e ligação entre si), um fator que, como atrás se referiu, deverá ser tido em conta na comparação de valores das propriedades mecânicas de paredes de alvenaria de pedra.

#### 4.2.5 Caracterização geométrica e tipológica — Secção transversal

Nos dois edifícios estudados, a necessidade de desmonte localizado, para remover quer a serra de corte quer os macacos planos, permitiu observar a secção transversal das paredes, e assim obter informação acerca da sua tipologia.

##### 4.2.5.1 Orfeão de Viseu

Conclui-se tratar-se de uma parede de dois paramentos, com fraco a razoável imbricamento, excluindo-se, em todo o caso, a existência de um núcleo central de piores qualidades (Figura 4.28). Esta última conclusão, em especial, foi reforçada por uma outra observação, com recurso a videoscopia, do interior da parede de fachada desta divisão, que forneceu indicações consistentes com aquela.



Figura 4.28 – Secção transversal da parede observada (Orfeão de Viseu)

##### 4.2.5.2 Edifício das Águas de Viseu

Constatou-se a existência de uma parede de dois paramentos exteriores, com um núcleo interior de piores qualidades, sem coesão (alvenaria *a sacco*). Tanto o paramento interior como o núcleo central apresentam uma espessura de 25 cm. Não foi possível medir a espessura do paramento exterior, afigurando-se, no entanto, como plausível que seja



igualmente de 25 cm. Estar-se-ia assim na presença de uma parede com uma espessura total de 75 cm, ao nível do rés-do-chão. Quanto ao núcleo interior, foi possível verificar o seu preenchimento com pedras de granito, de forma grosseira e dimensões entre 10 e 15 cm, dispostas de forma aleatória, e ainda com terra e lascas de madeira (Figura 4.29).



Figura 4.29 – Núcleo interior da parede observada (Águas de Viseu)

#### 4.2.6 Caracterização material (pedra)

O desmonte localizado da parede permitiu igualmente recolher algumas amostras de pedra, que viriam a ser posteriormente caracterizadas experimentalmente com o objetivo de estimar as propriedades mecânicas do granito empregue, nomeadamente a sua resistência à compressão.

Com recurso a uma máquina de corte rotativa com coroa diamantada, preparou-se um conjunto de carotes cilíndricos com o fim de as sujeitar ao ensaio de compressão uniaxial. No entanto, devido à rotura localizada de várias das pedras durante este procedimento, apenas foi possível obter um único provete com as características geométricas requeridas para a realização do ensaio.

O ensaio de compressão uniaxial foi realizado no Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, e conduzido de acordo com a norma NP EN 1926 (IPQ, 2000). Na Figura 4.30 apresenta-se a carote ensaiada, o esquema de ensaio adotado e a aparência final do provete. No Quadro 4.3 apresentam-se os resultados obtidos.



Figura 4.30 – Ensaio de compressão uniaxial

Quadro 4.3 – Resultados do ensaio de compressão uniaxial

L (mm)	D (mm)	m (kg)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$f_b$ (N/mm <sup>2</sup> )
126	84	1.77	24.85	32.7

Conclui-se que o valor obtido neste ensaio se enquadra no intervalo expectável para granitos antigos, se bem que próximo do seu limite inferior (Casella, 2003; Vasconcelos, 2005). Importa no entanto realçar que, por se tratar de um único ensaio, a sua representatividade, em termos do que serão as propriedades mecânicas da pedra existente no local de recolha, não se encontra assegurada.

Também o estado de alteração poderá ajudar a explicar este valor, já que os granitos experienciam uma marcada redução das suas propriedades resistentes quando sujeitos a fenómenos de alteração geológica (Bell, 2007).

A observação visual das várias amostras de granito recolhidas confirmou estar-se em presença de diversos tipos de granitos. Foi possível constatar, nomeadamente, a existência de granitos porfíroides, de grão grosseiro, com presença de moscovite (branca), biotite (castanha) e fenocristais de feldspato, bem como de granitos gnaissicos (visível na orientação dos minerais escuros), de grão médio, igualmente com presença de moscovite e biotite. Em ambas as amostras analisadas se verificou tratar-se de granitos bastante alterados, o que era visível, nomeadamente, na tonalidade amarelada existente em redor dos cristais de biotite, denotando a oxidação dos óxidos ferrosos. Importa salientar que a carote ensaiada aparenta semelhanças com o primeiro tipo de granito referido. Fica assim mais sustentado o valor da resistência obtido no ensaio de compressão uniaxial.

### 4.3 Considerações finais

Apresentou-se uma primeira campanha experimental com vista à caracterização tipológica e mecânica das paredes de alvenaria de pedra presentes no núcleo antigo de Viseu. A caracterização compreendeu a observação visual do alçado, a realização de ensaios de macacos planos, a observação da secção transversal e a caracterização mecânica da pedra empregue.

Em termos das suas propriedades mecânicas, é de salientar que as zonas ensaiadas estiveram sujeitas, durante a realização do ensaio duplo, a cargas cerca de dez vezes superiores ao estado de tensão determinado com recurso ao ensaio simples, o que ilustra a elevada segurança que estas estruturas, se bem conservadas, geralmente apresentam face a ações verticais.

Refira-se no entanto que os edifícios analisados foram-no não com base em critérios explícitos de representatividade do parque edificado presente no centro urbano antigo de Viseu, mas sim por questões de acessibilidade. A extrapolação dos valores obtidos nestes edifícios para a globalidade das construções presentes no núcleo antigo de Viseu é assim um procedimento que carece de sustentação, impondo-se a realização de campanhas mais alargadas para caracterização do parque edificado da zona antiga viseense.

O ensaio de macacos planos constitui um procedimento relativamente simples, de custos reduzidos e extremamente útil na avaliação *in situ* de paredes de alvenaria de pedra, apresentando um nível de rigor compatível com o necessário para calibrar modelos de análise estrutural que informem sobre a necessidade de eventuais intervenções de reforço. Requer, no entanto, um elevado nível de perícia e experiência do operador, além de apresentar um conjunto de condicionantes que poderá afetar a fiabilidade dos resultados obtidos (Ferreira, 2010).

As alvenarias de pedra irregular, de um ou mais paramentos, constituem a tipologia cujo comportamento mecânico apresenta mais e maiores incertezas, bem como uma gama de propriedades mais alargada. Estão ainda especialmente sujeitas a mecanismos de perda de segurança por falta de equilíbrio ou desfragmentação local. Tendo em conta a especial dificuldade de reproduzir condições representativas desta tipologia em ambiente laboratorial, assume pertinência a realização de ensaios *in situ*. O ensaio de macacos planos, de carácter semi-destrutivo, constitui assim uma versátil técnica de caracterização deste tipo de alvenarias, que pode ser utilizada para obtenção das propriedades mecânicas destas estruturas.

Resultou clara, no entanto, a dificuldade de cumprir, nas paredes ensaiadas, todas as indicações das normas relativas ao ensaio de macacos planos. São de referir, nomeadamente, a dificuldade de encontrar um local adequado para efetuar o corte (preferencialmente uma junta horizontal de assentamento, difícil de localizar com uma extensão adequada neste tipo de alvenaria), a dimensão e disposição das unidades de alvenaria (que condicionam a dimensão dos macacos a utilizar), a possibilidade de o corte fazer soltar fragmentos de enchimento (o que altera os caminhos de carga originais) ou levar a roturas localizadas das pedras, e a dificuldade de posicionamento do equipamento de medição de deslocamentos. Isto introduz subjetividade no procedimento de interpretação de resultados. Impõe-se por isso determinar um procedimento uniformizado de aplicação do ensaio de macacos planos em paredes irregulares de alvenaria de pedra, tanto de modo a assegurar que os resultados obtidos são representativos da parede em causa, como a permitir a comparação entre diferentes campanhas experimentais (Cescatti *et al.*, 2016).

O registo da área de carregamento efetivo dos macacos afigura-se como a principal condicionante da fiabilidade dos resultados. Impõem-se por isso também algumas considerações acerca da eficácia do procedimento adotado para a determinação da área de alvenaria efetivamente carregada pelo macaco plano. Constatou-se que, além de requerer sensibilidade do analista, estando por isso sujeito a alguma subjetividade, este procedimento apresenta a desvantagem de, em algumas situações, a remoção dos macacos planos da parede poder danificar o conjunto de papéis químicos, dificultando ainda mais a análise da área carregada. Um procedimento que pode ser utilizado nestas situações será estimar a área carregada do macaco por observação visual do macaco deformado, após retirada. Por outro lado, e mesmo que seja possível manter a integridade do registo químico durante a remoção dos macacos, esta operação pode causar a marcação de áreas carregadas que derivam exclusivamente do contacto durante este procedimento, e não durante a pressurização do macaco; a tensão aplicada à parede vem assim sobrestimada.

Salienta-se ainda o facto de, em algumas situações, a remoção dos macacos planos só poder ser feita com recurso a procedimentos que implicam o desmonte das zonas em torno destes (Figura 4.31). Esta necessidade pode também surgir em virtude de a serra de corte ficar presa na alvenaria durante a realização dos entalhes. Uma das principais vantagens deste método, a reduzida intrusividade na estrutura existente, fica assim posta em causa, sendo que em alguns casos o dano causado às paredes será manifestamente inaceitável. Além disso, quando o desmonte é forçado ainda durante o corte da parede, fica também impossibilitada a realização do ensaio (duplo e/ou simples) na zona em causa.



Figura 4.31 – Dano causado pela necessidade de remover os macacos planos presos

A observação visual de várias das amostras de granito recolhidas confirmou estar-se em presença de granitos de diversos tipos, de grão médio a grosseiro, e com presença de biotite e moscovite. A caracterização mecânica, em laboratório, de uma amostra de granito recolhida permitiu concluir a sua reduzida resistência mecânica. Constatou-se ainda o elevado estado de alteração das amostras recolhidas, o que pode ajudar a justificar o valor de resistência obtido.

---

## 5 ALVENARIAS ANTIGAS DE PEDRA EM PORTUGAL — PROPOSTA DE VALORES DE REFERÊNCIA PARA AS PROPRIEDADES MECÂNICAS

### 5.1 Importância da caracterização de alvenarias de pedra

Em intervenções sobre edifícios existentes, é da maior importância dispor de informação que represente, de forma fiável, tanto o sistema estrutural como as propriedades dos materiais (ICOMOS, 2003). Estes dados constituem informação fundamental não só para a avaliação da segurança, mas também para o dimensionamento de soluções de reforço (Costa, 2002).

As paredes de alvenaria de pedra, de um ou mais paramentos, constituem uma tipologia construtiva presente em toda a bacia do Mediterrâneo, constituindo uma parte importante do parque edificado português, monumental ou corrente. Relativamente ao material pétreo empregue, e como aproximação genérica, é possível constatar, no território continental, a predominância de granitos em Trás-os-Montes, nas Beiras, e no Minho e Douro Litoral; dos xistos na região do Douro e em algumas zonas das Beiras e do Algarve; e dos calcários e mármore na zona de Lisboa, Algarve, Beira Litoral e parte do Alentejo. Nos arquipélagos dos Açores e Madeira verifica-se a predominância de rochas vulcânicas, nomeadamente basalto e tufo.

A adequada caracterização material e mecânica das paredes de alvenaria de pedra constitui um passo essencial na definição de estratégias de intervenção conducentes à salvaguarda do edificado presente nos núcleos urbanos antigos, em que a grande maioria dos elementos verticais de suporte é deste tipo. No entanto, a escassez de dados acerca do comportamento mecânico da alvenaria de pedra é uma questão com a qual os projetistas geralmente se deparam quando lidam com intervenções em construções antigas, pondo em risco, com intervenções pouco informadas, quer a autenticidade histórica do edificado, quer a própria segurança do edifício. De facto, ao reduzido número de programas experimentais desenvolvidos que abordem especificamente a caracterização do comportamento mecânico da alvenaria de pedra (Warnecke, 1995), acresce também a reduzida fiabilidade estatística dos resultados obtidos, bem como a dificuldade em extrapolar resultados obtidos com base em tipologias específicas, muitas vezes geograficamente localizadas.

Como foi já referido anteriormente, nos casos em que se recorre apenas à inspeção visual da alvenaria para estimar as suas propriedades mecânicas (seja por restrições técnicas, seja

quando o valor patrimonial da construção imponha o recurso a técnicas não-destrutivas), a atribuição realista de valores para as propriedades mecânicas poderá até, em muitos casos, ter maior influência do que a precisão computacional na modelação fiável da resposta da estrutura em causa (Augenti *et al.*, 2012).

Uma das formas de aumentar a fiabilidade dos pressupostos assumidos na análise estrutural de alvenarias antigas de pedra consiste em garantir a disponibilização continuada de informação relativa a características mecânicas de alvenaria, especialmente as obtidas em ensaios *in situ*. Com o objetivo de contrariar o vazio atualmente existente, a *Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica* (ReLUIS) (Augenti *et al.*, 2012) desenvolveu um sistema *online* de armazenamento e consulta de informação relativa a características mecânicas de alvenaria, designado MADA (Masonry DATabase), o qual é atualizado em permanência com base em dados recolhidos a partir de artigos científicos, relatórios e livros (Figura 5.1). A informação disponibilizada neste arquivo permite levar a cabo análises comparativas entre as várias campanhas experimentais, de modo a rever os valores indicados em documentos normativos (Augenti e Parisi, 2009), bem como melhorar a informação disponível para suportar o projeto de intervenção em paredes antigas de alvenaria.

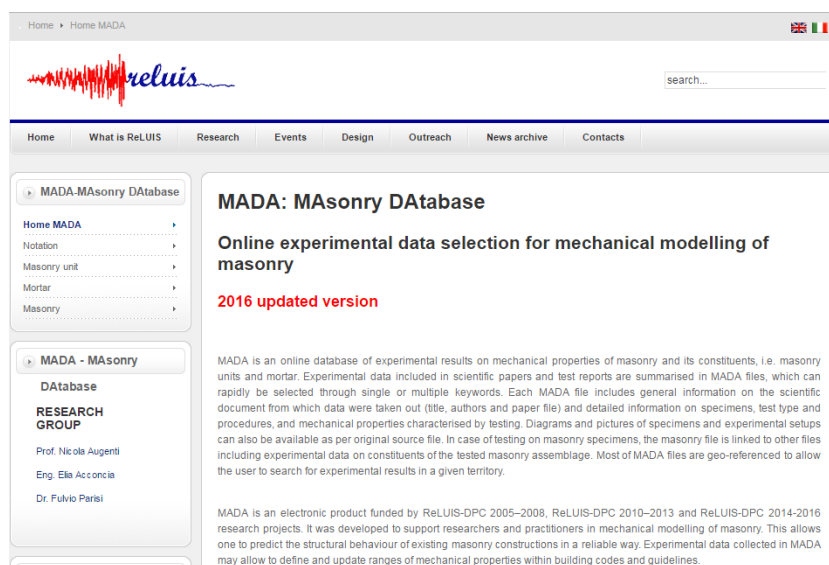


Figura 5.1 – Página de entrada da base de dados MADA

## 5.2 A caracterização de alvenarias de pedra a nível nacional

Diversas campanhas experimentais realizadas *in situ* têm permitido aumentar o conhecimento das propriedades mecânicas das paredes de alvenaria de pedra presentes no território nacional, tanto no Continente como no Arquipélago dos Açores (Oliveira *et al.*, 2000; Costa, 2002;

Roque, 2002; Pagaimo, 2004; Vicente, 2008; Ferreira, 2010; Miranda, 2011; Almeida, 2013; Ferreira, 2015; Simões *et al.*, 2016).

A análise da informação disponível, no entanto, e no que se refere às tipologias analisadas, nem sempre se revela fácil ou exequível, muito por força da ausência de um procedimento standardizado de recolha e apresentação da informação relevante, o que é tanto mais penalizador devido à heterogeneidade desta técnica construtiva. Na verdade, e para além do uso de terminologias de base regional, verifica-se muitas vezes a ausência de informação detalhada relativa à tipologia da alvenaria empregue, no que concerne a formas e dimensões das pedras, número de paramentos, constituintes da argamassa e qualidade do assentamento (grau de imbricamento e travamento). Constata-se também o recurso frequente a designações demasiado genéricas como “alvenaria tradicional”, “argamassa de cal e areia” ou “argamassa de barro”. Esta situação dificulta a comparação entre técnicas construtivas, bem como a assunção fiável de pressupostos relativos ao comportamento mecânico da alvenaria.

Ensaio experimentais conduzidos em laboratório em provetes aí construídos têm também permitido obter informação relativa ao comportamento da alvenaria (Vasconcelos, 2005; Oliveira e Lourenço, 2006; Pinho, 2007; Almeida, 2013; Barros, 2014; Ferreira, 2015) (Figura 5.2).



Figura 5.2 – Construção de paredes de alvenaria em laboratório para ensaio experimental (Ferreira, 2015)

A caracterização mecânica, em ambiente laboratorial, de painéis de paredes, provenientes de edifícios existentes e destinadas a demolição, tem sido igualmente uma via adotada por alguns investigadores (Costa, A. A. *et al.*, 2009; Miranda, 2011; Almeida, 2013) (Figura 5.3). No



entanto, como se referiu, este procedimento comporta elevada complexidade logística, nomeadamente ao nível do transporte, pelo que nem sempre é exequível, além da dificuldade de acesso a paredes antigas a demolir.

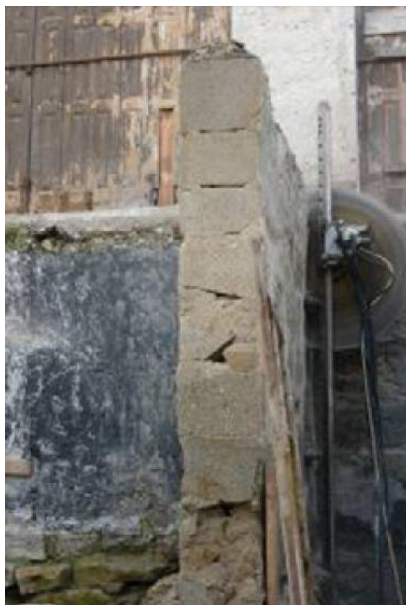


Figura 5.3 – Corte de troço de parede *in situ* para análise em laboratório (Almeida, 2013)

### **5.3 Proposta de valores de referência para as propriedades mecânicas de alvenarias antigas de pedra em Portugal**

Como contributo para a síntese do conhecimento relativo às propriedades mecânicas de alvenarias de pedra em Portugal, apresenta-se de seguida uma recolha crítica da informação presente na literatura académica, técnica e científica, referente a campanhas de caracterização de alvenarias antigas de pedra. Com base na informação coligida, esboça-se uma primeira proposta de valores de referência para diferentes tipologias de alvenaria presentes no território nacional, para fins de modelação numérica, avaliação da segurança ou projeto de intervenção estrutural.

Quadro 5.1 – Proposta de valores de referência: Alvenaria de calcário (1)

	Tipologia	Localidade	Pedra	Argamassa	Alvenaria		
			$f_b$ N/mm <sup>2</sup>	$f_m$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{mas}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{mas}$ kN/mm <sup>2</sup>	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>
Pagaimo (2004)	Alvenaria de pedra irregular	Tentúgal					
	Pedra: Calcário (Pedra de Ançã) Argamassa: Barro e cal	(Ensaio de macacos planos)	-	-	1.0	0.3	-
<b>Proposta</b>							
		-	-	-	<b>1.0</b>	<b>0.255<sup>(1)</sup></b>	-
<sup>(1)</sup> Redução dos valores em 15 % (ASTM C1197-91)							

Quadro 5.2 – Proposta de valores de referência: Alvenaria de calcário (2)

	Tipologia	Localidade	Pedra	Argamassa	Alvenaria		
			$f_b$ N/mm <sup>2</sup>	$f_m$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{mas}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{mas}$ kN/mm <sup>2</sup>	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>
Vicente (2008)	Alvenaria de pedra irregular						
	Pedra: Calcários dolomíticos e calcários margosos Argamassa: Argamassas de cal com areia do rio, seixo pequeno e saibro (por vezes também terra rossa e barro) ao traço 1:2 ou 2:3.	Coimbra (Baixa) (Ensaio de macacos planos)	-	-	0.76	1.713	-
<b>Proposta</b>							
		-	-	-	<b>0.76</b>	<b>1.713</b>	-

Quadro 5.3 – Proposta de valores de referência: Alvenaria de calcário (3)

	Tipologia	Localidade	Pedra	Argamassa	Alvenaria		
			$f_b$ N/mm <sup>2</sup>	$f_m$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{mas}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{mas}$ kN/mm <sup>2</sup>	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>
Simões (2016)	Alvenaria de pedra irregular Pedra: Calcário Argamassa: Cal e areia	Lisboa (Edifício Pombalino)  (Ensaio de macacos planos)	-	-	1.89 (2)	2.00 (2)	-
<sup>(1)</sup> Redução dos valores em 15 % (ASTM C1197-91)							
<sup>2)</sup> 1 ensaio							
<b>Proposta</b>		-	-	-	<b>1.89</b>	<b>1.70</b> <sup>(1)</sup>	-

Quadro 5.4 – Proposta de valores de referência: Alvenaria de calcário (4)

	Tipologia	Localidade	Pedra	Argamassa	Alvenaria		
			$f_b$ N/mm <sup>2</sup>	$f_m$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{mas}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{mas}$ kN/mm <sup>2</sup>	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>
Simões (2016)	Alvenaria de pedra irregular Pedra: Calcário Argamassa: Cal e areia	Lisboa (Edifício Gaioleiro)  (Ensaio de macacos planos)	-	-	0.63	0.39	-
<sup>(1)</sup> Redução dos valores em 15 % (ASTM C1197-91)							
<b>Proposta</b>		-	-	-	<b>0.63</b>	<b>0.33</b> <sup>(1)</sup>	-

Quadro 5.5 – Proposta de valores de referência: Alvenaria de calcário (5)

	Tipologia	Localidade	Pedra	Argamassa	Alvenaria		
			$f_b$ N/mm <sup>2</sup>	$f_m$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{mas}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{mas}$ kN/mm <sup>2</sup>	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>
Pinho (2007)	Muretes de alvenaria irregular de pedra, com travamento, constituídos por 75 % de pedra e 25 % de argamassa (800x400x1200 mm)  Pedra: Calcário (Rio Maior)  Argamassa: Cal (cal aérea hidratada) e areia (Rio Maior), com igual parte de areia de rio e de areeiro (1:3)	- (laboratório)	47.8	0.58	0.43	0.305	17.6
<b>Proposta</b>					0.43	0.305	

Quadro 5.6 – Proposta de valores de referência: Alvenaria de calcário (6)

	Tipologia	Localidade	Pedra	Argamassa	Alvenaria		
			$f_b$ N/mm <sup>2</sup>	$f_m$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{mas}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{mas}$ kN/mm <sup>2</sup>	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>
Moreira (2015)	Provetes de alvenaria de pedra irregular  Pedra: Calcário (Monsanto)  Argamassa: Cimento, cal hidráulica, areia do rio e areia argilosa (1:3:10:16)	- (laboratório)	106.7 (8,3 %)	1.3 (16 %)	1.7 (10 %)	1.187 (31 %)	-
<b>Proposta</b>					1.7	1.187	-

Quadro 5.7 – Proposta de valores de referência: Alvenaria de basalto

	Tipologia	Localidade	Pedra	Argamassa	Alvenaria		
			$f_b$ N/mm <sup>2</sup>	$f_m$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{mas}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{mas}$ kN/mm <sup>2</sup>	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>
Costa (2002)	Alvenaria de dois paramentos, de pedra irregular, com o interior preenchido com barro ou pedra miúda  Pedra: Basalto  Argamassa: Cal e barro	Cedros (Faial)	-	-	-	0.2	-
<b>Proposta</b>		-	-	-	-	<b>0.2</b>	-

Quadro 5.8 – Proposta de valores de referência: Alvenaria de granito (1)

	Tipologia	Localidade	Pedra	Argamassa	Alvenaria		
			$f_b$ N/mm <sup>2</sup>	$f_m$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{mas}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{mas}$ kN/mm <sup>2</sup>	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>
Ferreira <i>et al.</i> (2015)	Alvenaria de dois paramentos, de pedra irregular, com enchimento de fraca qualidade (fragmentos pétreos e terra, ligados com argamassa tradicional de cal) e ligadouros  Pedra: Granito  Argamassa: Cal e barro (1:3)	- (laboratorial) (Identificação modal)	43.83 (15.96 %)	1.28 (2.66 %)	-	0.49 (17.1 %)	21
<b>Proposta</b>		-	-	-	-	<b>0.49</b>	-

Quadro 5.9 – Proposta de valores de referência: Alvenaria de granito (2)

	Tipologia	Localidade	Pedra	Argamassa	Alvenaria		
			$f_b$ N/mm <sup>2</sup>	$f_m$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{mas}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{mas}$ kN/mm <sup>2</sup>	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>
Almeida (2013)	Alvenaria de um paramento, de pedras de forma prismática, de média a grande dimensão, dispostas em alinhamentos regulares, com significativo número de calços e presença ocasional de fragmentos cerâmicos. Juntas de argamassa de espessura variável, de reduzida desagregação superficial. Grande quantidade de vazios internos.  Pedra: Granito  Argamassa: Cal e areia (1:3)	Porto  (parede existente, ensaiada em laboratório)  (Ensaio de compressão uniaxial)	60.0	1.0	3.22	0.36	-
<b>Proposta</b>							
		-	-	-	<b>3.22</b>	<b>0.36</b>	-

Quadro 5.10 – Proposta de valores de referência: Alvenaria de granito (3)

	Tipologia	Localidade	Pedra	Argamassa	Alvenaria		
			$f_b$ N/mm <sup>2</sup>	$f_m$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{mas}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{mas}$ kN/mm <sup>2</sup>	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>
Miranda (2011)	Alvenaria de um paramento, de pedras de dimensões e formas muito irregulares. Juntas de argamassa de cal, misturada com calços de granito.  Pedra: Granito  Argamassa: Cal e areia (1:3)	Porto  (parede existente, ensaiada em laboratório)  (Ensaio sónico)	-	-	-	0.4 – 0.6	-
<b>Proposta</b>							
		-	-	-	-	<b>0.4</b> - <b>0.6</b>	-

Quadro 5.11 – Proposta de valores de referência: Alvenaria de granito (4)

	Tipologia	Localidade	Pedra	Argamassa	Alvenaria		
			$f_b$ N/mm <sup>2</sup>	$f_m$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{mas}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{mas}$ kN/mm <sup>2</sup>	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>
Vasconcelos (2005)	Prismas de alvenaria de pedra irregular (150x150x490 mm)  Pedra: Granito  Argamassa: Pré-misturada (cal hidratada, metacaulino e agregados naturais)	- (laboratorial)  (Ensaio de compressão uniaxial)	69.2 (5.1 %)	5.48 (15.6 %)	18.4	1.25	-
<b>Proposta</b>		-	-	-	18.4	1.25	-

Quadro 5.12 – Proposta de valores de referência: Alvenaria de granito (5)

	Tipologia	Localidade	Pedra	Argamassa	Alvenaria		
			$f_b$ N/mm <sup>2</sup>	$f_m$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{mas}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{mas}$ kN/mm <sup>2</sup>	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>
Oliveira e Lourenço (2006)	Muretes de alvenaria de dois paramentos, de pedra irregular, com enchimento de fraca qualidade, sem ligadouros  Pedra: Granito  Argamassa: Cal e areia (1:3)	- (laboratorial)  (Ensaio de compressão uniaxial)	52.2	0.5 (7 dias)  2.9 (28 dias)  2.2 (90 dias)	1.8	-	-
<b>Proposta</b>		-	-	-	1.8	-	-



Quadro 5.13 – Proposta de valores de referência: Alvenaria de xisto (1)

	Tipologia	Localidade	Pedra	Argamassa	Alvenaria		
			$f_b$ N/mm <sup>2</sup>	$f_m$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{mas}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{mas}$ kN/mm <sup>2</sup>	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>
Roque (2002)	Alvenaria de dois paramentos, com fraco imbricamento entre si, de pedra muito irregular, de pequena a média dimensão, aglutinada com barro. Juntas muito irregulares, com presença de calços de assentamento e fragmentos de enchimento (pequenas pedras). Grande percentagem de vazios interiores, alguns de grandes dimensões. Elevado estado de desagregação material.  Pedra: Xisto  Argamassa: Barro	Bragança  (Ensaio de macacos planos)	-	-	0.7	1.0	-
						<b>0.340</b>	
	<b>Proposta</b>	-	-	-	<b>0.6</b> (3)	- <b>0.574</b> (1) (3)	-
(1) Redução dos valores em 15 % (ASTM C1197-91) (3) Eliminação dos registos desviantes							

Quadro 5.14 – Proposta de valores de referência: Alvenaria de xisto (2)

	Tipologia	Localidade	Pedra	Argamassa	Alvenaria		
			$f_b$ N/mm <sup>2</sup>	$f_m$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{mas}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{mas}$ kN/mm <sup>2</sup>	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>
Barros (2014)	Prismas em alvenaria de xisto (300x300x600 mm)	-	79.1	0.93 (18.45 %)	3.76 (5.72 %)	0.165 (130 %)	18.0
	Pedra: Xisto, recolhido de construções existentes (Carrazedo de Montenegro, Valpaços)		(laboratorial)  (Ensaio de compressão uniaxial)				
	Argamassa: Terra (Carrazedo de Montenegro, Valpaços)						
<b>Proposta</b>		-	-	-	<b>3.76</b>	<b>0.165</b>	-

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Entendidos tanto no seu plano edificado como no imaterial, os núcleos urbanos antigos constituem um importante património das sociedades atuais, que interessa salvaguardar e potenciar, tanto por meio de recuperação e reabilitação do edificado como de iniciativas de revitalização social. No que à salvaguarda do edificado corrente diz respeito, esta impõe-se não apenas pelo valor histórico, artístico ou técnico de toda e cada uma destas construções, mas sobretudo pelo carácter de todo coerente, pela unidade de conjunto que constitui no âmbito da cidade.

Em intervenções sobre edifícios existentes, é da maior importância dispor de informação que represente, de forma fíável, tanto o sistema estrutural como as propriedades dos materiais (ICOMOS, 2003). Tal é ainda mais relevante no caso dos edifícios cujos elementos resistentes verticais consistem em paredes de alvenaria de pedra, situação predominante nos núcleos urbanos antigos de Portugal, devido à variabilidade das propriedades mecânicas desta tecnologia construtiva, devida, não apenas às características dos seus componentes, mas igualmente à forma como os mesmos são dispostos. No caso de edifícios inseridos em conjuntos urbanos de valor patrimonial, a realização de ensaios destrutivos é muitas vezes desaconselhável, impondo-se a realização de procedimentos semi- ou não-destrutivos, que permitam obter, com o mínimo de dano possível, os dados a utilizar nos modelos de análise estrutural para verificação da segurança.

No caso particular da cidade de Viseu, verifica-se a escassez, na literatura, de informação relativa às propriedades mecânicas das paredes de alvenaria de pedra de granito presentes no seu núcleo antigo. Este trabalho constituiu assim um primeiro contributo com vista à caracterização tipológica e mecânica destes elementos, com o fim de informar intervenções que privilegiem a manutenção da solução estrutural original. Foram privilegiadas, na obtenção de informação relativa às propriedades mecânicas das construções analisadas, as metodologias não- ou semi-destrutivas. A caracterização compreendeu a observação visual do alçado, a realização de ensaios de macacos planos, a observação da secção transversal e a caracterização mecânica da pedra empregue.

Refira-se no entanto que os edifícios analisados foram-no não com base em critérios explícitos de representatividade do parque edificado presente no centro urbano antigo de Viseu, mas sim por questões de acessibilidade. A extrapolação dos valores obtidos nestes edifícios para a globalidade das construções presentes no núcleo antigo de Viseu é assim um

procedimento que carece de sustentação, impondo-se a realização de campanhas mais alargadas para caracterização do parque edificado da zona antiga viseense.

O ensaio de macacos planos, utilizado neste trabalho, constitui um procedimento relativamente simples, de custos reduzidos e extremamente útil na avaliação *in situ* de paredes de alvenaria de pedra, apresentando um nível de rigor compatível com o necessário para calibrar modelos de análise estrutural que informem sobre a necessidade de eventuais intervenções de reforço. Requer, no entanto, um elevado nível de perícia e experiência do operador, além de apresentar um conjunto de condicionantes que poderá afetar a fiabilidade dos resultados obtidos (Ferreira, 2010). A experiência adquirida ao longo deste trabalho permitiu identificar limitações adicionais: salienta-se o facto de, em algumas situações, a remoção dos macacos planos só poder ser feita com recurso a procedimentos que implicam o desmonte das zonas em torno destes. Uma das principais vantagens deste método, a reduzida intrusividade na estrutura existente, fica assim posta em causa, sendo que em alguns casos o dano causado às paredes será manifestamente inaceitável.

A subjetividade decorrente da incapacidade de cumprir todas as prescrições normativas relativas ao ensaio de macacos planos, visível no caso de alvenarias irregulares, impõe assim a necessidade de definir um procedimento uniformizado de aplicação do ensaio de macacos planos a paredes irregulares de alvenaria de pedra. Também a determinação da área de carregamento efetivo merece especial atenção.

A caracterização *in situ* das alvenarias de pedra, por tipificação e atribuição de propriedades mecânicas ou comportamento genérico, implica também a standardização das diferentes tipologias de paredes de alvenaria, bem como a recolha, tratamento crítico e a disponibilização da informação relativa ao comportamento das paredes.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alberti, Leon Battista (1755). “The Architecture of Leon Battista Alberti in Ten Books”. Edward Owen, London.
- Almeida, C. (2013). “Paredes de alvenaria do Porto: Tipificação e caracterização experimental”. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1 vol.
- Andreini, M., de Falco, A., Giresini, L. and Sassu, M. (2014). “Mechanical characterization of masonry walls with chaotic texture: Procedures and results of in-situ tests”. *International Journal of Architectural Heritage*, Vol. 8, pp. 376-407.
- Appleton, J. (1991). “Edifícios Antigos - Contribuição para o estudo do seu comportamento e das ações de reabilitação a empreender”. Programa de investigação apresentado a concurso para provimento na categoria de investigador-coordenador, LNEC, Lisboa.
- Aragão, M. (1936). “Viseu, Instituições Sociais”. Seara Nova, p. 173.
- Assembleia da República Portuguesa (2010). Resolução da Assembleia da República n.º 102/2010, “Adopção de medidas para reduzir os riscos sísmicos”.
- Assembleia da República Portuguesa (2015). Lei n.º 41/2015, de 3 de junho.
- ASTM (1991a). “In-situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flat-jack measurements”. C 1196-91, American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM (1991b). “In-situ measurement of masonry deformability properties using the flat-jack method”. C 1197-91, American Society for Testing and Materials, USA.
- Augenti, N. and Parisi, F. (2009). “Experimental data analysis on mechanical parameters of tuff masonry”. *Proceedings of the Conference Wondermasonry 2009: Workshop on design for rehabilitation of masonry structures*, Lacco Ameno.

- 
- Augenti, N., Parisi, F. and Acconcia, E. (2012). “MADA: Online experimental database for mechanical modelling of existing masonry assemblages”. Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, WCEE, Lisbon.
- Baggio, C., Carocci, C. (2000). “Valutazione della qualità meccanica delle murature”, in “La vulnerabilità degli edifici: valutazione a scala nazionale della vulnerabilità sismica degli edifici ordinari”. CNR - Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma.
- Barros, R. (2014). “Avaliação do comportamento material e estrutural de construções em xisto”. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães, 1 vol.
- Bell, F. (2007). “Engineering geology”. Elsevier, Oxford.
- Binda, L. (2005). “The importance of investigation for the diagnosis of historic buildings: application at different scales (centres and single buildings)”. Proceedings of the 4th International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions, SAHC 2004, Padova.
- Binda, L., Baronio, G., Penazzi, D., Palma, M. and Tiraboschi, C. (1999). “Caratterizzazione di murature in pietra in zona sismica: DATA-BASE sulle sezioni murarie e indagini sui materiali”. Atti del 9° Convegno Nazionale “L’ingegneria Sismica in Italia”, Turin.
- Binda, L. and Saisi, A. (2002). “State of the art of research on historic structures in Italy”. Proceedings of 11th Advanced Research Initiation Assisting and Developing Networks in Europe workshop, ARIADNE, Prague.
- Binda, L., Saisi, A. and Tiraboschi, C. (2000). “Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries”. Construction and Building Materials, Vol. 14, pp. 199-233.
- Binda, L. and Tiraboschi, C. (1999). “Flat-jack Test as a Slightly Destructive Technique for the Diagnosis of Brick and Stone Masonry Structures”. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen and Baudenkmalpflege (International Journal for Restoration of Buildings and Monuments), Vol. 5, Issue 5, pp. 449-472.
- Borri, A. and de Maria, A. (2009). “Eurocode 8 and Italian Code. A comparison about safety levels and classification of interventions on masonry existing buildings”. Proceedings of the “Eurocode 8 Perspectives from the Italian Standpoint” Workshop, Napoli.
-

- Breymann, G. (1849). “Allgemeine Bau-Constructions-Lehre, mit besonderer Beziehung auf des Hochbauwesen”. Hoffmann, Stuttgart.
- Cardani, G., and Binda, L. (2013). “Guidelines for the masonry quality evaluation in built heritage”. Proceedings of the Conference “Built Heritage 2013 - Monitoring Conservation Management”.
- Carocci, C. (2001). “Guidelines for the safety and preservation of historical centres in seismic areas”. Proceedings of the 3rd International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions, SAHC 2001, Guimarães.
- Casella, G. (2003). “Gramáticas de pedra. Levantamento de tipologias de construção murária”. Centro Regional de Artes Tradicionais, Porto.
- CEN (2005). “Eurocode 6: Design of masonry structures. Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures”. EN 1996-1-1. European Committee for Standardisation, Brussels.
- CEN (2005). “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 3: Assessment and retrofitting of buildings”. EN 1998-3. European Committee for Standardisation, Brussels.
- Cescatti, E., Dalla Benetta, M., Modena, C. and Casarin, F. (2016). “Analysis and evaluations of flat jack test on a wide existing masonry buildings sample”. Proceedings of the 16th International Brick and Block Masonry Conference, IBMac, Padova.
- CNR - GNDT (2000). “Caratterizzazione delle murature in pietra e mattoni ai fini dell'individuazione di opportune tecniche di riparazione”. CNR - Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma.
- COE (1975). “Carta Europeia do Património Arquitectónico”. Conselho da Europa, Estrasburgo.
- Cóias, V. (2007). “Projecto RECOPAC - Reabilitação Estrutural de Edifícios Antigos - Técnicas Pouco Intrusivas”. Stap, S.A. e Universidade do Algarve.
- Congresso sobre o Património Arquitectónico Europeu (1975). “Declaração de Amesterdão”. Amesterdão.
-

- 
- Costa, A. (2002). “Determination of mechanical properties of traditional masonry walls in dwellings of Faial Island, Azores”. *Earthquake Engineering e Structural Dynamics*, Vol. 31, Issue 7, pp. 1361-1382.
- Costa, A. A. (2012). “Seismic assessment of the out-of-plane performance of traditional stone masonry walls”. *Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto*, 1 vol.
- Costa, A. A., Arêde, A., Costa, A., Guedes, J., Silva, B. (2012). “Experimental testing, numerical modelling and seismic strengthening of traditional stone masonry: Comprehensive study of a real Azorian pier”. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol 10, Issue 1, pp. 135-159.
- Cracóvia 2000 (2000). “Carta de Cracóvia 2000: Princípios para a conservação e o restauro do património construído”. *Conferência Internacional sobre Conservação: Sessão Plenária “O património cultural como fundamento do desenvolvimento da civilização”*. Cracóvia.
- de Felice, G. (2011). “Out-of-plane seismic capacity of masonry depending on wall section morphology”. *International Journal of Architectural Heritage*, Vol. 5, Issue 4-5, pp. 466-482.
- DIN (1999). “Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken”. RIL 805. Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- FEMA (1999). “Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings: Basic procedures manual”. FEMA 306. Federal Emergency Management Agency, USA.
- Ferreira, T. (2015). “Out-of-plane seismic performance of stone masonry walls: Experimental and analytical assessment”. *Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro*, 1 vol.
- Ferreira, T. (2010). “Avaliação da vulnerabilidade sísmica de núcleos urbanos antigos: Aplicação ao núcleo urbano antigo do Seixal”. *Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do Diploma de Estudos Avançados em Reabilitação do Património Edificado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto*, 1 vol.
- Ferreira, T., Costa, A. A., Arêde, A., Gomes, A., and Costa, A. (2015). “Experimental characterization of the out-of-plane performance of regular stone masonry walls,



- including test setups and axial load influence”. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 13, Issue 9, pp. 2667-2692.
- Ferreira, T., Santos, C., Vicente, R., e Mendes da Silva, J. (2013). “Caracterização arquitetónica e construtiva do património edificado do núcleo urbano antigo do Seixal”. *Conservar Património*, Vol. 17, pp. 21-38.
- Gelmi C., Modena C., Rossi P.P., and Zaninetti A. (1993). “Mechanical characterization of stone masonry structures in old urban nuclei” *Proceedings of the 6th North American Masonry Conference*, Philadelphia.
- Geological Society (1999). “Stone for buildings and civil engineering”. Geological Society, London.
- Giuffrè, A. (1996). “A mechanical model for statics and dynamics of historical masonry buildings”, in “Protection of the architectural heritage against earthquakes”. Springer-Verlag, Udine.
- Giuffrè, A., Pagnoni, T. and Tocci, C. (1994). “In-plane seismic behavior of historical masonry walls”. *Proceedings of the 10th International Brick and Block Masonry Conference, IB2MAC*, Calgary.
- Governo da República Portuguesa (2009). Decreto-Lei n.º 555/99, de 16 de dezembro.
- Governo da República Portuguesa (2009). Decreto-Lei n.º 307/2009, de 23 de outubro.
- Governo da República Portuguesa (2014). Decreto-Lei n.º 53/2014, de 8 de abril.
- Governo da República Portuguesa (2015). Decreto-Lei n.º 194/2015, de 14 de setembro.
- Governo da República Portuguesa (2015). Decreto-Lei n.º 214-G/2015, de 02 de outubro.
- Huerta, S. (2001). “Mechanics of masonry vaults: The equilibrium approach”. *Proceedings of the 3rd International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions, SAHC 2001*, Guimarães.
- ICC (2003). “International building code”. International Code Council.
-

- 
- ICOMOS (1964). “Carta Internacional de Conservação e Restauro dos Monumentos e Sítios”. Conselho Internacional de Monumentos e Sítios. Paris.
- ICOMOS (1972). “Resolução do Simpósio sobre a Introdução da Arquitetura Contemporânea em Grupos Antigos de Edifícios”. Conselho Internacional de Monumentos e Sítios. Paris.
- ICOMOS (1975a). “Resoluções de Bruges - Princípios da Reabilitação de Cidades Históricas”. Conselho Internacional de Monumentos e Sítios. Paris.
- ICOMOS (1975b). “Resoluções do Simpósio Internacional sobre a Conservação de Cidades Históricas Pequenas”. Conselho Internacional de Monumentos e Sítios. Paris.
- ICOMOS (1987). “Carta Internacional para a Salvaguarda das Cidades Históricas”. Conselho Internacional de Monumentos e Sítios. Paris.
- ICOMOS (2003). “Recomendações para a Análise, Conservação e Restauro Estrutural do Património Arquitectónico”. Conselho Internacional de Monumentos e Sítios. Paris.
- IMO (1931). “Carta de Atenas”. Escritório Internacional dos Museus. Sociedade das Nações. Genebra.
- INE, I.P. e LNEC, I.P. (2013). “O Parque habitacional e a sua reabilitação - Análise e evolução 2001-2011”. INE, I.P. & LNEC, Lisboa.
- IPQ (2000). “Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à compressão” NP EN 1926. Instituto Português da Qualidade, Caparica.
- ISO (2010). “Basis for design of structures - Assessment of existing structures”. ISO 13822. International Organization for Standardization.
- Jokilehto, J. (1986). “A history of architectural conservation - The contribution of english, french, german and italian thoughts towards an international approach to the conservation of cultural property”. Tese de doutoramento, Universidade de York, York, 1 vol.
- Kaushik, H., Rai, D. and Jain, S. (2007). “Stress-strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19, Issue 9, pp. 728-739.

- 
- Leitão, L. (1896). “Arma de Engenharia - Curso Elementar de Construções Elaborado segundo o Programa da Escola Central da mesma Arma”. Imprensa Nacional, Lisboa.
- Lombillo, I., Thomas, C., Villegas, L., Fernández-Álvarez, J. and Norambuena-Contreras, J. (2013). “Mechanical characterization of rubble stone masonry walls using non and minor destructive tests”. *Construction and Building Materials*, Vol. 43, pp. 266-277.
- Lourenço, P. and Gregorczyk, P. (2000). “A review on flat-jack testing”. *Revista do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães*, Vol. 9, pp. 39-50.
- Lourenço, P., Pagaimo, F. e Júlio, E. (2005). “Caracterização das paredes de alvenaria da vila de Tentúgal”. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, Vol. 54, pp. 35-42.
- Machado, J. S., Cruz, H. e Nunes, L. (2003). “Mitos e factos relacionados com o desempenho de elementos de madeira em edifícios”. *Atas do 3.º Encontro Sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, ENCORE, Lisboa*.
- Magenes, G., Penna, A., Galasco, A., Rota, M. (2010). “Experimental characterisation of stone masonry mechanical properties”. *Proceedings of the 8th International Masonry Conference, Dresden*.
- Männ, W. (1982). “Statistische Auswertung von Druckversuchen an Mauerwerkskörpern in geschlossener Darstellung mit Hilfe von Potenzfunktionen - Statistical evaluation of tests on masonry by potential functions”. *Proceedings of the 6th International Brick and Block Masonry Conference, IB2MAC, Rome*.
- Männ, W. and Rustmeier, H. (1982). “Druckfestigkeit von Mauerwerk aus Bruchsteinen - Compressive strength of masonry walls in quarry stone”. *Proceedings of the 6th International Brick and Block Masonry Conference, IB2MAC, Rome*.
- Mascarenhas, J. M. (2002). “Técnicas tradicionais de construção de alvenarias - A literatura técnica de 1750 a 1900 e o seu contributo para a conservação de edifícios históricos”. *Livros Horizonte, Lisboa*.
- Milosevic, J., Gago, A., Lopes, M. and Bento, R. (2013). “Experimental assessment of shear strength parameters on rubble stone masonry specimens”. *Construction and Building Materials*, Vol. 47, pp. 1372-1380.

- 
- Ministério das Obras Públicas (1951). Decreto-Lei n.º 38 382, de 7 de agosto de 1951.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2008). “Decreto Ministeriale del 14 gennaio 2008”. in Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008. Norme tecniche per le costruzioni NTC 08. (Circolare esplicativa n. 617 del 2 febbraio 2009, “Istruzioni per l'applicazione delle 'Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni’ di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008”. Gazzetta Ufficiale n. 47, Supplemento ordinario n. 27, del 26 febbraio 2009).
- Miranda, L. (2011). “Ensaio acústicos e de macacos planos em alvenarias resistentes”. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1 vol.
- Moreira, S., Ramos, L., Oliveira, D. and Lourenço, P. (2014). “Experimental behavior of masonry wall-to-timber elements connections strengthened with injection anchors”. *Engineering Structures*, Vol. 81, pp. 98-109.
- MSJC (2002). “Building code requirements for masonry structures”. ACI 530-02/ASCE 5-02/TMS 402-02, American Concrete Institute, Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers, The Masonry Society, Detroit.
- National Instruments (2010). LabView SignalExpress.
- Oliveira, E., Galhano F. (2003). “Portugal de Perto - Arquitetura Tradicional Portuguesa”. Dom Quixote, Lisboa.
- Oliveira, C., Guedes, J., Lucas, A., e Oliveira, H. (2000). "Estudo sobre o comportamento sísmico de alvenaria tradicional". Atas do 1.º Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas, REPAR 2000, Lisboa.
- Oliveira, D., and Lourenço, P. (2006). “Experimental behaviour of three-leaf stone masonry walls”. Proceedings of the “The construction aspects of built heritage protection” Conference and Brokerage Event, Dubrovnik.
- Pagaimo, F. (2004). “Caracterização morfológica e mecânica de alvenarias antigas. Caso de estudo da vila histórica de Tentúgal”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 1 vol.

- 
- Pereira da Costa, F (1955). “Enciclopédia Prática da Construção Civil”. Edição do Autor, Lisboa.
- Pinho, F. (2007). “Paredes de alvenaria ordinária: Estudo experimental com modelos simples e reforçados”. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 1 vol.
- Proske, D., Gelder, P. v. (2009). “Safety of Historical Stone Arch Bridges”. Springer, Berlin.
- Quelhas, B., Cantini, L., Guedes, J., da Porto, F., Almeida, C. (2014) “Characterization and Reinforcement of Stone Masonry Walls”, in “Structural Rehabilitation of Old Buildings”. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.
- RILEM (1991a). “In-situ stress tests on masonry based on the flat jack”. LUM D2, International union of laboratories and experts in construction materials, systems and structures.
- RILEM (1991b). “In-situ strength/elasticity tests on masonry based on the flat jack”. LUM D3, International union of laboratories and experts in construction materials, systems and structures.
- Rondelet, J. (1802). “Traité théorique et pratique de l’art du bâtir”. Chez l’ Auteur, Paris.
- Roque, J. (2002). “Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães, 1 vol.
- Rossi, P. P. (1982). “Analysis of mechanical characteristics of brick masonry tested by means of non-destructive in-situ tests”. Proceedings of the 6th International Brick Masonry Conference, IBMac, Rome.
- Silva, B. (2012). “Diagnosis and strengthening of historical masonry structures: Numerical and experimental analyses”. Dissertação de Doutoramento em Reabilitação Estrutural de Edifícios Históricos e Modernos, Universidade de Brescia, Brescia, 1 vol.
- Silveira, D., Varum, H., Costa, A., Lima, E. (2013). “Levantamento e caracterização do parque edificado em adobe na cidade de Aveiro”. digitAR, Vol. 1, pp. 102-108.

- 
- Simões, A., Bento, R., Gago, A. and Lopes, M. (2016). “Mechanical characterization of masonry walls with flat-jack tests”. *Experimental Techniques*, Vol. 40, Issue 3, pp. 1163-1178.
- Sousa, L. (2010). “Caraterização e parametrização de paredes portantes de alvenarias de pedra quanto à regularidade geométrica no seu plano”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1 vol.
- Swain, G. (1927). “Structural engineering, stresses, graphical statics and masonry”. McGraw-Hill, New York.
- Tomaževič, M. (2005). “Research for seismic redesign of historical masonry buildings”. *Proceedings of the 4th International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions, SAHC 2004, Padova*.
- UNESCO (1976). “Recomendações acerca da Salvaguarda e Papel Contemporâneo das Zonas Históricas”. Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura.
- Uranjek, M., Bosiljkov., Žarnić, R., Bokan-Bosiljkov, V. (2012). “In situ tests and seismic assessment of a stone-masonry building”. *Materials and Structures*, Vol. 45, pp. 861-879.
- Valluzzi, M. R. (2007). “On the vulnerability of historical masonry structures: Analysis and mitigation”. *Materials and Structures*, Vol. 40, pp. 723-743.
- Varum, H., Costa, A., Pereira, H., Almeida, J. e Rodrigues, H. (2008). “Caracterização do comportamento estrutural de paredes de alvenaria de adobe”. *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões*, Vol. 15, pp. 23-32.
- Vasconcelos, G. (2005). “Experimental investigations on the mechanics of stone masonry: Characterization of granites and behavior of ancient masonry shear walls”. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães, 1 vol.
- Vicente, R. (2008). “Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana: Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra”. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro, 1 vol.
-

- Vicente, R., Ferreira, T., Mendes da Silva, J. and Varum, H. (2015). “In Situ Flat-Jack Testing of Traditional Masonry Walls: Case Study of the Old City Center of Coimbra, Portugal”. Vol. 9, pp. 794-810.
- Vicente, R., Mendes da Silva, J. and Varum, H. (2005). “Strategies for building pathology reports in a urban rehabilitation process”. Proceedings of the 10th International Conference on Durability of Building Materials and Components, 8 DBMC, Lyon.
- Warnecke, P. (1995) “Tragverhalten und Konsolidierung von historischem Natursteinmauerwerk”. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 1 vol.