

CARACTERIZAÇÃO DE TENSÕES EM PAREDES DE ALVENARIA RESISTENTE NO CONTEXTO DA REABILITAÇÃO SÍSMICA

Paulo Jorge Medeiros Cabral

**Mestrado em Engenharia Civil
Área de Especialização: Construção
Dissertação**

ORIENTADORES: Professor Doutor João Manuel Carvalho Estêvão
Professor Doutor Alfredo Manuel Gonçalves da Silva Braga

Dezembro de 2014
Dissertação submetida na Universidade do Algarve

À memória
do meu pai e irmão

Conhecimento é Poder
Francis Bacon

AGRADECIMENTOS

Ao terminar este trabalho queria manifestar o mais sincero agradecimento a todos os que me apoiaram e contribuíram, de forma direta ou indireta, para concretização da presente dissertação.

Contudo, não posso deixar de dirigir com especial relevância este agradecimento:

Ao professor Doutor João Estevão não só pela orientação, como também pelo empenho e profissionalismo e disponibilidade que manifestou no decurso dos trabalhos.

Ao professor Doutor Alfredo Braga, pela sua dedicação e disponibilidade que demonstrou em todo o processo da realização dos trabalhos.

Aos meus pais e irmãos, pelo esforço realizado durante estes anos de curso, assim como pelo amor, apoio e compreensão que sempre souberam dar.

A todos os colegas e amigos, pelo apoio, amizade e disponibilidade ao longo de todo o meu percurso académico.

RESUMO

O Algarve possui um conjunto de edifícios vernaculares cujo sistema estrutural é constituído por paredes resistentes de alvenaria simples. A avaliação da vulnerabilidade estrutural desse tipo de construções obriga ao conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais constituintes. No entanto, existe uma grande heterogeneidade nas propriedades dessas paredes. Uma forma de ultrapassar esse problema poderá ser o recurso a bases de dados com resultados de ensaios laboratoriais, e que sejam depois aferidos com alguns ensaios *in-situ*. Assim, foi dado início à realização de uma campanha de ensaios laboratoriais de pequenos provetes de alvenaria. Em primeiro lugar, foi realizada uma caracterização tipológica geral das construções de alvenaria tradicional de pedra existentes na região. Depois, foram executados quatro pequenos provetes de alvenaria ordinária, realizadas com pedra irregular de diferentes formas geométricas, com recurso aos materiais e às técnicas tradicionais usadas no Algarve. Esses provetes foram sujeitos a cargas de compressão, com recurso a um macaco hidráulico ligado a uma célula de carga. Nos provetes, também foram colocados, no terço central, diversos transdutores lineares de deslocamento. Os provetes foram levados até à rotura por compressão, o que permitiu determinar o módulo de elasticidade do material, e a tensão de rotura, assim como foram obtidos gráficos das relações entre extensões e tensões do material. Também foi realizada a comparação dos resultados obtidos em laboratório com os obtidos de ensaios realizados *in-situ* com macacos planos, que se apresentam.

PALAVRAS-CHAVE: alvenaria de pedra, Algarve, ensaios laboratoriais, ensaios *in-situ*.

ABSTRACT

The Algarve has a set of vernacular buildings which their structural systems are composed by simple masonry walls. The structural vulnerability assessment of such constructions requires the knowledge of the mechanical properties of their constituent materials. However, these properties are highly heterogeneous. One way to overcome this problem could be the creation of databases with laboratory test results, which can be calibrated with some in-situ tests. In this context, a campaign of laboratory tests of small masonry specimens was initiated. First, a general typological characterization of traditional stone masonry constructions existing in the region was carried out. Then, four small ordinary masonry samples, which were made of irregular stones with different geometric shapes, were executed using materials and traditional techniques of the Algarve. These specimens were subjected to compressive loads, using a hydraulic jack connected to a load cell. Several linear displacement transducers were also placed in the central third of the samples. The specimens were loaded until rupture, which enabled the determination of the young's modulus and the compressive strength, as well as the stress-strain relations of the materials. It was also carried out a comparison between the results obtained in laboratory and those obtained from in-situ tests using flatjack method.

KEYWORDS: NATURAL STONE MASONRY, ALGARVE, LABORATORY TESTS, *IN-SITU* TESTS.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
2. CAPÍTULO 2	3
2.1. CARACTERIZAÇÃO DA ALVENARIA TRADICIONAL NO ALGARVE	3
2.1.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO	3
2.1.2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA REGIÃO DO ALGARVE	7
2.2. PAREDES DE ALVENARIA DE EDIFÍCIOS ANTIGOS	9
2.3. CLASSIFICAÇÃO TIPOLOGICA DE ALVENARIA, QUANTO À FUNÇÃO	10
2.3.1. PAREDES DE ALVENARIA RESISTENTES.....	10
2.3.2. PAREDES DIVISÓRIAS	12
2.4. CLASSIFICAÇÃO TIPOLOGICA DE ALVENARIA, QUANTO À NATUREZA E CARACTERÍSTICAS ...	13
2.4.1. CLASSIFICAÇÃO TIPOLOGICA DOS ALÇADOS	15
2.4.2. CLASSIFICAÇÃO DA TIPOLOGIA DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS	18
2.5. CARACTERÍSTICAS DA PAREDE DE ALVENARIA DE PEDRA	19
2.6. AÇÕES NA ESTRUTURA E MATERIAIS	21
2.7. TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO ESTRUTURAL	21
2.7.1. TÉCNICAS DE ENSAIO NÃO-DESTRUTIVOS	22

2.7.2. TÉCNICAS DE ENSAIOS LIGEIRAMENTE DESTRUTIVOS	23
3. Capítulo 3	25
3.1. COMPORTAMENTO SÍSMICO DE EDIFÍCIOS DE ALVENARIA	25
3.1.1. RISCO SISMO DA REGIÃO DO ALGARVE	25
3.1.2. ANOMALIAS TÍPICAS EM PAREDES DE ALVENARIA DE PEDRA	26
3.2. MECANISMO DE COLAPSO DE PAREDES DE ALVENARIA	29
3.3. TÉCNICAS DE REFORÇO DE PAREDES DE ALVENARIA DE PEDRA.....	30
3.3.1. TÉCNICA DE REBOCO ARMADO	30
3.3.2. TÉCNICA DE CALDAS DE INJEÇÃO	30
3.3.3. TÉCNICA COM TIRANTES	31
4. Capítulo 4	34
4.1. EUROCÓDIGO 8, PARTE 3.....	34
4.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE ALVENARIA RESISTENTE.	35
4.2.1. OBJETIVOS E DESCRIÇÃO GERAL DO ENSAIO.....	35
4.2.2. CONDICIONANTES TEÓRICAS DO ENSAIO DE MACACOS PLANOS	36
4.2.3. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS	36
4.2.3.1. Ensaio simples.....	36
4.2.3.2. Ensaio duplo	37
4.3. EQUIPAMENTO USADO	38
4.3.1. MACACOS PLANOS SEMICIRCULARES	38
4.3.2. TRANSDUTORES LINEARES DE DESLOCAMENTO	39
4.3.3. BOMBA HIDRÁULICA	39

4.3.5. ALONGÂMETRO DIGITAL.....	39
4.3.6. SERRA CIRCULAR DE CORTE.....	40
4.4. METODOLOGIA	41
4.4.1. DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE TENSÃO	41
4.6. ENSAIO <i>IN-SITU</i> COM MACACOS PLANOS.	43
4.6.1. PROCEDIMENTO DO ENSAIO DOS MACACOS PLANOS.....	43
4.6.2. REALIZAÇÃO DO ENSAIO SIMPLES	45
4.6.3. REALIZAÇÃO DO ENSAIO DUPLO.....	49
4.6.4. CÁLCULO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE E COEFICIENTE POISSON	52
4.6.4.1. Módulo de elasticidade	52
4.6.4.2. Cálculo do coeficiente Poisson	53
5. Capítulo 5	56
5.1. ENSAIOS LABORATORIAIS	56
5.1.1. PREPARAÇÃO DE QUATRO PROVETES DE ALVENARIA DE PEDRA	56
5.1.2. CARACTERIZAÇÃO DAS UNIDADES DE ALVENARIA	56
5.2. ENSAIO À COMPRESSÃO DAS AMOSTRAS DE PEDRA.	57
5.3. CÁLCULO DO ÍNDICE FORMA.....	60
5.4. CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA	62
5.5. REALIZAÇÃO DOS PROVETES DE ALVENARIA.	66
5.6. ENSAIO ULTRASSONS	69
5.6.1. PRINCÍPIO DO ENSAIO.....	69
5.6.1. MEDIÇÃO DA PROPAGAÇÃO DAS ONDAS ULTRA SÓNICAS.....	71
5.7. REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS À COMPRESSÃO.....	72

6. Conclusões	76
7. Bibliografia	78
ANEXOS	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Cidade de Ait-Ben-Haddou, (Marrocos, 1987).	4
Figura 2.2 - Cidade de dura Europos, (Síria, 2005).	4
Figura 2.3 - Cidade da Europa, (NIKOLOV, 2012).	4
Figura 2.4 - Catalunha, Espanha, (BENTINHO, 2013).	4
Figura 2.5 - Casa rural do Minho, (RIBEIRO, 2009).	5
Figura 2.6 - Casa típica da Beira Litoral, (CARDOSO, 2007)	5
Figura 2.7 - Casa, Trás- os- Montes, (RIBEIRO, 2013).	5
Figura 2.8 - Casa do Alto Douro, (CARVALHO, 2007).	5
Figura 2.9 - Casa típica da Beira Interior, (CAVACA, 2011).	6
Figura 2.10 - Casa típica Algarvia.	7
Figura 2.11 - Moradia, (Loulé).	7
Figura 2.12 - Adaptação à carta geológica de Portugal, (LNEC, 2010).	7
Figura 2.13 - Construção em taipa.	8
Figura 2.14 - Construção em calcário.	8
Figura 2.15 - Muro executado com grés, (Silves).	8
Figura 2.16 - Construção em xisto, (ROMÃO, 2009).	8
Figura 2.17 - Elementos de uma parede de alvenaria de pedra, adaptado (ROQUE, 2002).	9
Figura 2.18 - Casa em ruínas (Brotual, Loulé).	10

Figura 2.19 - Corto transversal da fachada.....	10
Figura 2.20 - Casa em ruínas, (Faro).....	10
Figura 2.21 - Corto transversal da fachada.....	10
Figura 2.22 - Parede da fachada e empena.	12
Figura 2.23 - Parede interior resistente.....	12
Figura 2.24 - Parede divisória de reduzida espessura.	13
Figura 2.25 - Parede designada de cruz de santo André.	13
Figura 2.26 - Secção transversar, perpianhos ou travadouros.....	15
Figura 2.27 - Casa em ruínas (Faro), juntas desalinhasadas, adaptado (PAGAIMO, [et al.], 2004).	16
Figura 2.28 - Cidade velha (Faro), juntas irregulares alinhadas, adaptado (PAGAIMO, [et al.], 2004).	16
Figura 2.29 - Cidade Velha (Faro), juntas regulares alinhadas, adaptado (PAGAIMO, [et al.], 2004).	16
Figura 2.30 - Classificação das alvenarias de pedra quanto ao tipo de assentamento: Horizontal (a), horizontal / vertical (b), aleatório (c), escalonado com fiadas aliatorias (d), em espinha de peixe (e), com calços ou cunhas (f), adaptado (LOURENÇO, [et al.], 2005).	17
Figura 2.31 - Classificação da secção transversal das paredes de alvenaria de pedra segunda o número de panos, adaptado (NEVES, [et al.], 2012).....	18
Figura 2.32 - Ilustração de deformação e colapso de um dos panos exteriores de uma parede de alvenaria de pedra, adaptado (BINDA, [et al.], 2000b)	20
Figura 2.33 - Classificação de diferentes tipos de ações em estruturas e seus materiais, adaptado (ICOMOS, 2003).....	21
Figura 3.1 - Danos provocado pelo sismo de 1969 em Vila do Bispo, (PROTALGARVE, 2004).	26
Figura 3.2 - Paredes resistentes ortogonais.	27
Figura 3.3 - Fendilhação nas zonas dos vãos.	27

Figura 3.4 - Interceção de duas paredes.	27
Figura 3.5 – Fissura na direção da viga.	28
Figura 3.6 - Degradação provocada por agentes erosivos.	28
Figura 3.7 - Mecanismos de colapso associados à falta de ligação dos elementos estruturais em alvenaria devido à ação sísmica, adaptado (GIUFFRÈ, [et al.], 1993).	29
Figura 3.8 - Aplicação de tirante nas paredes frontais.	32
Figura 3.9 - Aplicação do tirante pelo exterior.	32
Figura 3.10 - Reabilitação de uma moradia.	32
Figura 4.1 - Esquema do ensaio simples.	37
Figura 4.2 - Esquema do ensaio duplo.	38
Figura 4.3 - Macacos planos semicirculares.	38
Figura 4.4 - Transdutores lineares de deslocamentos.	39
Figura 4.5 - Bomba hidráulica.	39
Figura 4.6 - Alongâmetro digital.	40
Figura 4.7 - Serra de corte, sem eixo central.	40
Figura 4.8 – Alçado principal da casa das palmeiras (Lagos), e localização do ensaio na planta do r/c.	43
Figura 4.9 - Local escolhido para o ensaio.	44
Figura 4.10 - Marcação dos parafusos.	44
Figura 4.11 - Abertura dos furos.	44
Figura 4.12- Fixação dos parafusos.	44
Figura 4.13 - Abertura do rasgo.	45
Figura 4.14 - Descompressão após o corte.	45

Figura 4.15 - Medição da descompressão.....	46
Figura 4.16 - Aplicação de pressão.	46
Figura 4.17 - Área carregada superior e inferior do macaco plano A.	46
Figura 4.18 - Área carregada superior e inferior do macaco plano B.	47
Figura 4.19 - Involução de tensões / deslocamentos.	48
Figura 4.20 - Abertura do 2º rasgo.....	49
Figura 4.21 - Colocação do macaco plano.	49
Figura 4.22 - Fixação dos transdutores.	50
Figura 4.23 - Ligação à bomba hidráulica.....	50
Figura 4.24 - Exemplo dos resultados obtidos com um ensaio duplo com macacos planos, realizado numa casa Algarvia com alvenaria de pedra calcária de boa qualidade.....	51
Figura 4.25 - Cálculo do módulo de elasticidade do transdutor d2.....	52
Figura 4.26 - Cálculo do módulo de elasticidade do transdutor d3.....	53
Figura 5.1 - Localização da zona da pedreira da Bordeira, onde se recolheram as amostras de pedras.....	56
Figura 5.2 - Ensaio exploratório: provete (a) com as pedras próximas do retângulo; provete (b) pedra redonda e retangular; provete (c) de pedras próximas da redonda.	57
Figura 5.3 - Ensaio das amostras de pedra calcária (a) e (b), retiradas da construção.....	58
Figura 5.4 - Amostras (c) e (d) recolhidas de uma pedreira da Bordeira, Faro.	59
Figura 5.5 - Metodologia de cálculo do índice de forma (If) de uma pedra.	60
Figura 5.6 - Grupos de pedras usados nos provetes: (1) Ma, (2) Mb, (3) Mc e (4) Md.	61
Figura 5.7 - Cálculo da massa.	61
Figura 5.8 - Imersão da amostra.....	61

Figura 5.9 - Provetes 4x4x16 cm.	63
Figura 5.10 - Ensaio à flexão.	64
Figura 5.11 - Ensaio à compressão.	64
Figura 5.12 - Evolução da tensão de rotura à compressão dos provetes P1 a P9, 4x4x16 cm.	65
Figura 5.13 - Evolução do valor médio da tensão de rotura à compressão dos	66
Figura 5.14 - Câmara termográfica.	67
Figura 5.15 - Provete Ma, com índice forma entre $0,8 \leq I_f \leq 1$	67
Figura 5.16 - Provete Mb, com índice forma entre $0,7 < I_f < 0,8$	68
Figura 5.17 - Provete Mc, com índice forma entre $0,6 < I_f \leq 0,7$	68
Figura 5.18 - Provete Md, com índice forma entre $0,5 < I_f \leq 0,6$	68
Figura 5.19 - Unidade central do ultrassom.	69
Figura 5.20 - Transmissão direta.	70
Figura 5.21 - Transmissão semidirecta.	70
Figura 5.22 - Transmissão indirecta ou superficial.	70
Figura 5.23 - Ilustração da preparação do ensaio.	72
Figura 5.24 - Resultados obtidos no provete de alvenaria Ma.	73
Figura 5.25 - Resultados obtidos no provete de alvenaria Mc.	73
Figura 5.26 - Reajustamento do provete Mb.	74
Figura 5.27 - Reajustamento do provete Md.	74
Figura 5.28 - Relação entre o índice de forma médio dos provetes e as tensões de rotura.	74
Figura 5.29 - Reajustamento antes de entrar em colapso.	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Designação das paredes dos edifícios antigos e muros de acordo com a sua função.....	11
Tabela 2 - Designação das paredes dos edifícios antigos e muros de acordo com a sua natureza, adaptado (ALMEIDA, 2013)	14
Tabela 3 - Áreas carregadas do macaco plano A, ensaio simples.....	47
Tabela 4 - Pressões induzidas.	48
Tabela 5 - Áreas carregadas do macaco plano A e B, ensaio duplo.....	50
Tabela 6 - Registo dos dados obtidos.....	51
Tabela 7 - Cálculo do Coeficiente poisson.....	54
Tabela 8 - Tensão média das amostras (a) e (b) de lagos.	58
Tabela 9 - Tensão média das amostras (c) e (d) da Bordeira.	59
Tabela 10 - Cálculo dos índices Ma.	62
Tabela 11 - Traços dos provetes 4 x 4 x 16 cm.	63
Tabela 12 - Datas de fabrico e realização dos ensaios à flexão/ compressão.	64
Tabela 13 - Evolução da tensão de rotura à compressão dos provetes de argamassa.....	65

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

σ_m - Tensão instalada na parede de alvenaria (corrigida pelos coeficientes K_a , K_m) [MPa]

P - Valor da pressão que repõe as condições iniciais da alvenaria [MPa]

K_m - Fator de correção, tendo em conta a rigidez da pressão do macaco plano e o atrito do sistema hidráulico

K_a - Fator de correção, é dado pelo quociente entre a área do macaco plano e a área do corte

A_m - Área do macaco plano [cm²]

A_c - Área do corte [cm²]

E - Módulo de elasticidade [GPa]

ε - Extensão correspondente à deformação [%]

L_i - Distância inicial entre as bases de medição [mm]

L_f - Distância final entre as bases de medição [mm]

d - Transdutor linear de deslocamentos [mm]

ν - Coeficiente poisson

F - Força [kN]

A - Área [mm²]

L_1 - Distância em x [mm]

L_2 - Distância em y [mm]

I_f - Índice forma [-]

L_x - Distância média em x [cm]

L_y - Distância média em y [cm]

L_z - Distância média em z [cm]

V_{real} - Volume real [cm³]

V_{PRISMA} - Volume do prisma [cm³]

M^* - Massa [g]

Tx - Transmissor emissor

Rx - Transmissor recetor

v - Velocidade de propagação de ultra- sons [k_m/s]

t - Tempo [s]

K_D - Ensaio do método direto [-]

ρ - Densidade volúmica [kg/ m³]

Ma - Murete grupo a

Mb - Murete grupo b

Mc - Murete grupo c

Md - Murete grupo d

1. INTRODUÇÃO

A utilização de terra e pedra como materiais de construção é muito antiga, tendo vindo a ser utilizada em muitas regiões de todo o mundo, particularmente em climas secos e temperados, como é o caso do Algarve.

A sua grande área de aplicação deve-se à quantidade de matéria-prima disponível no meio natural, ao reduzido nível tecnológico exigido, designadamente, a facilidade de aplicação do material. As técnicas construtivas tradicionais variam de região para região, e têm sido transmitidas de geração em geração. Nos últimos anos, existe um crescente interesse em preservar e reabilitar a construção tradicional.

Face às características geológicas existentes na região, proporcionando materiais de diferentes naturezas, o Algarve tem a particularidade de apresentar diferentes tipos de construção em alvenaria, designadamente as constituídas por taipa, xisto, calcário, e grés.

No entanto, as construções Algarvias em alvenaria resistente têm apresentado um comportamento sísmico deficiente, designadamente em face dos sismos ocorridos em 1719, 1722, 1755 (CHESTER, [et al.], 2010),(COSTA, [et al.], 2005) e, mais recentemente, em 1969 (MIRANDA, [et al.], 2014).

Atendendo à grande complexidade deste tipo de sistema estrutural, quer em relação ao conjunto dos seus constituintes (unidades de alvenaria de pedra e argamassa), quer em relação à sua disposição e ao seu funcionamento como um todo, têm sido realizados diversos trabalhos de investigação (*in-situ* e em laboratório) referentes à construção de alvenaria resistente Portuguesa, de modo a caracterizar o seu comportamento sísmico.

A realização de ensaios *in-situ* que possibilitem a caracterização do comportamento sísmico das paredes de alvenarias, apresenta grandes dificuldades. Apesar de algumas desvantagens deste tipo de ensaios, principalmente relacionadas com a logística e a existência de um ambiente menos controlado, eles fornecem um meio de caracterizar adequadamente o comportamento de elementos de alvenaria nas condições em que foram realmente executadas as construções, contribuindo assim para a redução das incertezas associadas aos testes experimentais realizados em laboratório.

Com vista à avaliação de danos e da vulnerabilidade de edifícios de alvenaria, foi criada em Itália uma ficha *Aedes (Agibilità e danno nell'emergenza sismica)*, referente ao levantamento de danos nos edifícios em emergência pós-sísmica. A avaliação contemplou a

vulnerabilidade para ações fora do plano, a eventual desagregação das paredes, e o possível baixo atrito desenvolvido entre os elementos, em função da configuração do aparelho da parede de alvenaria (JRC, 2007). Com base no reconhecimento do tipo de alvenarias de pedra, e com o auxílio de documentação gráfica e fotográfica, foi estabelecido um método simplificado de avaliação do risco sísmico de construções de alvenaria realizado pelo “*Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti*”, (GNDT, 2000).

Na sequência do projeto Reluis, também realizado em Itália, foram definidos métodos de avaliação referentes à qualidade das alvenarias, realizados a partir da identificação de parâmetros que caracterizam essa qualidade. O método de avaliação do índice de qualidade da alvenaria de pedra (I.Q.M.), que foi proposto por (BORRI, [et al.], 2009), e é um índice que depende de diversos parâmetros, designadamente das formas das pedras que integram as paredes de alvenaria. Outro método de avaliação foi proposto por (Binda et al. (2009), citado por (ALMEIDA, 2013)), e é referente à avaliação da linha de mínimo traçado (L.M.T.), que está relacionada com o imbricamento das pedras no plano exterior do paramento e na secção transversal.

Nesta perspetiva, têm sido realizados diversos trabalhos experimentais referentes às construções de alvenaria de pedra existentes em Portugal (ensaios estáticos e pseudo-dinâmicos), como é o exemplo de estudos realizados nos Açores, e que têm permitido caracterizar o comportamento global de paredes de alvenaria, designadamente para fora do seu plano (COSTA, [et al.], 2011), (COSTA, 2002). Outro tipo de ensaios realizados em Portugal, e que também permitem capturar o comportamento sísmico de conjunto das construções de alvenaria, designadamente identificando os seus principais mecanismos de colapso, são os ensaios laboratoriais realizados em mesa sísmica (LOURENÇO, [et al.], 2013), (COSTA, [et al.], 2012).

Também têm sido realizados outro tipo de ensaios de modo a obter as características mecânicas das alvenarias tradicionais Portuguesas, designadamente ensaios laboratoriais com pequenos provetes de alvenaria (OLIVEIRA, [et al.], 2006), (BARROS, [et al.], 2014), e ensaios realizados *in-situ* com recurso a macacos planos (ROQUE, [et al.], 2003), (SIMÕES, [et al.], 2012), também referente a muretes de alvenaria de pedra nos Açores, foi efetuado ensaios com vários tipos de reforços laterais de forma a avaliar as características mecânicas quando sob metido a ensaios de compressão uniaxial e ensaios biaxiais (PEDRO MEDEIROS, 2014).

Neste contexto, foi iniciada uma campanha de ensaios *in-situ*, e em laboratório, de forma a realizar a caracterização mecânica da alvenaria tradicional de pedra existente no Algarve.

2. CAPÍTULO 2

2.1. CARACTERIZAÇÃO DA ALVENARIA TRADICIONAL NO ALGARVE

2.1.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

A sedentarização, causada pela agricultura foi a principal razão e revolução do modo de vida das pessoas, e das maiores ocorrências mais importantes provenientes da mesma, foi o desenvolvimento de aldeias, vilas e cidades, geralmente a fixação das pessoas ocorriam em regiões onde os solos eram férteis e propício à agricultura.

O processo de fixação das populações nas vilas e cidades esta relacionado com a prática da religião e do comércio, com o aumento da população e com diversificação das atividades produtivas (TRINDADE, 2008).

Na Península Ibérica, a grande variedade nas tipologias de alvenarias de pedra é definida a nível regional, devido à diversidade de materiais disponíveis em ambos os países e também às influências arquitetónicas e tecnologias de construção, por parte de variadas culturas estrangeiras (NUNES, 2011).

Durante vários séculos o parque habitacional de Portugal foi sofrendo incontáveis mudanças, motivadas pelo aparecimento de novos materiais, novas tecnologias e novos saberes obtidos (LAMEGO, 2007).

Existem ainda hoje locais habitados (Fig. 2.1./ Fig. 2.4.), em cidades e aldeias que foram construídas com estes tipos de materiais, sendo que eram materiais disponíveis nos locais. No entanto, grande parte das construções mais antigas que chegaram até hoje está em ruínas (Fig. 2.2./ Fig. 2.3.).



Figura 2.1 - Cidade de Ait-Ben-Haddou, (**Marrocos**, 1987).



Figura 2.2 - Cidade de dura Europos, (Síria, 2005).



Figura 2.3 - Cidade da Europa, (NIKOLOV, 2012).



Figura 2.4 - Catalunha, Espanha, (BENTINHO, 2013).

Portugal apresenta ainda muita construção em alvenaria resistente, com grande variedade de materiais, sendo que o tipo de material usado é muito dependente dos locais. A própria construção, e as técnicas utilizadas, variam de região para região.

No norte e centro de Portugal, como o Minho (Fig. 2.5.) ou a Beira Litoral (Fig. 2.6.), nos edifícios correntes, as paredes estruturais apresentam-se em alvenaria de pedra aparelhada à vista ou alvenaria de pedra ordinária em fachadas, com maior uso de granito em cunhais, e com as ombreiras e vergas dos vãos (portas e janelas) em xisto, dado que este tipo de pedras natural ser abundado na zona. Já as paredes divisórias interiores são na maioria dos casos executadas em tabique, técnica esta que consiste na utilização de terra sobre um sustento que podia ser de madeira ou de canas, (TRINDADE, 2008).



Figura 2.5 - Casa rural do Minho, (RIBEIRO, 2009).



Figura 2.6 - Casa típica da Beira Litoral, (CARDOSO, 2007)

Nas zonas de Trás-os-Montes (Fig. 2.7.) e Alto Douro (Fig. 2.8.), as casas rurais e semirurais, são constituídas por paredes de alvenarias aparelhada ou não, e podem ser em granito ou xisto. É pouco presente nestes locais a utilização da alvenaria ordinária (TRINDADE, 2008).



Figura 2.7 - Casa, Trás- os- Montes, (RIBEIRO, 2013).



Figura 2.8 - Casa do Alto Douro, (CARVALHO, 2007).

A Beira interior (Fig. 2.9.) é uma região do Norte de Portugal, onde o granito e o xisto são as rochas mais utilizadas na execução das alvenarias, que podem se aparelhadas ou não. O calhau rolado também é utilizado, no entanto é pouco corrente sua utilização. As telhas de canudo, o xisto e o colmo ainda são os materiais presentes na execução da cobertura. Nestas regiões a madeira é utilizada como reforço de pedras irregulares na composição da parede de alvenaria e também na aplicação das vergas dos vãos das portas e janelas.



Figura 2.9 - Casa típica da Beira Interior, (CAVACA, 2011).

As regiões a sul de Portugal, como o Algarve, onde o clima é temperado, característico da zona mediterrânica, apresentando invernos amenos e curtos, e verões longos, quentes e secos, apresentam construções de alvenaria tradicional que são influenciadas por estes fatores climáticos (Fig. 2.10./ Fig. 2.11.).

A variedade de diferenças nos tipos de alvenarias resistentes, não se devem simplesmente aos diferentes materiais utilizados, que geralmente variam com a disponibilidade existente na região onde se encontram, mas também resultam das diversas tecnologias de execução, que varia com os custos dos materiais e o tipo de construção, e para o fim a que era destinada (CAMELO, 2010).



Figura 2.10 - Casa típica Algarvia.



Figura 2.11 - Moradia, (Loulé).

2.1.2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA REGIÃO DO ALGARVE

A construção em terra é muito vulgar na construção tradicional algarvia, especialmente o uso da taipa (Fig. 2.13.). Estudos realizados na região do Algarve confirmam que o concelho com mais elevada percentagem de construção em taipa é em Portimão, correspondendo a 21% da totalidade das construções em taipa (BRAGA, *et al.*, 2012). Em determinadas zonas prevalece o xisto, o calcário e o grés (Fig. 2.12.). A pedra calcária é mais utilizada na zona do Barrocal (entre o litoral e a Serra), (Fig. 2.14.) enquanto o xisto é mais utilizado na Serra, (Fig. 2.16.) predominado a alvenaria de pedra solta (QUITÉRIO, 2007). Na zona de Silves, predomina o grés (Fig. 2.15.).

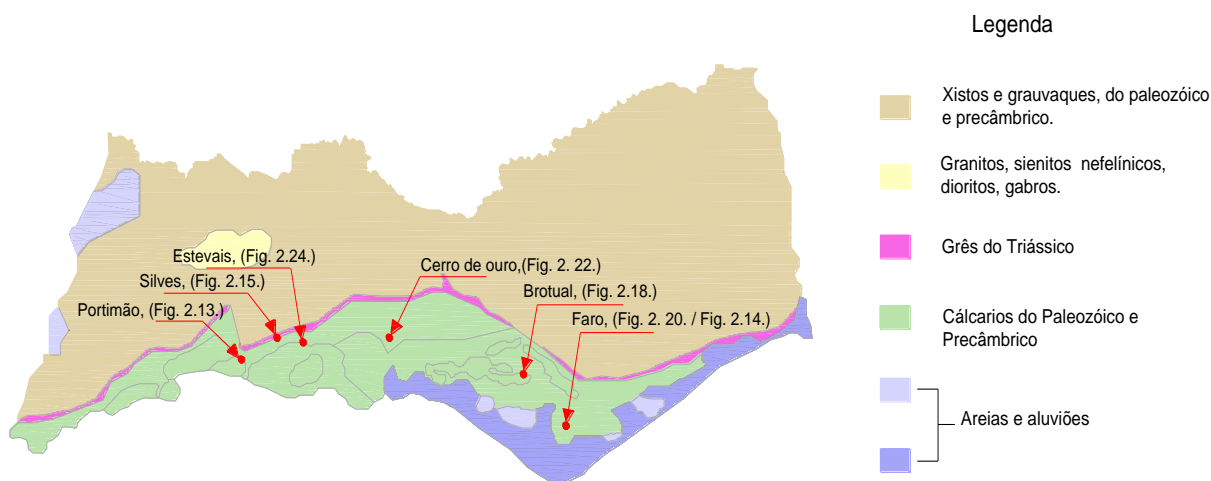


Figura 2.12 - Adaptação à carta geológica de Portugal, (LNEC, 2010).

A grande diversidade geológica da região caracteriza-se pelos seus maciços calcários e argilosos que permitem a sua utilização para as alvenarias resistentes de pedra. As alvenarias de pedra têm uma variada estrutura interna, dependendo da época, dos costumes e do local de construção. São caracterizadas por uma grande irregularidade geométrica e falta de homogeneidade material, resultando da diversidade de características dos materiais utilizados (PEREIRA, 2003).



Figura 2.13 - Construção em taipa.



Figura 2.14 - Construção em calcário.



Figura 2.15 - Muro executado com grés, (Silves).



Figura 2.16 - Construção em xisto, (ROMÃO, 2009).

2.2. PAREDES DE ALVENARIA DE EDIFÍCIOS ANTIGOS

A alvenaria de pedra é um material compósito heterogêneo, inerentemente descontínuo, com boa capacidade de resistência a ações gravíticas (compressão) e fraca resistência a ações horizontais (flexão-tração), constituída por uma diversidade interna (Fig. 2.17.), quanto à irregularidade geométrica e falta de homogeneidade material, como resultado de grande variedade de características dos materiais utilizados, (OLIVEIRA, 2010).

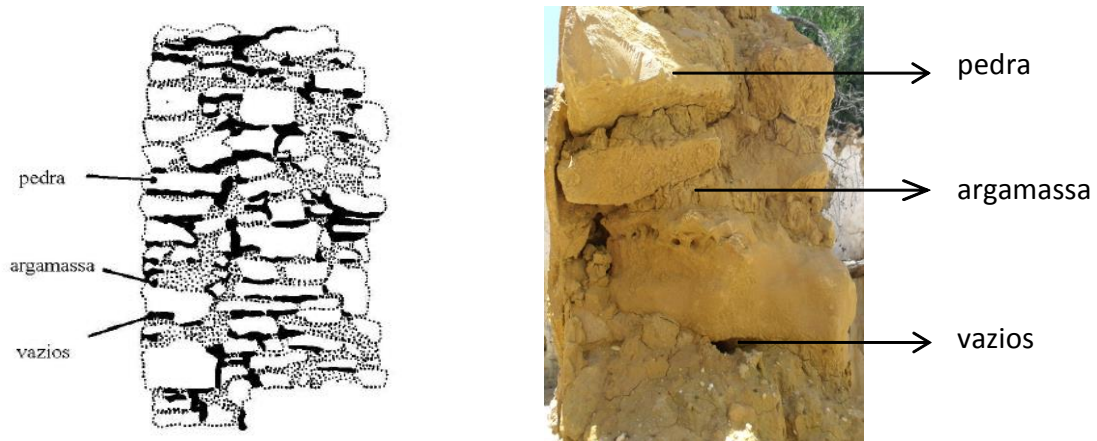


Figura 2.17 - Elementos de uma parede de alvenaria de pedra, adaptado (ROQUE, 2002).

Sendo as alvenarias de pedra um conjunto de elementos que apresentam características diferentes, tanto geométricas como mecânicas e físicas, é essencial fazer uma análise geral da estrutura de modo a obter-se valores credíveis das características mecânicas (MOTA, 2009). Em contrapartida, apesar desta frágil ligação entre os elementos, as estruturas de alvenaria antigas têm resistido ao longo de séculos (HUERTA FERNÁNDEZ, 2001).

A alvenaria resistente de pedra, quando executada de forma correta, é eficaz em relação as cargas verticais (CORRADI, [et al.], 2002). A resistência à compressão das alvenarias resistentes é determinada particularmente pelo grau de confinamento lateral dos panos, pela presença de material incoerente no interior, e pela presença e distribuição de vazios (CASELLA, [et al.], 2003). Atendendo à extensa diferença de alvenarias estruturais antigas existentes (Fig. 2.18. / Fig. 2.20.), deve-se procurar analisar as diversas geometrias e tecnologias de construção, considerando a possível existência de diferentes camadas e de elementos que possam contribuir para a ligação entre as mesmas, (CAMELO, 2010). Fazer um estudo quantitativo da percentagem de argamassa, pedra e vazios pode ser importante para o entendimento da resistência mecânica, designadamente para a avaliação estrutural da alvenaria resistente em pedra. Outras características que se devem ter em conta, são a disposição das pedras (Fig. 2.19. / Fig. 2.21.), e a sua regularidade. Numa execução de uma parede de alvenaria, a argamassa desempenha uma função secundária relativamente às pedras, embora seja essencial para garantir uma boa compacidade ao conjunto (CAROCCI,

2001). No entanto, a argamassa deve ser compatível com os materiais da construção original (BINDA, [et al.], 1997).



Figura 2.18 - Casa em ruínas (Brotual, Loulé).



Figura 2.19 - Corto transversal da fachada.



Figura 2.20 - Casa em ruínas, (Faro).



Figura 2.21 - Corto transversal da fachada.

2.3. CLASSIFICAÇÃO TIPOLOGICA DE ALVENARIA, QUANTO À FUNÇÃO

2.3.1. PAREDES DE ALVENARIA RESISTENTES

A classificação tipológica de paredes de alvenaria tem como objetivo estabelecer as diferenças morfológicas das secções de alvenaria de pedra e de tijolo cerâmico, típicas de diferentes épocas e locais. Estas diferenças devem ser tomadas em consideração porque têm, com certeza, influência no seu comportamento.

As diferenças entre os vários tipos de paredes de alvenaria, não só são dadas pela utilização de diferentes materiais de acordo com as possibilidades locais (pedras, tijolos, terra, vários tipos de argamassas, etc.), mas também de acordo com as diferentes tecnologias de construção. Além disso, a quando da modelação do comportamento de uma estrutura de alvenaria, a complexidade da sua geometria e volumes constitui uma dificuldade na escolha de um modelo adequado. Portanto, dado o grande número de alvenarias existentes, um estudo sistemático do comportamento mecânico da alvenaria deve começar a partir de uma extensa investigação de diferentes geometrias e técnicas de construção, tendo em conta as diferentes camadas ou panos. Na verdade, as técnicas de construção antigas, particularmente aquelas adotadas na arquitetura mais pobre ainda, precisam de ser cuidadosamente investigada (BINDA, [et al.], 2001b).

Uma análise estrutural ponderada e apropriada pode ajudar na definição do grau de risco e na previsão do futuro comportamento das estruturas, para além de fornecer informações relevantes para trabalhos de reparação e/ou reabilitação. Dai, ser necessário a definição das características dos materiais e a implementação da análise de estruturas danificadas (ROSA, 2013).

Segundo Giuffrè Antonino, as pedras utilizadas podem ser de diferentes natureza, forma e dimensão, e podem ser regulares ou irregulares, estar ligadas com terra, argila e argamassa, que invulgarmente envolve por completamente as pedras. Estudos experimentais e numéricos confirmam que a resistência das paredes melhora com o seu grau de imbricamento. Pinho Fernando Farinha da silva, classificou as diferentes tipologias e designações de paredes de alvenaria antigas, de acordo com a função do desempenho (Tab. 1), a natureza e características dos materiais ligantes utilizados (ROQUE, 2002).

Tabela 1 - Designação das paredes dos edifícios antigos e muros de acordo com a sua função.

Designação	Função
Paredes-mestras	Paredes interiores ou exteriores resistentes, de grande espessura normalmente.
Paredes divisórias ou de compartimentação	Dividem área limitada pelas paredes mestres
Muros de suporte	Suportam as terras de aterros, escavações, servem de revestimento aos seus taludes
Muros de vedação	Fixam ou fecham um espaço
Muros de revestimento	Protegem os taludes dos agentes atmosféricos

As paredes resistentes de alvenaria de pedra (paredes mestras), devido as suas características mecânicas e geométricas, contribuem de forma determinante para a estabilidade do edifício, quando submetida a ações de cargas verticais, normalmente de natureza gravítica, e às ações horizontais (vento e sismos). As paredes exteriores têm como principal exigência funcional proteger o interior do edifício das ações dos agentes atmosférico, dos quais se destacam a água da chuva e o vento, garantindo desta forma a estanqueidade do interior, assim como garantir o isolamento térmico e o isolamento acústico.

Na presente dissertação, vai ser dada maior relevância às paredes resistentes principais (mestras), que se podem apresentar como paredes de fachada (Fig. 2.22.) e empenas, que se estendem até à cumeeira do telhado, podendo também ser interiores (Fig. 2.23.).



Figura 2.22 - Parede da fachada e empena.



Figura 2.23 - Parede interior resistente.

2.3.2. PAREDES DIVISÓRIAS

As paredes divisórias, ou de compartimentação (Fig. 2.24.), têm como função criar espaços, delimitando áreas no interior do edifício. São paredes de menor rigidez quando comparadas com as paredes resistentes, mas que auxiliam o contraventamento da estrutura do edifício às ações horizontais. Este travamento é feito pela interligação destas paredes com os pavimentos e coberturas. Esta interligação é um fator importante para a capacidade resistente global do edificado, sendo que permite dissipar a energia a quando da ocorrência de um sismo. Geralmente estas paredes são de menor espessura, podendo ser constituídas por elementos de madeira verticais (prumos), e horizontais (travessas ou travessanhos), e

na diagonal (escoras) e preenchido com argamassa, formando a denominada cruz de Santo André (Fig. 2.25.).



Figura 2.24 - Parede divisória de reduzida espessura.



Figura 2.25 - Parede designada de cruz de santo André.

2.4. CLASSIFICAÇÃO TIPOLOGICA DE ALVENARIA, QUANTO À NATUREZA E CARACTERÍSTICAS.

Na região do Algarve, os métodos construtivos variam de localidade para localidade. Isto porque dependia da disponibilidade do material das próprias zonas, do tipo de obra que era executada, e também muito dependia do custo da construção.

As paredes de alvenaria de pedra caracterizam-se por apresentarem um elevado peso próprio, o que pode estabilizar os efeitos das forças horizontais. A grande massa dessas paredes também pode originar elevadas forças de inércia, em resultado da ocorrência de um sismo. Estes tipos de paredes apresentam uma elevada espessura, que tem como função diminuir a esbelteza, reduzido assim o risco de instabilidade.

Segundo, Pinho Fernando Farinha da Silva citado por (ROQUE, 2002), as paredes poderão apresentar as designações constantes na Tabela 2, quanto à natureza e características usadas nas paredes de alvenaria resistentes de pedra.

Tabela 2 - Designação das paredes dos edifícios antigos e muros de acordo com a sua natureza, adaptado (ALMEIDA, 2013)

Designação	Natureza
Parede de alvenaria de pedra seca / Empedrados	Constituídas por pedras assentes por justaposição, sem qualquer tipo de ligante (argamassa), e travadas entre si.
Parede de alvenaria ordinária (corrente)	Constituídas por pedras toscas, tanto na forma como irregulares e nas dimensões, e ligadas por argamassa ordinária.
Parede de alvenaria de pedra aparelhada	Constituídas por pedras irregulares aparelhadas numa das faces e ligadas com argamassa ordinária.
Parede de cantaria (ou silharia)	Constituída por pedras com faces devidamente aparelhadas (cantaria), usualmente de grandes dimensões e com formas geométricas definidas, ligadas com argamassa ou apenas sobrepostas e justapostas.
Paredes mistas	Constituídas por paredes de alvenaria e cantaria; tanto de pedra e tijolo ou de alvenaria com madeira, taipa com pedra.
Paredes de taipa	Paredes construídas com terra, moldada em moldes de madeira (taipais).

Para as paredes principais (mestras), com funções estruturais, é de importância fazer uma classificação tipológica quanto às características construtivas. Em paredes de alvenaria de pedra, esta classificação assenta em quatro parâmetros de base, (BINDA, 1998), (MORAIS, 2011), como se enunciam em seguida.

Tipo de pedras utilizado: a configuração das pedras utilizadas, a natureza ou origem (sedimentares, metamórficas ou magmáticas), as dimensões, o estado de conservação e a cor;

Secção, das pedras quanto à tipologia construtiva: o número de paramentos (Panos) e espessura, o nível de sobreposição (ou imbricamento) entre paramentos, a presença de pedras transversais designados de perpianhos ou travadouros (Fig. 2.26.) que façam a ligação entre os paramentos, ou de cunhas ou calços de assentamento, a dimensão e distribuição de vazios, a proporção de combinação dos componentes (pedra, argamassa e vazios);

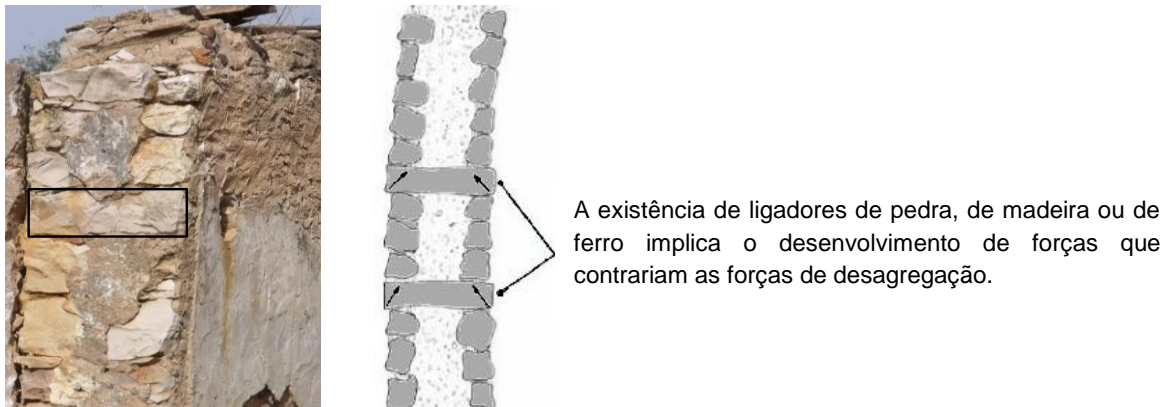


Figura 2.26 - Secção transversar, perpianhos ou travadouros.

O assentamento: referente à textura e regularidade das superfícies de assentamento e sua distribuição, com evidência para a presença de calços ou cunhas, executados com pedras de menores dimensões;

Argamassa de ligação: É usada como elemento de ligação entre as pedras, identificando especialmente a sua consistência e o desempenho, a espessura das juntas, o diâmetro, a forma e a cor dos agregados.

2.4.1. CLASSIFICAÇÃO TIPOLOGICA DOS ALÇADOS

O grupo nacional de pesquisa científica do serviço nacional de proteção civil de Itália, “*Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti*” (GNDT, 2000), classificou as paredes de alvenaria de pedra tendo em conta parâmetros quanto ao tipo de aparelho e assentamento.

Estas classificações baseiam-se numa análise direta da parede, sendo que avaliam a disposição e regularidade das superfícies de assentamento, o tipo de acabamento ou aparelho esta diretamente ligado ao tipo de assentamento (Fig. 2.27. / Fig. 2.28.). O aparelho das paredes de alvenaria de pedra está relacionado com as juntas (Fig. 2.29.), enquanto o assentamento está relacionado com a disposição como as pedras estão assentas (Fig. 2.30.) (ROSA, 2013).

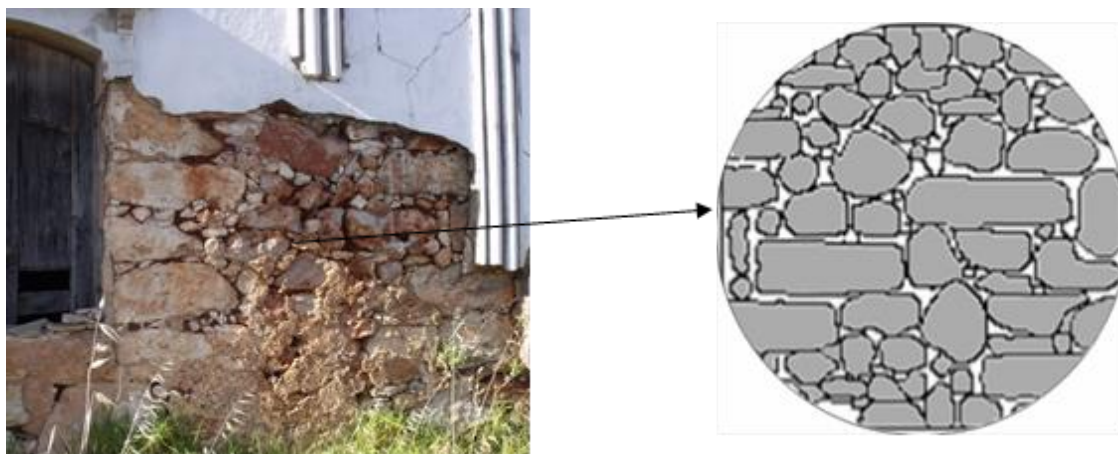


Figura 2.27 - Casa em ruínas (Faro), juntas desalinhasadas, adaptado (PAGAIMO, [et al.], 2004).

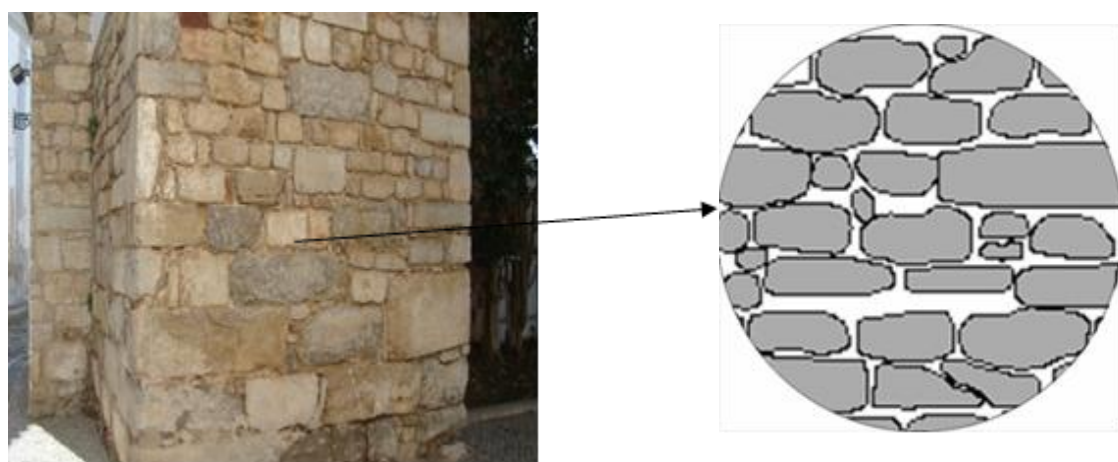


Figura 2.28 - Cidade velha (Faro), juntas irregulares alinhadas, adaptado (PAGAIMO, [et al.], 2004).

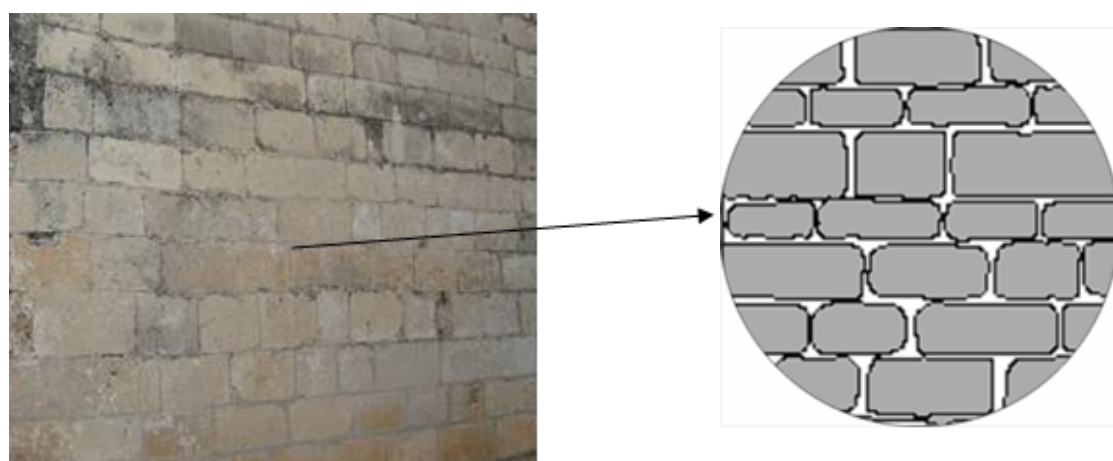


Figura 2.29 - Cidade Velha (Faro), juntas regulares alinhadas, adaptado (PAGAIMO, [et al.], 2004).

Estudos realizados em paredes de alvenaria de pedra de pano único permitiram verificar que pedras regulares apresentam uma maior capacidade resistente, devido à regularidade das superfícies de contacto entre pedras. As paredes de alvenaria mais irregulares demonstram maior capacidade de dissipação de energia e amortecimento sobretudo para os níveis de tensão vertical mais elevados, associados a um maior imbricamento das pedras (ALMEIDA, 2014).

A regularidade das pedras tem muita influência nas diversas técnicas construtivas de paredes de alvenaria de pedra (Fig. 2.30.), bem como o tipo de acabamento, a regularidade das fiadas, as camadas de pedras, juntas de argamassa e sua espessura (ROQUE, 2002).

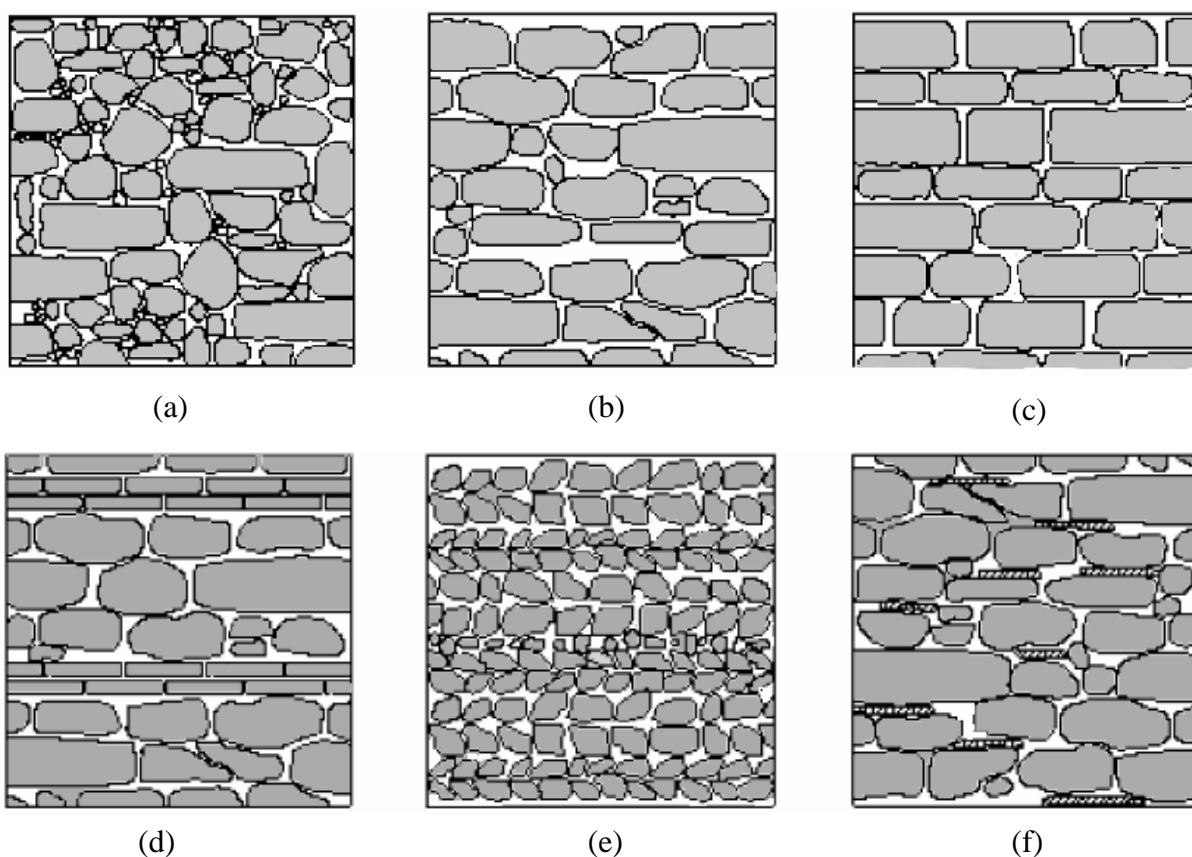


Figura 2.30 - Classificação das alvenarias de pedra quanto ao tipo de assentamento: Horizontal (a), horizontal / vertical (b), aleatório (c), escalonado com fiadas aliatorias (d), em espinha de peixe (e), com calços ou cunhas (f), adaptado (LOURENÇO, [et al.], 2005).

2.4.2. CLASSIFICAÇÃO DA TIPOLOGIA DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS

É de enorme importância a análise transversal das paredes de alvenaria de pedra de modo a definir o número de panos e o seu grau de sobreposição. Dado a sua localização geográfica de ocorrência de inúmeros sismos que afetaram várias regiões em Itália, foram efetuados vários estudos em diferentes paredes de alvenaria de pedra em edifícios históricos danificados, e foram definidas três tipologias principais, divididas depois em subcategorias (BINDA, *[et al.]*, 2000a).

As paredes de alvenaria de pedra podem ser de um pano, ou de dois ou três panos. O que distingue as paredes de um pano, e de dois, são os elementos que compõem a secção transversal (Fig. 2.31.) de se encontrarem corretamente imbricados (elementos interligados entre si), como a utilização de perpianhos a fazer a ligação entre os dois panos. No caso de paredes de três panos, era colocada argamassa no núcleo central de modo a fazer-se uma ligação mais forte entre pedras, e também para aumentar a estabilidade destas. As pedras de dimensões mais reduzidas eram acrescentadas junto com argamassa de cal aérea e restos de materiais, de modo a preencher (enchimento) o espaço entre panos (BARONIO, *[et al.]*, 2003).

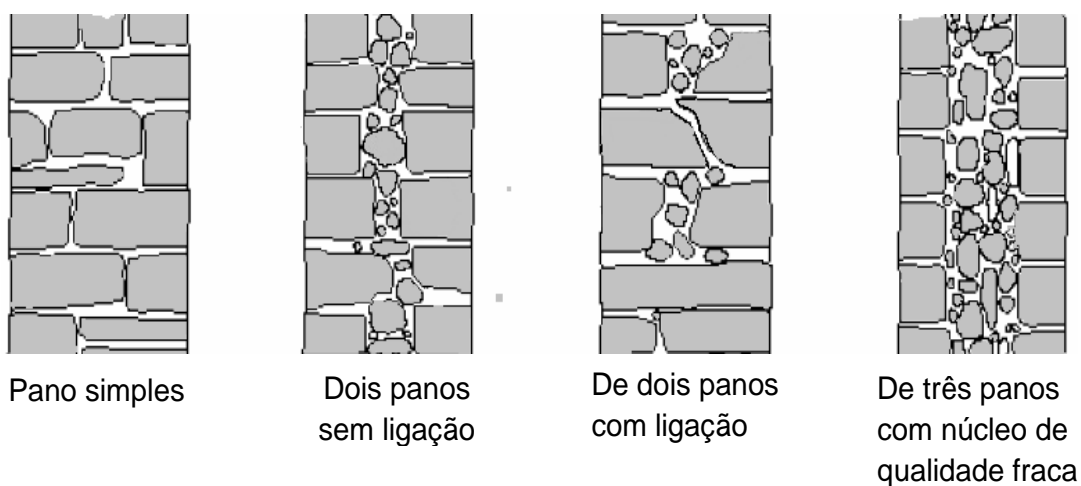


Figura 2.31 - Classificação da secção transversal das paredes de alvenaria de pedra segunda o número de panos, adaptado (NEVES, *[et al.]*, 2012).

Na região do algarve verifica-se na maioria dos edifícios, paredes de alvenaria de pano simples. É evidente que existe uma necessidade real de classificação dos diferentes tipos mais comuns de secções, uma vez que o comportamento de alvenaria depende muito da técnica de construção (BINDA, *[et al.]*, 2009).

2.5. CARACTERÍSTICAS DA PAREDE DE ALVENARIA DE PEDRA

Foram efetuados em Itália diversos estudos realizados por vários autores (BINDA, [et al.], 1997), de forma a determinar as características de paredes de alvenarias de pedra, dos quais se destacam as seguintes:

- Falta de homogeneidade, devido à presença de pedras, argamassas e outros materiais,
- Falta de adesão entre panos externas e internas das paredes,
- Fraca adesão entre argamassa e pedras,
- Mau coesão das argamassas nas juntas e no seu enchimento com entulho,
- Porosidade de parede elevada, devido à presença de vazios,
- A possível existência de paredes divisórias com função estrutural de suporte de carga,
- Alto teor de humidade, devido à penetração de água,

O desempenho estrutural da alvenaria só pode ser obtido quando forem conhecidos os seguintes fatores (BINDA, [et al.], 2001a).

- A sua geometria;
- As suas características (um ou mais panos, ligação entre os panos, juntas secas ou preenchidas, características físicas, químicas e mecânicas dos componentes);
- As características da alvenaria em termos globais (funcionando como um todo).

O levantamento das secções permite definir alguns parâmetros importantes como: a distribuição percentual de pedras, argamassa; a dimensão de cada camada em toda a secção transversal; a dimensão e a distribuição dos vazios na secção transversal. Estes parâmetros, juntamente com as propriedades químicas, físicas e mecânicas dos materiais, dão a possibilidade de descrever melhor a alvenaria, e formam a base fundamental de qualquer intervenção. (BINDA, [et al.], 2001a).

Os problemas mais frequentes em alvenarias antigas estão associados à qualidade dos materiais constituintes, especialmente as argamassas ou materiais utilizados como ligantes, que em geral, são muito pobres e evidenciam (ROQUE, 2002):

- Muito fraca resistência a esforços de tração (materiais quase incoerentes);
- Fraca resistência à compressão (demasiada presença de vazios);

- Fraca resistência ao corte (demasiada presença de vazios e material incoerente).

Em alvenaria resistentes de pedra de dois panos, que influencia fortemente a capacidade de suporte da parede, muitas vezes não é facilmente identificada a sua constituição (ROQUE, 2002). Além disso, a resistência característica de um material muito heterogêneo, é de grande dificuldade na determinação experimental, dado os parâmetros de resistência e da deformabilidade (módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson) dos seus componentes não serem representativos da resistência global e da deformabilidade da alvenaria.

O pior defeito de uma parede de alvenaria é não ser monolítica na direção lateral, e isto pode acontecer, por exemplo, quando a parede é feita por pequenas pedras ou por duas camadas externas bem ordenada, mas não mutuamente conectadas (Fig. 2.32.), e que contém um enchimento de escombros. Isto faz com que a parede se tornar mais frágil particularmente quando forças externas atuam na direção horizontal. O mesmo problema pode acontecer sob cargas verticais se agirem de forma excêntrica (BINDA, [et al.], 2000b).

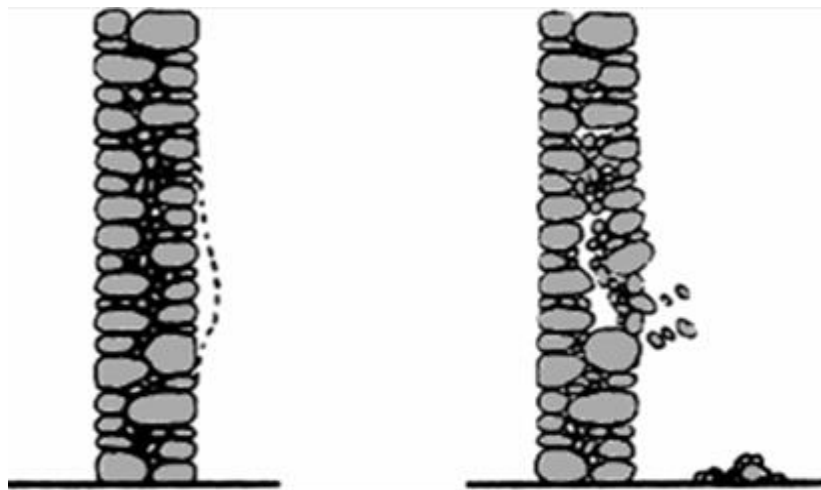


Figura 2.32 - Ilustração de deformação e colapso de um dos panos exteriores de uma parede de alvenaria de pedra, adaptado (BINDA, [et al.], 2000b)

A transmissão de ações verticais ocorre através de superfícies de contato altamente irregular, com as conseqüentes concentrações localizadas de tensões, e as reduções drástica da resistência à tração da alvenaria (VALLUZZI, 2000).

2.6. AÇÕES NA ESTRUTURA E MATERIAIS

As propriedades dos materiais da parede de alvenaria resistente de pedra, são alteradas ao longo do tempo, desde o início de sua construção até à sua conclusão. Até o peso próprio da estrutura são modificados durante a vida útil da parede de alvenaria, sendo que estas mudanças produzem danos de degradação, diminuindo a sua resistência.

As ações podem ser classificadas (Fig. 2.33.) em ações mecânicas que afetam a estrutura e ações químicas e biológicas que afetam os materiais. As ações mecânicas podem ser estáticas ou dinâmicas, sendo as estáticas diretas ou indiretas (ICOMOS, 2003).

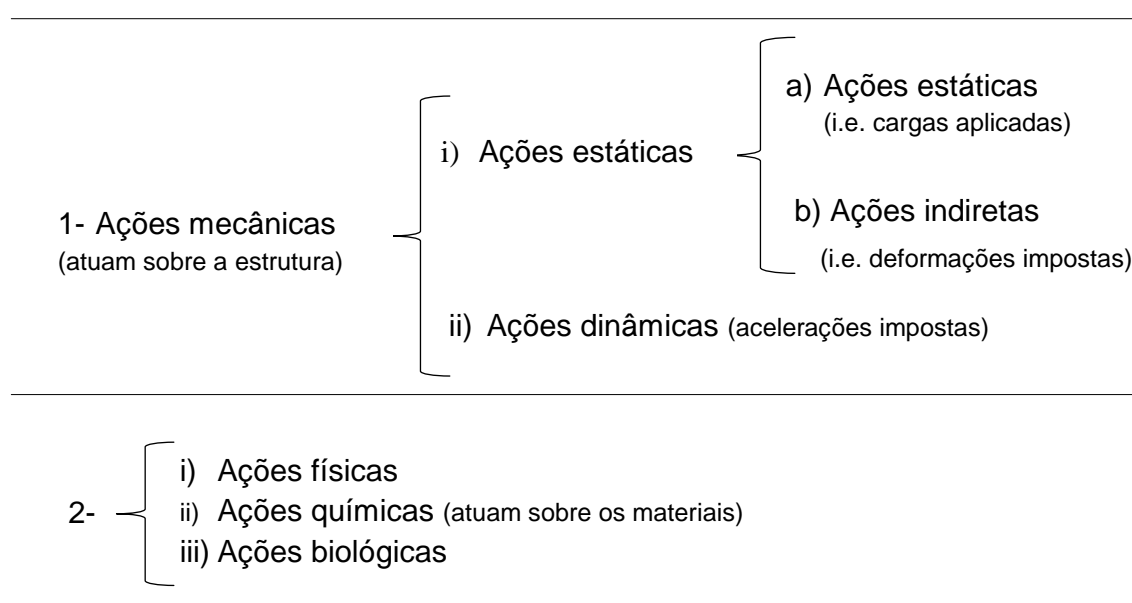


Figura 2.33 - Classificação de diferentes tipos de ações em estruturas e seus materiais, adaptado (ICOMOS, 2003).

2.7. TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO ESTRUTURAL

Um diagnóstico adequado da análise estrutural pode ajudar na definição do eventual estado de perigo e na previsão do comportamento futuro da estrutura. Para este objetivo, a definição das propriedades mecânicas dos materiais, a implementação de leis constitutivas para materiais deteriorados e de métodos de análise para estruturas danificadas, e o aperfeiçoamento dos critérios de confiabilidade são necessários. A avaliação é realizada geralmente onde há a intenção de restaurar e/ou reparar o edifício. No entanto, existem casos em que o conhecimento do estado de dano é, todavia, importante para a avaliação da

segurança, ou para compreender se uma intervenção de manutenção é necessária para o edifício (BINDA, [et al.], 2001a).

O diagnóstico estrutural pode requerer ensaios experimentais dos elementos estruturais e dos seus constituintes, de modo a possibilitar uma estimativa das características físicas e mecânicas dos materiais estruturais que possibilitem a sua análise, com o objetivo de incrementar o desempenho da estrutura. As técnicas de ensaios presentes são classificadas em destrutivas, ligeiramente destrutivas e não-destrutiva. Quando se trata de construções de edifícios de importância histórica, não devem ser utilizados ensaios destrutivos, se possível, de forma a não provocar danos nas paredes de alvenaria de pedra. (BINDA, [et al.], 2001a), (ARÊDE, [et al.], 2002).

2.7.1. TÉCNICAS DE ENSAIO NÃO-DESTRUTIVOS

Ensaio não-destrutivo são aqueles que não provocam danos nas estruturas, geralmente obtendo-se resultados qualitativos (BINDA, [et al.], 2001a). Estes ensaios podem ser realizados para:

- i) Detecção de elementos estruturais ocultos, tais como, pilares, arcos, ou estruturas de pisos intermédios;
- ii) Identificação dos materiais e avaliação da existência de zonas heterogéneas na estrutura;
- iii) Avaliação da extensão dos danos mecânicos em estruturas fissuradas;
- iv) Detecção de vazios e cavidades;
- v) Avaliação do teor de humidade e da altura de ascensão capilar;
- vi) Detecção da existência de degradação superficial;
- vii) Avaliação de algumas propriedades físicas e mecânicas dos materiais.

Um dos ensaios não destrutivos que pode ser utilizado é o ensaio de ultrassons. Este ensaio baseia-se no princípio de que a medição do tempo que os impulsos levam a percorrer um dado material ao longo de uma distância entre o gerador e o recetor, permite determinar uma estimativa do módulo de elasticidade e da resistência à compressão, a partir de correlações empíricas com a velocidade de propagação de ondas sónicas. Este ensaio também nos dá a informação sobre a homogeneidade dos materiais e a presença de fendas. Outro ensaio não destrutivo é o ensaio de radar, que permite determinar alterações

nos materiais, como, por exemplo, a existência de defeitos, cavidades, tubagens ocultas, etc. (ARÊDE, [et al.], 2002). A partir da realização de um estudo fotográfico de secções transversais de paredes de alvenaria de pedra, é possível a quantificação das áreas dos materiais e, na maioria dos casos, é possível identificar vazios nessas secções (BINDA, [et al.], 2000b). Ensaio dinâmico *in-situ*, bastante fiáveis para a verificação do comportamento global da construção, também possibilitando a calibração dos parâmetros globais do edifício (como a rigidez global).

2.7.2. TÉCNICAS DE ENSAIOS LIGEIRAMENTE DESTRUTIVOS

Quando se pretende ter uma informação mais completa da estrutura, é possível realizar ensaios específicos que provocam pequenos danos na estrutura, mas sem afetar sua integridade global. A extração de carotes em zonas específicas da estrutura permite a observação do interior da parede. O facto de possibilitar a posterior realização de ensaios em laboratório das carotes retiradas *in-situ*, permite obter informações sobre as características mecânicas, físicas e químicas dos materiais, o que o torna um ensaio importante, designadamente em construções antigas de alvenaria de pedra (ARÊDE, [et al.], 2002).

O ensaio com macacos planos é uma técnica que possibilita a avaliação *in-situ* do estado de tensão em paredes de alvenaria de pedra. Com este ensaio, podemos estimar as características de deformabilidade e a resistência à compressão, assim como permite estimar a resistência ao corte.

3. Capítulo 3

3.1. COMPORTAMENTO SÍSMICO DE EDIFÍCIOS DE ALVENARIA

3.1.1. RISCO SISMO DA REGIÃO DO ALGARVE

O risco sísmico resulta do produto dos seguintes fatores:

- i) A perigosidade sísmica da região;
- ii) A vulnerabilidade do património construído;
- iii) A exposição ao fenómeno.

O estudo do risco sísmico de zonas históricas das cidades, é de grande importância no contexto da realização de projetos de reabilitação urbana, designadamente dos edifícios construídos com alvenarias resistentes de pedra, em virtude da sua vulnerabilidade sísmica. O Algarve apresenta-se como uma região a que se deve dar especial atenção, no contexto nacional, pelo fato de ser a região mais próxima da fratura Açores-Gibraltar, e atendendo à sismicidade da área envolvente à região (QUEIRÓS, [et al.], 2007).

A região do Algarve é um dos destinos turísticos mais popular da Europa, o que explica o elevado fluxo sazonal da população. O valor da perigosidade sísmica do Algarve, e a existência de um parque habitacional vulnerável, aumenta o risco sísmico nesta região, designadamente o risco de perdas de vidas humanas, nas épocas de maior exposição ao fenómeno, que se relacionam com a ocupação turística (ROMEU VICENTE, [et al.], 2014).

Vários estudos foram realizados para a avaliação do risco sísmico da região do Algarve. Um exemplo é o caso do Bairro Ribeirinho, em Faro. O parque imobiliário avaliado nesse estudo foi encontrado num estado de conservação pobre e a necessitar de intervenções destinadas à redução da vulnerabilidade sísmica dos edifícios (ROMEU VICENTE, [et al.], 2014).

O último grande sismo que provocou danos e vítimas no Algarve ocorreu a 28 de fevereiro de 1969. Provocou grande alarme e pânico nas populações, e causou 13 vítimas mortais em Portugal.

As zonas onde se verificaram grandes intensidades sísmicas, designadamente com grandes estragos nas construções, foram as localidades de Vila do Bispo (Fig. 3.1.), Bensafrim, Lagos, Portimão e Castro Marim, tendo-se verificado fendilhação de paredes e deslocamentos de telhas. Na localidade de Bensafrim caíram mais de 20 casas. Em Vila do Bispo, e povoações deste concelho, os prejuízos foram muito elevados, com muitas casas

derrubadas. Em Lagos, muitos edifícios ficaram danificados, com perda de uma vida humana. Calcula-se que cerca de 400 casas foram derrubadas ou arruinadas (PROTALGARVE, 2004).



Figura 3.1 - Danos provocado pelo sismo de 1969 em Vila do Bispo, (PROTALGARVE, 2004).

3.1.2. ANOMALIAS TÍPICAS EM PAREDES DE ALVENARIA DE PEDRA

Os edifícios antigos de paredes de alvenaria de pedra, que não tenham sido sujeitos ao longo de sua vida a um plano de manutenção frequente, apresentam um quadro patológico muito variado. O mais frequente é o processo de degradação, sendo que é comum atribuir como causas das anomalias, aquelas que interferem mais ativamente no processo de deterioração.

As anomalias que frequentemente se verificam em paredes de alvenaria resistentes de pedra, podem ter origem na fase de conceção, durante a execução, ou no decorrer da sua utilização. Estas podem resultar da intervenção humana, enquanto utilizador, mas também de ações naturais, como descrito no capítulo 1.

De todas as ações descritas, a segurança estrutural de um edifício de alvenaria de pedra, pode ir diminuindo ao longo do tempo, em virtude da redução da sua capacidade resistente com o envelhecimento dos seus constituintes. Os problemas mais frequentes são a desagregação, o esmagamento e a fendilhação (PASTICIER, [et al.], 2008). A fendilhação em paredes resistentes de alvenaria de pedra, ocorre, por vezes, como resultado de uma deficiente qualidade da construção, da falta de ligação entre as paredes ortogonais (Fig. 3.2.), que proporcionam um sistema de contraventamento, e de deficientes ligações dos pavimentos e coberturas às paredes.



Figura 3.2 - Paredes resistentes ortogonais.

Nos edifícios de alvenaria de pedra antiga, uma causa também muito comum, passa por uma deficiente comportamento das fundações, designadamente devido a movimentos provocados por um assentamento diferencial das fundações, que provoca fendilhação nas zonas de concentração de tensões, como nas aberturas dos vãos (Fig. 3.3.) e nas interseções das paredes perpendiculares (Fig. 3.4.) (ROQUE, 2002).



Figura 3.3 - Fendilhação nas zonas dos vãos.



Figura 3.4 - Interceção de duas paredes.

Quanto ao esmagamento em paredes de alvenaria de pedra, esta ação é provocada por vezes pela introdução de novas cargas concentradas na parede, induzidas pelas descargas das vigas (Fig. 3.5.).



Figura 3.5 – Fissura na direção da viga.

A desagregação das paredes de alvenaria de pedra (Fig. 3.6.) influência as propriedades dos materiais, tais como a resistência que pode ser reduzida através de ações químicas, físicas ou biológicas. A velocidade a que ocorre depende das propriedades dos materiais, como a porosidade e da própria exposição e proteção existente (telhado), bem como a sua manutenção. Embora esta anomalia se manifeste à superfície, sendo visíveis através de uma inspeção superficial, (eflorescências, elevada porosidade), existem processos de degradação que só são detetados através de ensaios mais sofisticados, e que resultam na progressão e agravamento da fendilhação das paredes (ICOMOS, 2003).



Figura 3.6 - Degradação provocada por agentes erosivos.

3.2. MECANISMO DE COLAPSO DE PAREDES DE ALVENARIA

Estudos realizados após a ocorrência do sismo em L'Aquila de 6 de abril de 2009, a partir de uma avaliação do comportamento de construções de alvenaria tradicional de pedra, constataram que o elevado dano nesse tipo de estrutura resulta da insuficiência de resistência sísmica das paredes no seu plano e para fora do plano, assim como também podem resultar de soluções de reforço atuais, muito intrusivas, como é o caso do betão armado, que pode beneficiar pouco a resistência sísmica dos edifícios de alvenaria (RODRIGUES, [et al.], 2010).

As paredes resistentes de alvenaria de pedra, quando sujeitas à ação sísmica (forças horizontais), podem apresentar diversos tipos de mecanismos de colapso (Fig. 3.7.). Estes podem resultar de uma deficiente execução das ligações entre elementos, da degradação dos materiais, ou da falta de manutenção. Uma boa ligação entre as paredes ortogonais e as coberturas, os pavimentos, e as paredes divisórias interiores, permite melhorar o comportamento sísmico global.

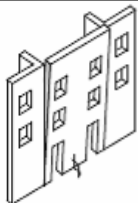
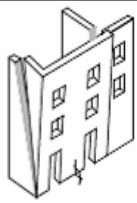
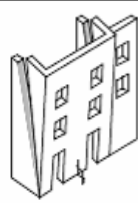
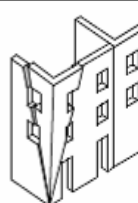

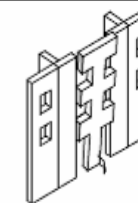
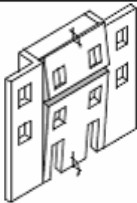
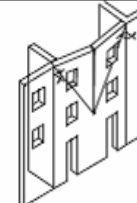
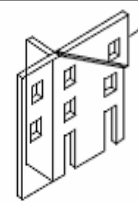
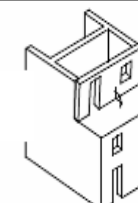

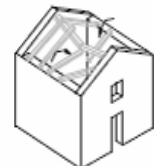
A	B1	B2	C	D	E
Derrube global da fachada por rotação	Derrube da fachada e de 1 parede lateral	Derrube da fachada e de 2 paredes laterais	Derrube por falha de canto	Derrube parcial da fachada por rotação	Derrube de uma faixa vertical da fachada
					
F	G	H	I	L	
Derrube por rotação tipo arco vertical	Derrube por rotação tipo arco horizontal	Derrube no plano da parede	Derrube de elementos verticais adicionados	Derrube por rotação do Frontão	Queda da cobertura/ pisos
					

Figura 3.7 - Mecanismos de colapso associados à falta de ligação dos elementos estruturais em alvenaria devido à ação sísmica, adaptado (GIUFFRÈ, [et al.], 1993).

3.3. TÉCNICAS DE REFORÇO DE PAREDES DE ALVENARIA DE PEDRA

As técnicas de reforço mais comuns são destinadas à correção de anomalias estruturais correspondentes a desagregação, fendilhação e esmagamento, que podem afetar as paredes resistentes de edifícios antigos.

Outras técnicas usuais baseiam-se na aplicação de rebocos armados com armaduras, caldas de injeção ou soluções mistas. Por vezes, há necessidade de reforçar também as fundações do edifício, para que a solução de consolidação seja eficaz (PINHO, [et al.], 2003).

3.3.1. TÉCNICA DE REBOCO ARMADO

A solução de reboco armado, aplica-se quando a parede apresenta um razoável estado de conservação, sendo uma técnica que confere um aumento da resistência superficial à tração e ao corte das paredes, bem como permite controlar a sua fendilhação. A execução dos rebocos armados consiste, primeiramente, na remoção do material degradado, e sua substituição por uma nova camada armada. A aplicação de argamassas comestíveis ou sintéticas deve ser evitada em paredes de alvenaria de pedra, por motivos de compatibilidade de materiais. Nos edifícios antigos, as argamassas utilizadas eram à base de cal aérea. A espessura do revestimento pode ir de 2 a 3 cm na qual se usa uma armadura de reforço, fixada através de tirantes que ligam ambos os paramentos. Geralmente são usadas como armaduras as malhas de aço eletrossoldadas.

3.3.2. TÉCNICA DE CALDAS DE INJEÇÃO

As caldas de injeção aplicam-se com maior frequência quando os níveis de degradação e fendilhação localizada se acentuam, e têm como objetivo aumentar a coesão dos elementos constituintes da alvenaria.

A técnica de injeção é realizada pela introdução de calda fluída em furos previamente efetuados na parede de alvenaria. É um método de consolidação chamado "passivo" porque não há realização das operações que podem alterar o equilíbrio ou a aparência externa da estrutura. O principal objetivo da injeção é o preenchimento de cavidades existentes, sejam elas fissuras ou vazios interiores. A técnica é, portanto, particularmente adequada para a consolidação de paredes de pedra, em que há a presença de uma densa rede de vazios de interligação. Sem estas condições particulares, a injeção é ineficaz, ou a sua eficácia é

reduzida. O modo de injeção depende do tipo de mistura e das condições da parede original.

Existem distintas soluções de injeção em função do processo utilizado, tais como:

A injeção sob pressão: É utilizada em alvenaria capaz de conter a pressão das injeções, mesmo degradadas. A calda é injetada através dos tubos de admissão, prosseguindo normalmente de baixo para cima e das extremidades ao centro, para evitar desequilíbrios que possa tornar instável o equilíbrio da estrutura. Os problemas de conceção e de execução da intervenção incidem sobre a distribuição, e no número de orifícios, e a pressão de injeção a adotar.

Injeções por gravidade: destinam-se a paredes de alvenaria com elevado estado de degradação, e são realizadas vertendo a calda através de um tubo de adução, inseridos nas fissuras ou cavidades da parede, ou por utilização de seringas hipodérmicas.

Injeções a vácuo: são realizadas com a subida da calda que é provocada pela aspiração do ar nos tubos mais elevadas, enquanto se injetam os tubos inferiores. São adequados para a estabilização de pequenos elementos arquitetónicos (VALLUZZI, 2000).

3.3.3. TÉCNICA COM TIRANTES

A utilização de tirantes exteriores de forma a ligar partes dos elementos da estrutura de alvenaria de pedra, remota à antiguidade. Esta técnica não necessita do uso de complexos equipamentos de furação, bem como os danos inerentes, e tem demonstrado ser uma técnica muito eficaz.

A aplicação dos tirantes pelo exterior (Fig. 3.8. / Fig. 3.9.) pode ser realizada com tirantes colocados aos pares e instalados simetricamente em relação aos eixos da parede, com controlo na aplicação de forças (no caso de tirantes ativos) para evitar compressões não aceitáveis (ROQUE, 2002).



Figura 3.8 - Aplicação de tirante nas paredes frontais.



Figura 3.9 - Aplicação do tirante pelo exterior.

Presentemente assiste-se a soluções de reabilitação e de conservação que podem ser intrusivas e desadequadas (Fig. 3.10.), com a utilização de materiais e técnicas de construção estruturais, essencialmente adequadas na aplicação direta a concepções novas, distanciadas do conhecimento e práticas tradicionais, da sua compatibilização e ligação com o existente, descaracterizando a sua importância e valor patrimonial (VARUM, [et al.], 2005).



Figura 3.10 - Reabilitação de uma moradia.

É de extrema importância que os técnicos, engenheiros e arquitetos, estejam sensibilizados para as técnicas de reabilitação dos edifícios antigos, no que respeita à preservação das suas características arquitetónicas, e à concepção estrutural inicial, de modo a que tal não implique a introdução de soluções demasiadas intrusivas neste tipo de construção.

4. Capítulo 4

4.1. EUROCÓDIGO 8, PARTE 3

O anexo C da EN 1998-3: 2005 (CEN, 2005), apresenta um conjunto de recomendações referentes à avaliação e ao projeto do reforço de edifícios de alvenaria em regiões sísmicas (com é o caso do Algarve). Especificamente, no ponto C.2.4 referente a materiais, explícita o seguinte:

C.2.4 Materiais

(1) Ensaaios não destrutivos podem ser utilizados para quantificar e confirmar a uniformidade da qualidade de construção e a presença e o grau de deterioração. Os seguintes tipos de ensaios podem ser utilizados:

i. Determinação da velocidade de impulsos mecânicos ou ultrassónicos, para detetar a variação na densidade e módulo de elasticidade de materiais de alvenaria e para detetar a presença de fissuras e descontinuidades.

ii. O ensaio de eco de impacto para confirmar a existência de paredes armadas e utilização de “grout” (argamassas fluida de desempenho otimizado).

iii. Radiografias e medidores de recobrimento (pacómetros), onde seja apropriado, para confirmar a localização de armaduras de aço.

(2) Testes complementares podem ser realizados para aumentar o nível de confiança nas propriedades dos materiais, ou para avaliar as condições da alvenaria. Os testes possíveis são:

i. O ensaio com o martelo Schmidt (esclerómetro) para avaliar a dureza de superficial das paredes exteriores de alvenaria.

ii. O ensaio de macacos planos hidráulicos para avaliar *in-situ*, a resistência ao corte da alvenaria. Este ensaio pode ser executado conjuntamente com macacos planos a exercerem uma carga vertical mensurável, na alvenaria (ASTM, 2003).

iii. O ensaio com os macacos planos hidráulicos para avaliar *in-situ*, a tensão de compressão vertical a que a alvenaria pode resistir. Este ensaio também fornece

informações sobre a distribuição da carga gravítica, as tensões axiais na parede, e as tensões em paredes de alvenaria envolvidas por betão.

iv. Ensaios de compressão diagonal para estimar a resistência ao corte e o módulo de distorção das paredes de alvenaria.

v. Ensaios destrutivos de grande escala em regiões ou elementos particulares, para aumentar o nível de confiança nas propriedades estruturais gerais ou para fornecer informações específicas, tais como a resistência fora do plano, o comportamento de ligações e aberturas, a resistência no plano e a capacidade de deformação.

4.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE ALVENARIA RESISTENTE.

4.2.1. OBJETIVOS E DESCRIÇÃO GERAL DO ENSAIO

A definição de estratégias e soluções de adaptação de edifícios antigos, com paredes de alvenaria de suporte de carga, exige uma caracterização adequada de materiais de construção tradicionais, bem como das soluções de construção. A falta de conhecimento sobre o comportamento das construções tradicionais, leva, em alguns casos, à utilização de técnicas de intervenção muito intrusivas, e a descaracterizar a veracidade do antigo parque imobiliário, e sendo até mesmo incompatíveis em termos de comportamento mecânico com o existente.

O método dos macacos planos é uma técnica de teste relativamente não-destrutivo (ANDREINI, [et al.], 2014). A prática dos ensaios de macacos planos aumentou significativamente com o tempo, uma vez que era reconhecida a grande importância desta técnica na determinação do comportamento mecânico do material, sem que para isso fosse necessário extrair qualquer tipo de amostra (BINDA, [et al.], 1999).

Tipicamente o material que constitui os macacos planos é de aço inoxidável com soldadura ao longo das bordas (GREGORCZYK, 2000), com dimensões e formas que podem variar. Na presente dissertação foram utilizados macacos planos semicirculares com dimensões 350x260x4 mm.

O ensaio com macacos planos divide-se em dois ensaios propriamente, o ensaio simples para determinar o estado de tensão *in-situ* de parede de alvenaria de pedra, e o ensaio duplo para avaliar as características de deformabilidade e de paredes estruturais de alvenaria.

4.2.2. CONDICIONANTES TEÓRICAS DO ENSAIO DE MACACOS PLANOS

Na realização dos ensaios *in-situ* de macacos planos na parede de alvenaria resistente, tanto simples como duplos, considerou-se que (ROMEU VICENTE; J. A. R., 2009).

- As tensões que foram estimadas na parede podem não corresponder efetivamente às tensões instaladas.
- A dificuldade de se garantir uma complementaridade absoluta entre a área do rasgo e a do macaco plano;
- A tensão aplicada pelos macacos planos sobre a alvenaria é considerada uniforme;
- A alvenaria está em regime elástico. A curva de tensão-extensão obtida no ensaio simples deve confirmar este pressuposto;
- A alvenaria na vizinhança do rasgo é homogénea;
- A alvenaria deforma-se simetricamente na envolvente do rasgo. As possíveis deformações inelásticas são distribuídas ao longo do comprimento do rasgo e não são quantificáveis (VICENTE, 2008).

4.2.3. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

4.2.3.1. Ensaio simples

O ensaio simples (Fig. 4.1.) é realizado com um macaco plano de acordo com as normas (RILEM, 2004b) e (ASTM, 2004a), e permite determinar o valor da tensão instalada na parede de alvenaria. Em primeiro lugar, marcam-se dois pontos de referência na perpendicular à zona onde será executado o corte, e registam-se as distâncias dos mesmos. De seguida, é aberto um corte horizontal que provoca um alívio das tensões existentes na parede de alvenaria na zona a ensaiar. Isto faz com que as distâncias entre os pontos de referência diminuam.

Seguidamente o macaco é embutido no rasgo, e antes de se iniciar a injeção de óleo para o interior do macaco, é importante ajustá-lo à superfície do corte, aplicando-lhe metade da pressão que se estima existir no local, descarregando-o logo de seguida (MIRANDA, 2013). Depois a pressão é introduzida por patamares até restituir a parede à posição inicial que será medido com o alongâmetro digital, ao atingir a posição inicial.

Segundo a norma, a distância deve estar compreendida entre $0,3A \leq d_i \leq 0,6A$, em que (A) é o comprimento do macaco plano.

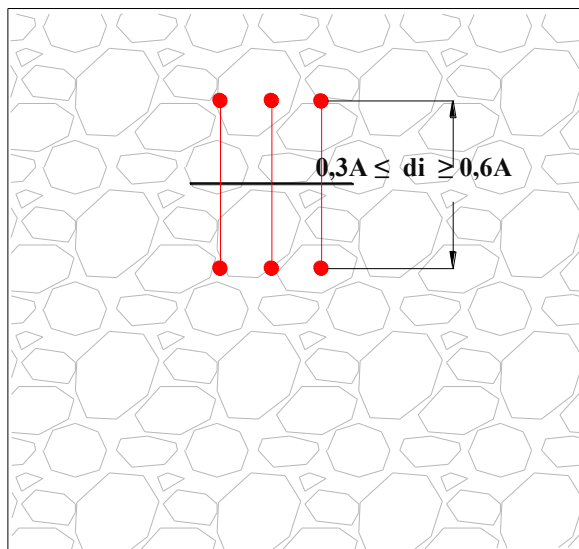


Figura 4.1 - Esquema do ensaio simples.

4.2.3.2. Ensaio duplo

O ensaio duplo (Fig. 4.2.), recorre à utilização de dois macacos planos e segue as normas (RILEM, 2004a) e (ASTM, 2004b). Os macacos são situados em dois cortes paralelos, permitem determinar as características de deformabilidade da parede de alvenaria.

As distâncias (d_i) entre macacos planos no ensaio duplo são referidas nas normas consoante a dimensão do macaco a utilizar no ensaio. Ambas as normas ASTM e RILEM relacionam essas distâncias com o comprimento (A) e a profundidade (B). É mencionado que a distância d_i deve ser inferior a $1,5xA$ do macaco, mas a norma RILEM acrescenta mais um limite, que sugere que esta distância seja inferior a $2,5xB$ do macaco plano.

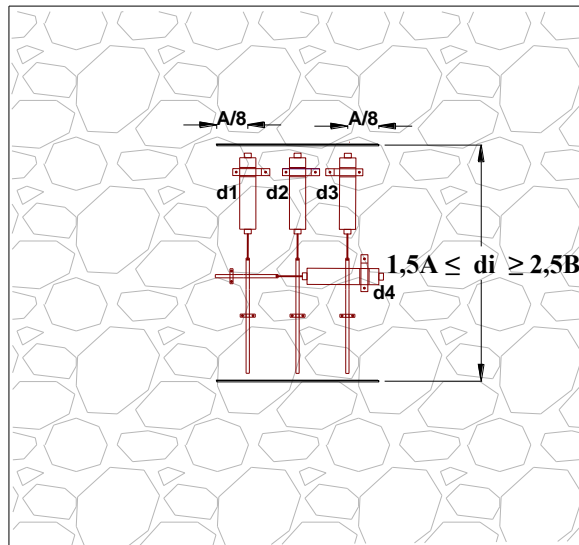


Figura 4.2 - Esquema do ensaio duplo.

4.3. EQUIPAMENTO USADO

4.3.1. MACACOS PLANOS SEMICIRCULARES

O sistema transmissor de pressões é constituído por: almofadas de paredes finas, cujo material constituinte é aço, válvulas de entrada do óleo a ser introduzido pela bomba hidráulica (Fig. 4.3.).

Referência BOVIAR flat jack, modelo MP-8A 350x260x4, com a forma de segmentos semicirculares.



Figura 4.3 - Macacos planos semicirculares.

4.3.2. TRANSDUTORES LINEARES DE DESLOCAMENTO

Modelo displacement transducers CDP-50, sensibilidade de $200 \cdot 10^{-6}$ strain/mm, (Fig. 4.4.).



Figura 4.4 - Transdutores lineares de deslocamentos.

4.3.3. BOMBA HIDRÁULICA

Sistema transmissor de pressões, modelo PMSA-3,5 com uma pressão de 700 bar, (Fig. 4.5.).



Figura 4.5 - Bomba hidráulica.

4.3.5. ALONGÂMETRO DIGITAL

O alongâmetro é um dispositivo mecânico, que se utiliza para medir, com precisão, pequenos deslocamentos em juntas e fissuras.

O instrumento de medição de deslocamentos (Fig. 4.6.) é um alongômetro digital de milésimos, com base de 300 mm, utilizado para medir, a menos de 0,002 mm, as distâncias entre os pontos definidos por cada par de bases circulares metálicas com diâmetro de 5 mm.

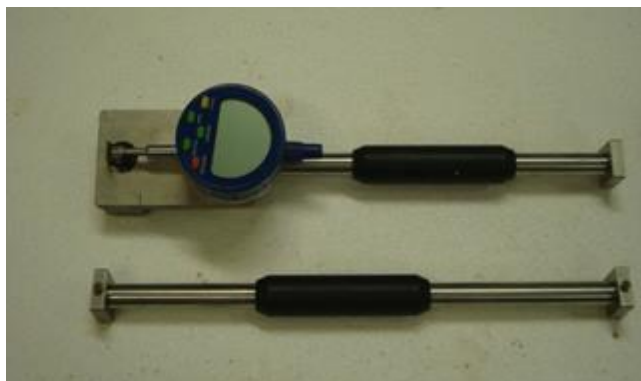


Figura 4.6 - Alongômetro digital.

4.3.6. SERRA CIRCULAR DE CORTE

Máquina de corte com disco diamantado, modelo HUSQVARNA K960 Ring (Fig. 4.7.), com diâmetro de 350 mm e sem eixo central. Estas dimensões foram particularmente úteis, já que permitiram um ajuste quase perfeito aos macacos planos semicirculares utilizados nos ensaios realizados.



Figura 4.7 - Serra de corte, sem eixo central.

4.4. METODOLOGIA

4.4.1. DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE TENSÃO

Esta é baseada na variação do estado de tensão num determinado ponto da estrutura (geralmente em linhas de argamassa), resultante de um corte plano perpendicular à superfície.

A libertação da tensão causa o fecho do corte, que pode ser quantificado pela medição da convergência entre pares de pontos dispostos simetricamente em relação ao corte.

Posteriormente é inserido um macaco plano no corte, e a pressão é gradualmente aumentada por níveis de carga com incremento constante, até que tenha sido eliminada a convergência medida anteriormente.

Neste estágio, deve-se registar o valor da pressão (P) que repõe as condições iniciais da alvenaria. O valor da tensão (σ) no ponto de ensaio é dado pela seguinte equação.

$$\sigma = K_m \times K_a \times P, \quad (1)$$

em que:

- P é o valor da pressão que repõe as condições iniciais da alvenaria.
- K_m , a pressão no interior do macaco plano durante a realização do ensaio não é a que é efetivamente aplicada na parede. Esta diferença deve-se ao facto de o valor lido no manómetro, que regista a pressão à saída da bomba hidráulica, não ter em consideração a rigidez do macaco plano, nem o atrito do sistema hidráulico. Este parâmetro é determinado por meio de testes de calibração realizados pelo fabricante e é relatado no certificado de calibração.
- K_a é dada pela razão entre a área do macaco (A_m) e a do corte (A_c):

$$K_a = \frac{A_m}{A_c}, \quad (2)$$

4.4.2. DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE DEFORMABILIDADE.

A técnica utilizada permite determinar as características de deformabilidade da parede de alvenaria de pedra.

Com os rasgos previamente executados e os macacos planos inseridos, faz-se a ligação em paralelo dos macacos à bomba hidráulica, sendo então aplicada uma tensão uniaxial à amostra da parede localizada entre os macacos. O ensaio é realizado através de vários ciclos de carga/descarga, com o aumento/diminuição gradual dos níveis de tensão com incrementos constantes, sendo realizado em cada nível leituras das deformações da amostra.

Os níveis máximos de tensão são selecionados em função das características mecânicas da parede, não devendo exceder, normalmente, 50 por cento da resistência à compressão uniaxial.

O valor do módulo de YOUNG (módulo de elasticidade – E) para cada intervalo de tensão (σ), é calculado pela seguinte fórmula.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (3)$$

Em que :

- ε , é a extensão correspondente à deformação medida nas bases de medição, é calculada pela seguinte fórmula:

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_f}{l_i}, \quad (4)$$

Em que,

- l_i , representa a distância inicial entre as bases de medição.

- l_f , representa a distância final entre as bases de medição.

4.6. ENSAIO *IN-SITU* COM MACACOS PLANOS.

O ensaio foi realizado numa moradia situada em Lagos, datada do século XIX (Fig. 4.8.), que se encontrava num estado de degradação e abandono. As paredes estruturais do resto do chão encontravam-se em boas condições, excetuando em alguns locais em que existiam fissuras nas ligações entre paredes e nas zonas de vão. A moradia sofreu obras de remodelação desde a sua construção. É de notar que a estrutura já foi submetida a novas cargas, pois foi visível a introdução de betão para a criação de anexos, na fachada da parte de Trás da moradia. A moradia apresenta pavimentos em madeira que se apoiam em perfis metálicos.

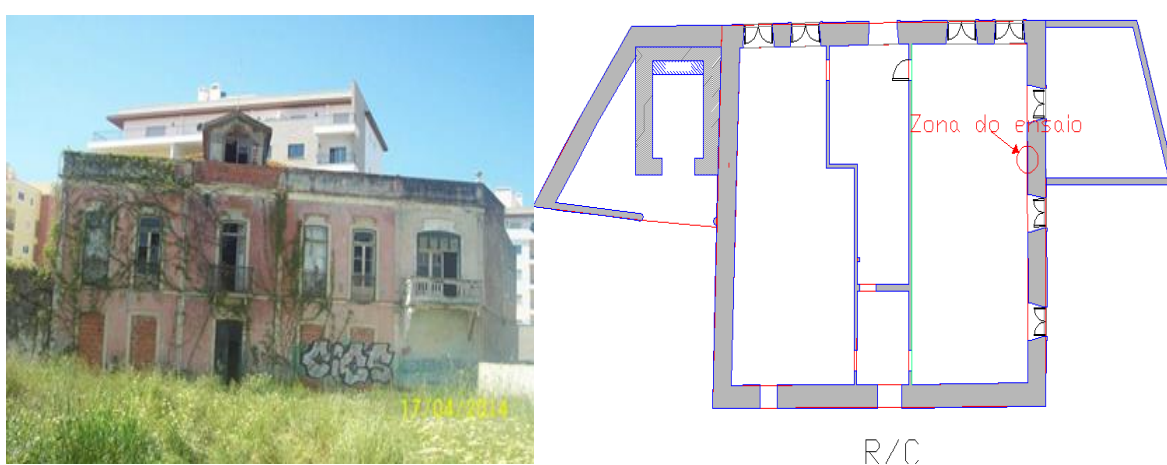


Figura 4.8 – Alçado principal da casa das palmeiras (Lagos), e localização do ensaio na planta do r/c.

4.6.1. PROCEDIMENTO DO ENSAIO DOS MACACOS PLANOS.

Antes da realização do ensaio dos macacos planos teve-se o cuidado de fazer uma inspeção geral à moradia para ver o estado das paredes estruturais de modo a escolher o local a ensaiar que fosse representativo de toda a estrutura. Para tal, removeu-se o reboco em determinadas zonas das paredes, para se observar a distribuição das pedras. Esta avaliação do estado da parede é das partes mais significativas do ensaio sendo no entanto muito difícil de se concretizar. As paredes resistentes (mestras), apresentam um bom aparelho, a junta apresenta-se irregular, quanto a sua regularidade, apresenta-se na forma horizontal/ vertical.

Fez-se a estimativa das cargas aplicadas à parede de alvenaria de pedra com base em valores tabelados (FARINHA, [et al.], 1996), e calculou-se um valor de tensão na parede, igual a 0,42 MPa.

Seguidamente foi escolhido o local para o ensaio (fig. 4.9.), e procedeu-se á marcação e abertura dos furos (Fig. 4.11.), que foram previamente preparados num modelo com as distâncias segundo as normas (Fig. 4.10.), de forma a fixar os parafusos com melhor precisão. Para a fixação dos parafusos á parede foi utilizado bucha química (Fig. 4.12.).



Figura 4.9 - Local escolhido para o ensaio.



Figura 4.10 - Marcação dos parafusos.



Figura 4.11 - Abertura dos furos.



Figura 4.12- Fixação dos parafusos.

4.6.2. REALIZAÇÃO DO ENSAIO SIMPLES

Posicionados os parafusos, foi fixado marcas circulares metálicas alinhadas na mesma direção vertical e uma distância de aproximadamente 300 mm igualmente afastadas do rasgo, medido com um alongâmetro digital. Seguidamente procedeu-se à abertura do rasgo com a serra de corte (Fig. 4.13.), que foi realizado com a ajuda de um suporte pré-preparado, para que o rasgo ficasse o mais horizontal ao plano da parede possível. Verificou-se que na zona do rasgo não houve instabilidade nos materiais constituintes da parede.

Feito o rasgo na parede (Fig. 4.14.), mediu-se com o alongâmetro digital (Fig. 4.15.), a nova posição das marcas circulares metálicas e verificou-se uma diminuição, em função da descompressão ocorrida na parede, de 0,205 mm, e introduziu-se o macaco plano e ligou-se à bomba hidráulica. Em seguida, procedeu-se à aplicação de pressões (Fig. 4.16.), até ser instituído a posição inicial, registando-se o nível das pressões intermédias e as respetivas distâncias.



Figura 4.13 - Abertura do rasgo.



Figura 4.14 - Descompressão após o corte.



Figura 4.15 - Medição da descompressão.



Figura 4.16 - Aplicação de pressão.

Na realização dos ensaios, ao retirar os macacos verificou-se que a zona carregada dos macacos tinha uma distribuição sobre a sua superfície, sem grandes deformações, isto porque as pedras onde se procedeu o ensaio estavam bem distribuídas (Fig. 4.17. / Fig. 4.18).

A área de corte (A_c) é maior do que a área de contacto do macaco plano (A_m) de modo a facilitar a entrada do macaco na abertura da alvenaria. Assim a zona de descompressão da alvenaria não é aquela primeiramente calculada. Para corrigir esta variação de áreas aplica-se à tensão instalada um coeficiente ($K_a < 1$) na qual se assume que a força aplicada pelo macaco plano se encontra distribuída por toda a superfície do corte feito (FILIPE, 2012).

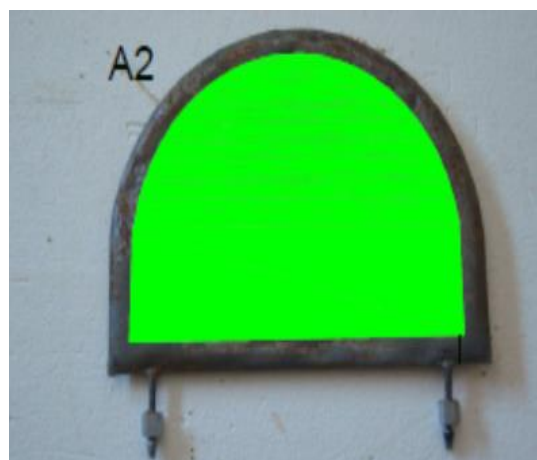
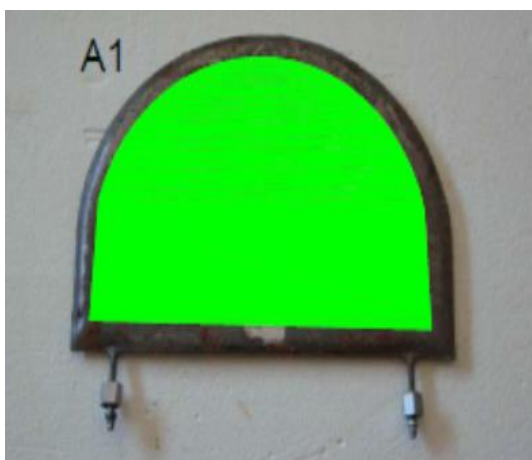


Figura 4.17 - Área carregada superior e inferior do macaco plano A.

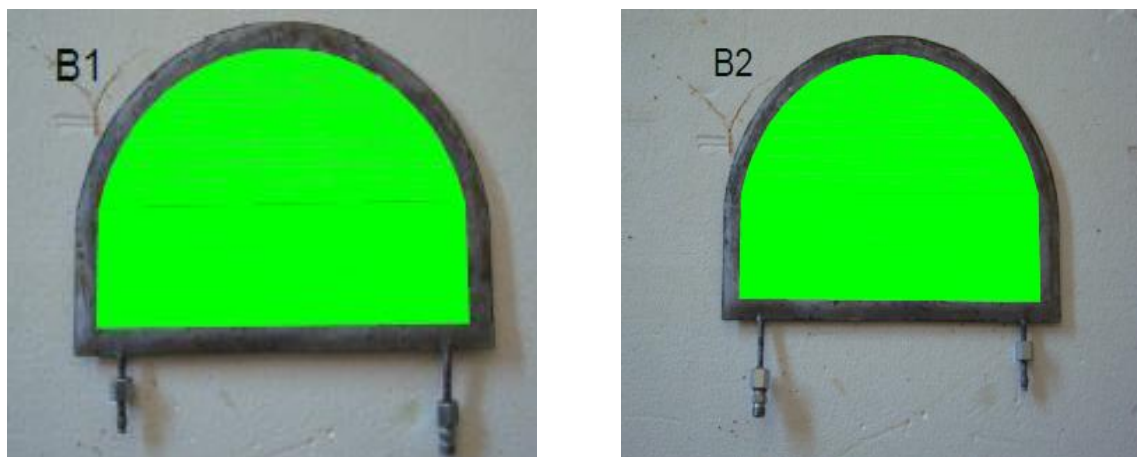


Figura 4.18 - Área carregada superior e inferior do macaco plano B.

O valor de k_m utilizado foi de 0,87, fornecido pelo fabricante (MATERIALI, 2013), e pela equação 2, calcula-se o respetivo k_a . O valor da área total do macaco plano semicircular é de $0,078 \text{ m}^2$, as áreas carregadas A1 e A2, superior e inferior respetivamente esta representado na (tab. 3), obtido um valor de K_a de 0,72, para o ensaio simples.

Tabela 3 - Áreas carregadas do macaco plano A, ensaio simples.

Tipo de ensaio	Área carregada [m ²]	Posição Superior	K_a
Ensaio Simples	0,056	A1	0,72
	0,056	A2	

No ensaio apresentado na (Fig. 4.16.), nas marcações das marcas circulares metálicas extremas do macaco plano, não foi possível registar os seus deslocamentos, isto porque ao introduzir as primeiras pressões com a bomba hidráulica não se verificavam deslocamentos devido à resistência que a pedra calcária oferecia. Os deslocamentos mais significativos foram obtidos nas marcações que se encontravam a meio do macaco plano, como mostra a Tab. 4, que corresponde ao registo das pressões e deslocamentos que permitiu instituir à posição inicial.

Tabela 4 - Pressões induzidas.

	L_i	L_f
	0	0,205
Pressão [MPa]	σ [MPa]	d_i [mm]
0,000	0,000	-0,205
0,120	0,075	-0,153
0,190	0,119	-0,104
0,340	0,213	-0,057
0,410	0,257	0,000

A evolução dos deslocamentos com a pressão aplicada para a instituição da posição inicial (Tab. 4), e com os valores corretivos K_a e K_m , permitiu determinar a tensão vertical instalada *in-situ*, de 0,26 MPa, inferior à tensão estimada de 0,42 MPa.

A recomendação da norma RILEM Recommendation MDT. D. 4 (RILEM, 2004b), indica que quando se está perante tensões inferiores a 150kPa, frequentes em edifícios de 1 ou 2 pisos, o erro cometido utilizando o ensaio simples pode ultrapassar os 100%.

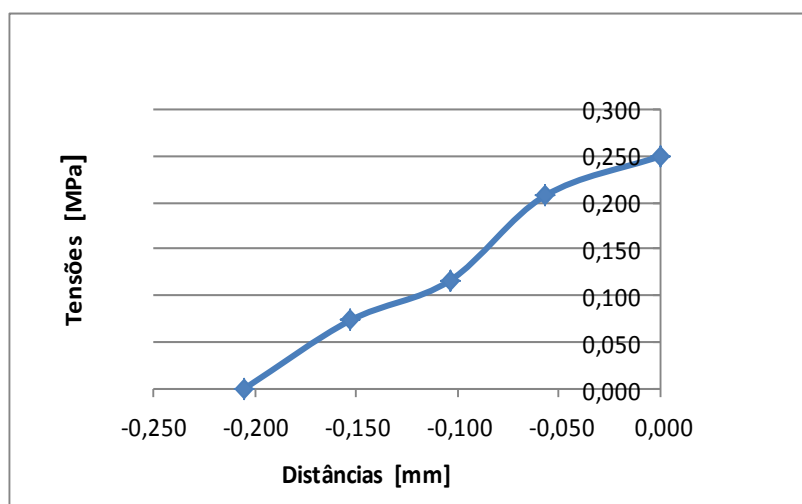


Figura 4.19 - Involução de tensões / deslocamentos.

4.6.3. REALIZAÇÃO DO ENSAIO DUPLO

Após o ensaio simples procedeu-se a abertura do rasgo para o segundo macaco (Fig. 4.20.), com o objetivo de definir as características de deformabilidade da zona a ser ensaiada. Como já foi referido anteriormente, ambas as normas ASTM e RILEM baseiam-se no comprimento (A) e na profundidade (B médio), do macaco para estabelecer limites. É mencionado que a distância d_i deve ser inferior a $1,5A$ do macaco. A norma RILEM acrescenta mais um parâmetro que sugere que esta distância seja inferior a $2,5B$ do macaco. Feito o rasgo para o segundo macaco, procedeu-se à ligação dos macacos à bomba hidráulica (Fig. 4.21.), e posicionou-se os transdutores lineares de deslocamento (Fig. 4.22.) que foram ligados ao equipamento de aquisição dos dados (Fig. 4.23.), de modo a registar as deformações impostas ao introduzir os ciclos de carga e descarga à parede de alvenaria a ser ensaiada



Figura 4.20 - Abertura do 2º rasgo.



Figura 4.21 - Colocação do macaco plano.



Figura 4.22 - Fixação dos transdutores.

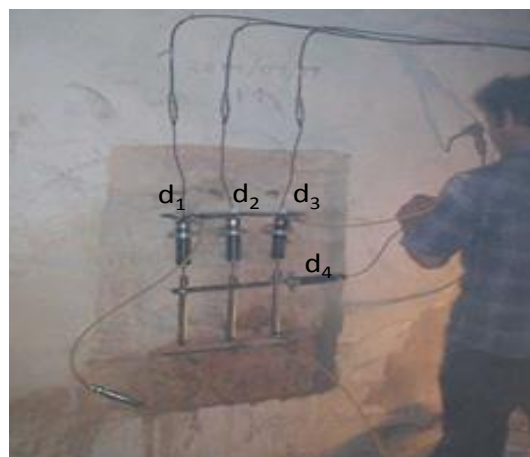


Figura 4.23 - Ligação à bomba hidráulica.

Os valores obtidos das áreas carregadas do macaco plano do ensaio duplo estão apresentados na Tabela 5. A área carregada estabelecida para o segundo macaco foi a mesma do primeiro macaco (A) usado no ensaio simples, atendendo a que as condições da zona onde se abriu o rasgo para o segundo macaco plano (B), serem as mesmas das descritas no ensaio simples.

Tabela 5 - Áreas carregadas do macaco plano A e B, ensaio duplo.

Tipo e Ensaio	Área carregada [m ²]	Posição		K _a
		Superior	Inferior	
Ensaio duplo	0,056	A1		0,72
	0,056		A2	
	0,056	B1		0,72
	0,056		B2	

Ao registrar os dados pelo equipamento de aquisição, o transdutor d1, por uma falha técnica não registou o deslocamento, pelo que prosseguimos com os restantes transdutores d2, d3, d4, como se indica na tabela simplificada (Tab. 6). A tabela completa de todos os registos está em anexo.

Tabela 6 - Registo dos dados obtidos.

Pressão [MPa]	σ [MPa]	σ [GPa]	Li		Li ₄	ϵ_2 [-]	ϵ_3 [-]	ϵ_4 [-]
			379	380	290			
3,0	1,879	0,00188	1,335	0,970	-0,345	0,0035	0,0026	-0,0012
3,1	1,942	0,001942	1,380	1,010	-0,360	0,0036	0,0027	-0,0012
3,2	2,004	0,00200	1,410	1,040	-0,375	0,0037	0,0027	-0,0013
3,4	2,130	0,00213	1,450	1,075	-0,400	0,0038	0,0028	-0,0014
3,5	2,192	0,00219	1,490	1,110	-0,415	0,0039	0,0029	-0,0014
3,6	2,255	0,00226	1,605	1,290	-0,530	0,0042	0,0034	-0,0018
3,7	2,318	0,00232	1,660	1,360	-0,580	0,0044	0,0036	-0,0020
3,8	2,380	0,00238	1,735	1,440	-0,630	0,0046	0,0038	-0,0022
2,0	1,253	0,00125	1,650	1,360	-0,620	0,0044	0,0036	-0,0021

A título de exemplo do tipo de problemas observados com este tipo de ensaio, quando utilizado na caracterização da alvenaria tradicional Algarvia, na (Fig. 4.24.) estão apresentados os resultados de um ensaio *in-situ* realizado numa moradia com paredes de alvenaria de pedra calcária de pequena altura, situada em Lagos, que não foi possível levar à rotura. Esse facto esteve relacionado com o aparecimento de diversas fissuras horizontais, localizadas muito acima dos macacos planos, que face à sua dimensão punham em causa a garantia da segurança da construção. A máxima tensão a que a parede foi sujeita foi de 2,38 MPa.

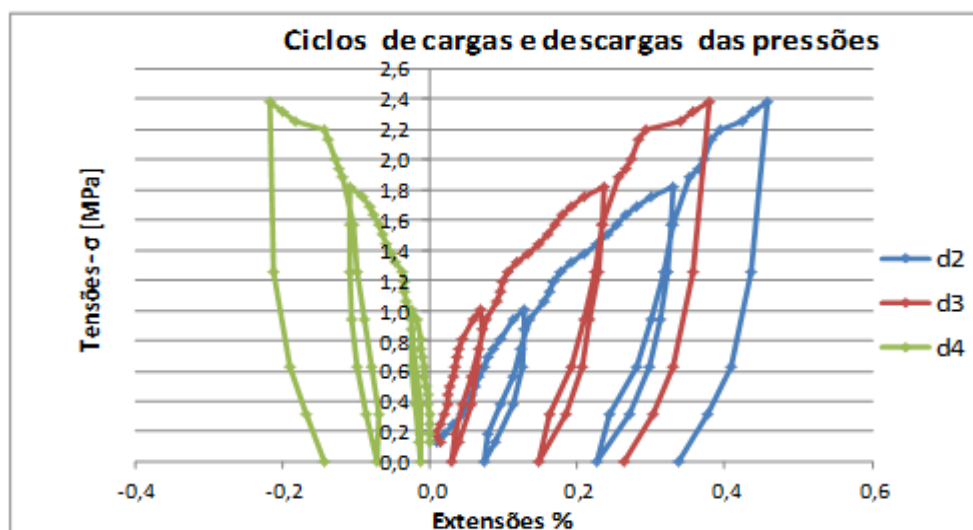


Figura 4.24 - Exemplo dos resultados obtidos com um ensaio duplo com macacos planos, realizado numa casa Algarvia com alvenaria de pedra calcária de boa qualidade.

4.6.4. CÁLCULO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE E COEFICIENTE POISSON

4.6.4.1. Módulo de elasticidade

Foram realizados vários ciclos de carga-descarga observando-se a resposta do comportamento da parede de alvenaria. É de salientar que a parede ensaiada não foi levada à rotura, como foi referido anteriormente. Na Fig. 4.25., apresenta-se a evolução das curvas de tensão/ extensão de cada alinhamento compreendido entre os dois macacos planos. Para cada ciclo de carga/descarga correspondente ao transdutor linear de deslocamento d2, calculou-se o valor do módulo de YOUNG (módulo de elasticidade – E.).

Os módulos de elasticidade obtidos a partir de regressões lineares realizadas para os conjuntos de pontos associados a cada ciclo de carga, referentes ao transdutor linear de deslocamentos d2, foram de 0,95 GPa, ($R^2=0,986$), 0,48 GPa, ($R^2= 0,988$) e 0,47 GPa, ($R^2= 0,935$), e com os respetivos coeficientes de Poisson iguais a 0,26, 0,42 e 0,93.

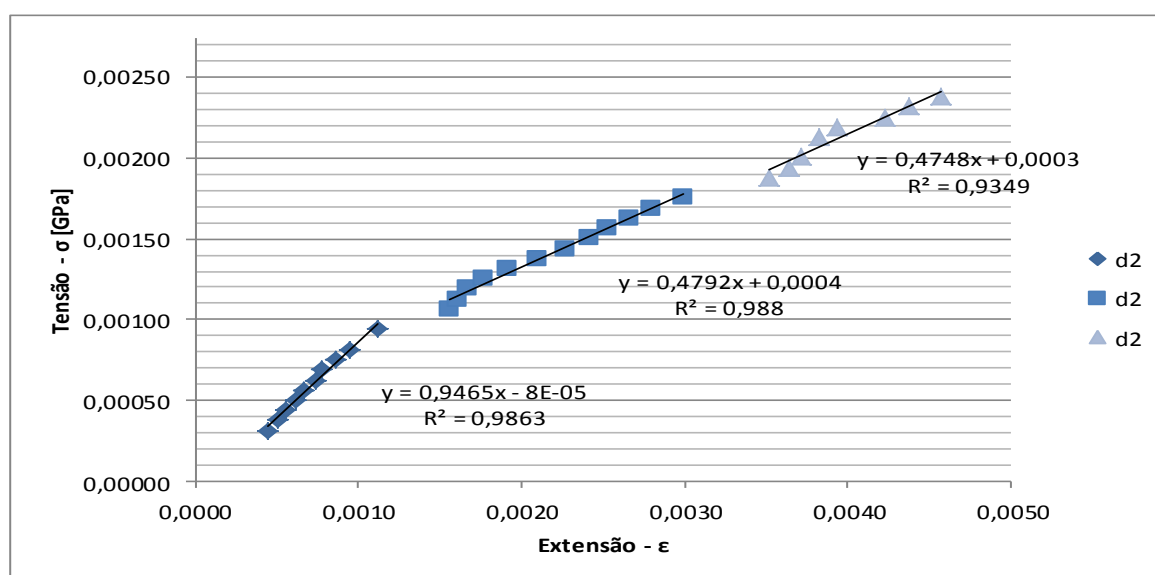


Figura 4.25 - Cálculo do módulo de elasticidade do transdutor d2.

Nas curvas tensão/extensão de d3 (Fig. 4.26.), verifica-se valores de inclinação da reta maiores comparado com as retas de d2, isto porque o transdutor linear de deslocamentos d3 se encontrava na extremidade dos macacos plano do ensaio duplo, zona esta que oferecia grande resistência, daí os deslocamentos serem menores, logo maiores módulos de elasticidade. Na segunda curva o valor é de 0,548 GPa.

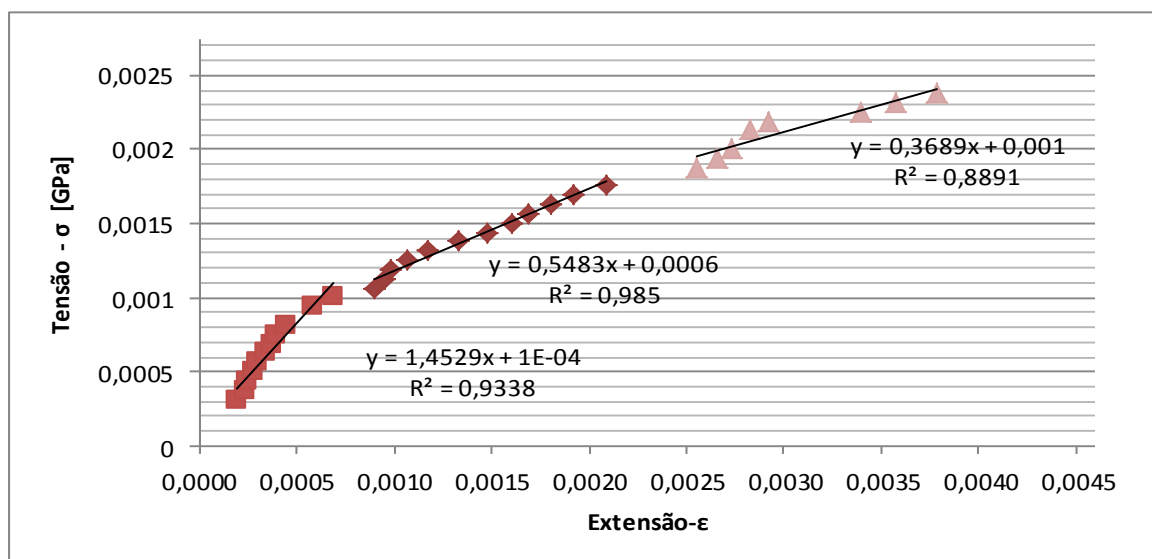


Figura 4.26 - Cálculo do módulo de elasticidade do transdutor d3.

4.6.4.2. Cálculo do coeficiente Poisson

O coeficiente de Poisson (ν) é a razão entre a deformação transversal (ϵ_4) associada à deformação longitudinal (ϵ_2) na direção do esforço de tração.

Com o transdutor linear de deslocamento (d4) fixado na horizontal no ensaio duplo (Fig. 4.23.), foi possível calcular o coeficiente poisson. Os valores representados na (Tab. 7) simplificada, são referentes às segundas curvas de tensão / extensão de d2 e d3 (ver tabela em anexo).

Para obter este valor calculou-se o quociente entre as extensões horizontais (ϵ_4) e as extensões segundo os alinhamentos verticais (ϵ_2) e (ϵ_3), em que se obteve um coeficiente poisson de 0,419 para o transdutor d2 e 0,504 para o transdutor d3.

Tabela 7 - Cálculo do Coeficiente poisson.

Pressão	σ	σ	L_i		d_4	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	V_2	V_3
			379	380						
[MPa]	[MPa]	[GPa]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1,7	1,065	0,001065	0,590	0,340	-0,095	0,0016	0,0009	-0,0003		
1,8	1,128	0,001128	0,610	0,360	-0,100	0,0016	0,0009	-0,0003		
1,9	1,190	0,00119	0,635	0,375	-0,105	0,0017	0,0010	-0,0004		
2,0	1,253	0,001253	0,670	0,405	-0,110	0,0018	0,0011	-0,0004		
2,1	1,315	0,001315	0,725	0,445	-0,135	0,0019	0,0012	-0,0005		
2,2	1,378	0,001378	0,795	0,505	-0,155	0,0021	0,0013	-0,0005	0,419	0,504
2,3	1,441	0,001441	0,860	0,560	-0,175	0,0023	0,0015	-0,0006		
2,4	1,503	0,001503	0,915	0,610	-0,190	0,0024	0,0016	-0,0007		
2,5	1,566	0,001566	0,960	0,640	-0,205	0,0025	0,0017	-0,0007		
2,6	1,629	0,001629	1,010	0,685	-0,225	0,0027	0,0018	-0,0008		
2,7	1,691	0,001691	1,060	0,730	-0,240	0,0028	0,0019	-0,0008		
2,8	1,754	0,001754	1,135	0,795	-0,270	0,0030	0,0021	-0,0009		

5. Capítulo 5

5.1. ENSAIOS LABORATORIAIS

5.1.1. PREPARAÇÃO DE QUATRO PROVETES DE ALVENARIA DE PEDRA

O trabalho experimental aqui apresentado visou o ensaio de quatro provetes de alvenaria (designados por Ma, Mb, Mc e Md), previamente preparados em laboratório com argamassa idêntica, mas com unidades de alvenaria de pedra calcária com diferentes formatos, visando observar como a forma das pedras pode afetar o comportamento mecânico das paredes de alvenaria tradicional do Algarve. Primeiramente foram executados 3 provetes experimentais sem argamassa e ensaiados à compressão, para se perceber o quanto a regularidade e disposição das amostras influenciava seu comportamento.

Na moradia onde foi realizado o ensaio *in-situ* apresentado no Capítulo 4, foram retiradas amostras de pedra calcária da parede de alvenaria onde foi executado o ensaio com macacos planos, de forma a determinar sua resistência para comparar com as amostras recolhidas da zona de uma pedreira existente na Bordeira (Faro).

5.1.2. CARACTERIZAÇÃO DAS UNIDADES DE ALVENARIA

Como a regularidade é a variável de estudo, inicialmente criaram-se três grupos de pedras, que variavam de regularidade: o provete (a), constituído por pedras achatadas próximas do retângulo; o provete (b) composto por pedras redondas e retangulares; o provete (c) com pedras de forma próxima do redondo. As amostras de pedras foram recolhidas na proximidade de uma pedreira existente na Bordeira (Faro), (Fig. 5.1.).



Figura 5.1 - Localização da zona da pedreira da Bordeira, onde se recolheram as amostras de pedras.

Os três provetes foram preparados sem argamassa (Fig. 5.2.). As pedras foram dispostas, com algum cuidado, em caixas de papelão com dimensões 30.5x21.5x23.5 cm. Colocou-se uma placa de esferovite com 3 cm de espessura no topo dos provetes, de modo a melhorar a uniformidade na distribuição da força de compressão. Antes de recortar o papelão, os provetes estavam carregados com a força de compressão de forma as pedras se reajustassem. Os provetes exploratórios foram levados até a rotura.

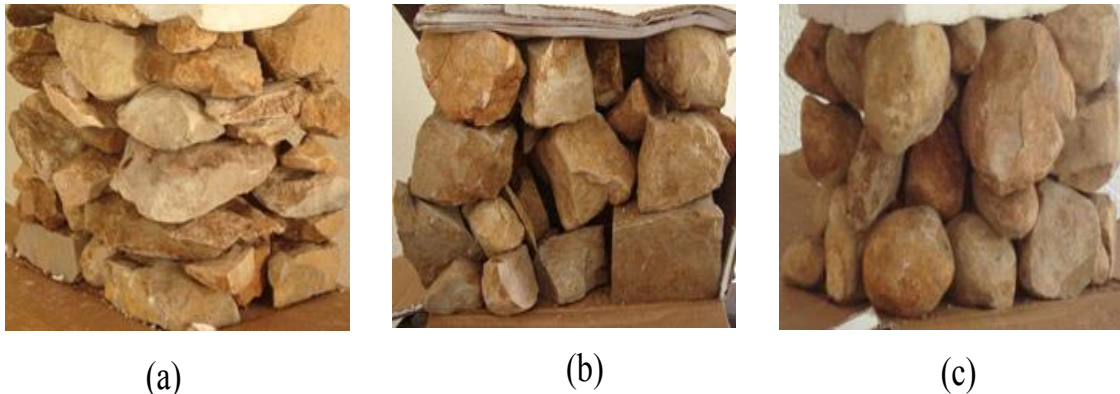


Figura 5.2 - Ensaio exploratório: provete (a) com as pedras próximas do retângulo; provete (b) pedra redonda e retangular; provete (c) de pedras próximas da redonda.

Foi observada uma correlação entre as formas das pedras, os modos de rotura, e os valores aproximados da resistência do conjunto.

O valor máximo de tensão de compressão do provete (a) foi de 0,86 MPa, no provete (b), obteve-se uma tensão de rotura de 0,15 MPa, e o provete (c) uma tensão de rotura de 0,16 MPa.

5.2. ENSAIO À COMPRESSÃO DAS AMOSTRAS DE PEDRA.

Como já referenciado anteriormente recolheram-se amostras de pedra calcária da construção onde se realizou o ensaio *in-situ* (Lagos). Em laboratório, as pedras foram cortadas em cubos com uma serra de corte. O mesmo processo foi adotado para as amostras, de pedra calcária acinzentada, recolhidas na zona da pedreira da Bordeira (Faro) Este ensaio à compressão (Fig. 5.3.) foi realizado para comparar a resistência à compressão das duas amostras.

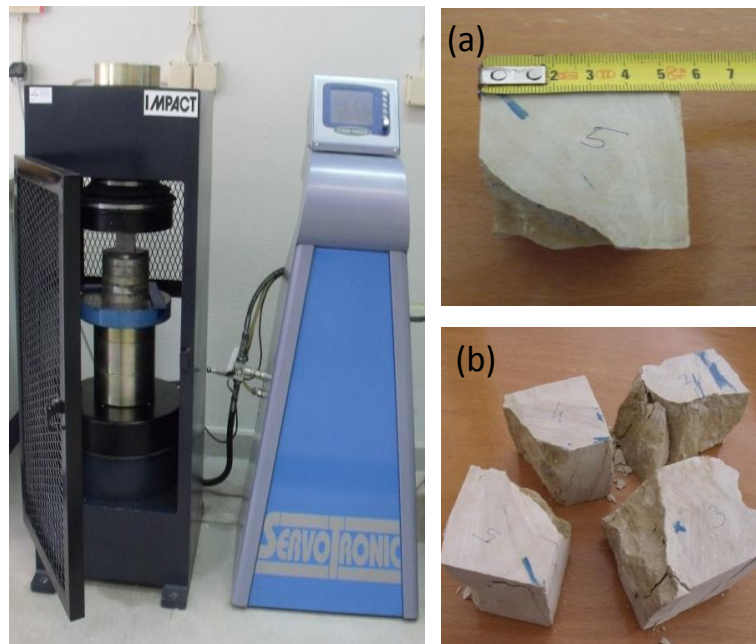


Figura 5.3 - Ensaio das amostras de pedra calcária (a) e (b), retiradas da construção existente em Lagos, onde se realizou o ensaio *in-situ*,(Lagos).

Após a regularização das pedras, foi realizado um ensaio de compressão, tendo sido obtido um valor médio aproximado de resistência de 60,5 MPa, das amostras de pedra calcária (a) e (b) do ensaio *in-situ* realizado em Lagos (Tab. 8).

Tabela 8 - Tensão média das amostras (a) e (b) de lagos.

L₁ [mm]	L₂ [mm]	A [mm ²]	F [kN]	σ [N.mm ⁻²]	Média [MPa]
25,0	30,0	750,0	35,6	47,5	
60,0	45,0	2700,0	164,1	60,8	
60,0	55,0	3300,0	185,0	56,1	60,5
50,0	50,0	2500,0	141,9	56,8	
40,0	55,0	2200,0	150,1	68,2	

A pedra calcária escolhida, de cor acinzentada (c) e (d), apresenta características semelhantes à das amostras retiradas da construção onde foi realizado o ensaio *in-situ*, (Fig. 5.4.).

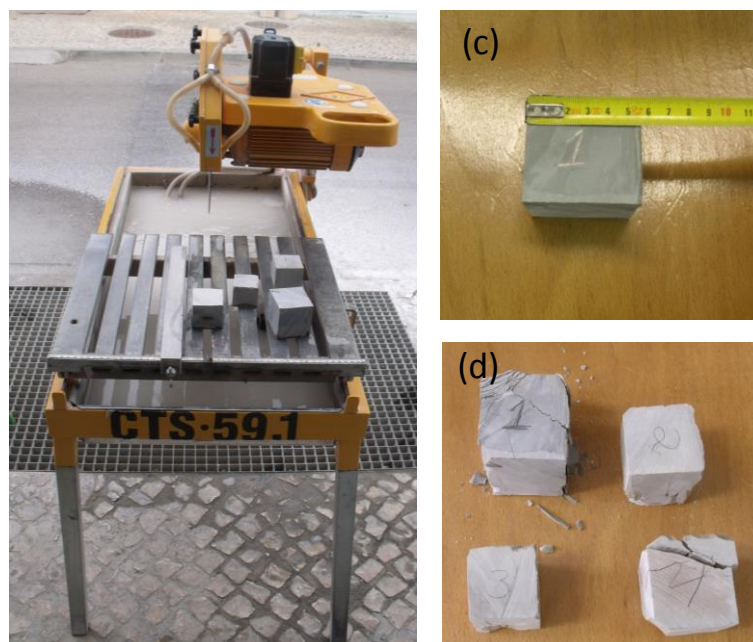


Figura 5.4 - Amostras (c) e (d) recolhidas de uma pedreira da Bordeira, Faro.

O valor médio aproximado de resistência das amostras (Fig. 5.4.), recolhidas da pedreira existente no sítio da Bordeira, concelho de Faro, foi de 58,6 MPa, (Tab. 9), está na mesma ordem de grandeza do obtido nas amostras de pedras retiradas da parede ensaiada *in-situ* (Lagos).

Tabela 9 - Tensão média das amostras (c) e (d) da Bordeira.

L_1 [mm]	L_2 [mm]	A [mm ²]	F [kN]	σ [N.mm ⁻²]	Média [MPa]
59,0	59,0	3481,0	120,8	34,7	58,6
42,0	42,0	1764,0	92,0	52,1	
50,0	50,0	2500,0	42,7	17,1	
49,0	49,0	2401,0	313,0	130,4	

5.3. CÁLCULO DO ÍNDICE FORMA

Foi estabelecido um índice de forma (I_f) de cada pedra, de modo a ser possível obter um valor mesurável da regularidade de cada pedra (Eq. 1)

$$I_f = \frac{V_{pedra}}{L_x \cdot L_y \cdot L_z} \quad (1)$$

em que V_{pedra} é o real volume de cada pedra, e L_x , L_y , e L_z são as dimensões de um prisma quadrangular inscrito nos eixos médios da pedra (Fig. 5.5.). Uma unidade de alvenaria de pedra que corresponda a um prisma retangular, de faces aparelhadas e perfeitamente polidas, terá um índice forma igual à unidade, pois o volume da pedra será igual ao volume do prisma. Do mesmo modo, uma pedra perfeitamente esférica terá um índice de forma igual a 0,524. Quanto mais irregular for uma pedra, mais esta se afastará da forma prismática, pelo que menor será o seu índice de forma.

Neste contexto, foram escolhidos quatro grupos de pedras, pertencentes a diferentes intervalos de índice de forma, de acordo com a sua regularidade (Fig. 5.6.).

- Grupo 1 - provete Ma com $0,8 \leq I_f \leq 1$, com uma média de 0,88 (pedras aproximadamente prismáticas);
- Grupo 2 - provete Mb com $0,7 < I_f < 0,8$, com uma média de 0,75;
- Grupo 3 - provete Mc com $0,6 < I_f \leq 0,7$, com uma média de 0,65;
- Grupo 4 - provete Md com $0,5 < I_f \leq 0,6$, com uma média de 0,55 (pedras aproximadamente redondas).

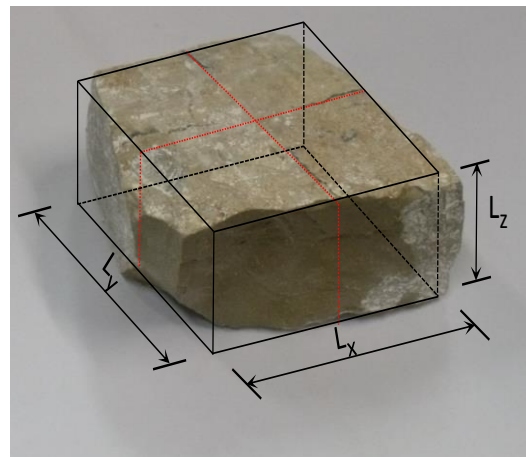


Figura 5.5 - Metodologia de cálculo do índice de forma (I_f) de uma pedra.

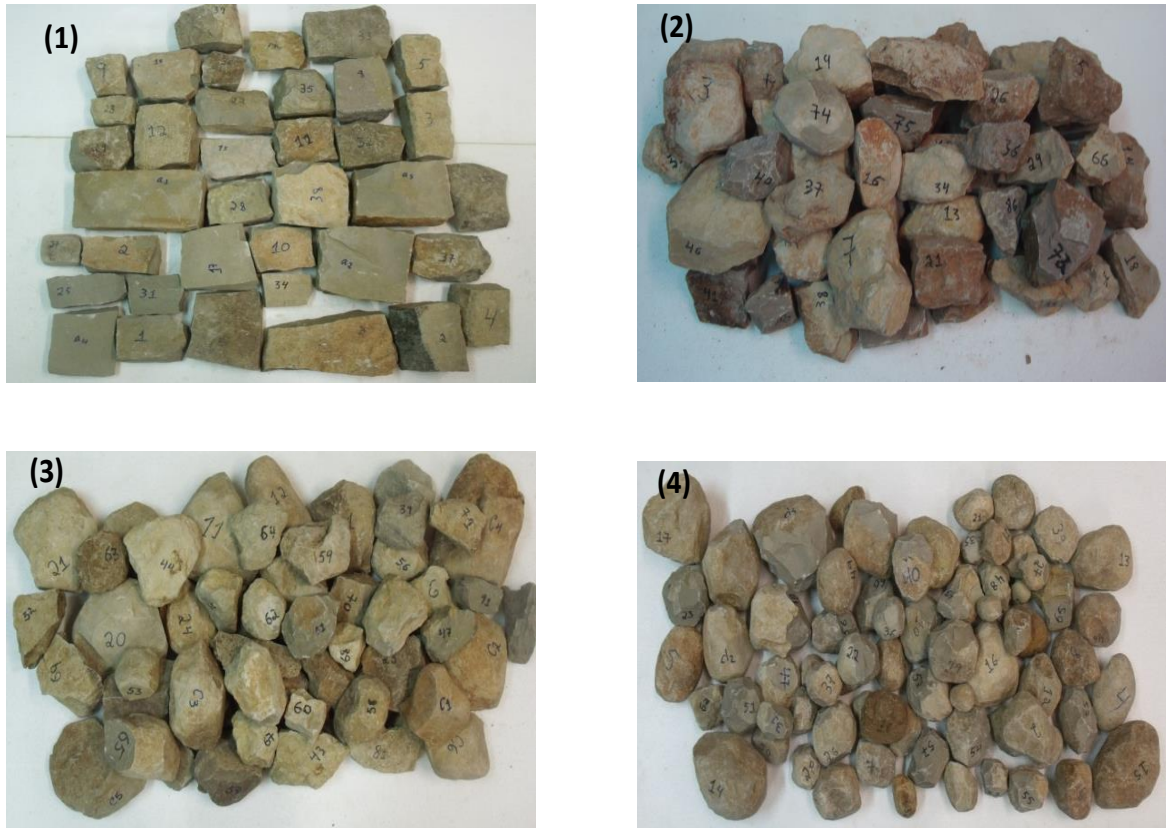


Figura 5.6 - Grupos de pedras usados nos provetes: (1) Ma, (2) Mb, (3) Mc e (4) Md.

Para o cálculo das massas das amostras, em primeiro lugar procedeu-se às pesagens (Fig. 5.7.), seguidamente procedeu-se à imersão de cada pedra na água (Fig. 5.8.), e ao cálculo a massa volúmica de cada amostra, adaptado à norma (IPQ, 2003).



Figura 5.7 - Cálculo da massa.



Figura 5.8 - Imersão da amostra.

Determinado o volume real e o volume do prisma, calculou-se o respetivo índice de forma de cada amostra, como está ilustrado na Tab. 10 Simplificada, referente ao grupo 1. As restantes tabelas dos grupos Mb, Mc, Md estão em anexo.

Tabela 10 - Cálculo dos índices Ma.

Grupo	Amostra	Massa [g]	M* [g]	V _{REAL} [cm ³]	L _x [cm]	L _y [cm]	L _z [cm]	V _{PRISMA} [cm ³]	Índice
1	1	754,0	466,0	288,0	7,4	9,8	4,2	304,6	0,95
1	2	994,5	613,0	381,5	7,0	13,0	5,0	455,0	0,84
1	3	863,5	533,5	330,0	7,5	9,3	5,3	369,7	0,89
1	4	998,5	618,5	380,0	6,7	10,5	5,8	408,0	0,93
1	5	657,0	404,5	252,5	8,4	8,5	3,8	271,3	0,93
1	6	1420,5	881,5	539,0	8,5	10,3	7,0	612,9	0,88
1	7	523,5	324,5	199,0	5,8	7,5	5,4	234,9	0,85
1	8	675,5	417,7	257,8	8,0	9,5	4,0	304,0	0,85
1	9	640,0	396,0	244,0	8,3	8,9	3,8	280,7	0,87
1	10	1220,5	762,0	458,5	9,2	12,0	4,9	541,0	0,85

5.4. CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA

As argamassas têm como função principal a proteção dos suportes onde estão aplicadas. É fundamental que estas sejam compatíveis com os materiais existentes no edifício, tanto em termos mecânicos, como do ponto de vista físico da sua microestrutura (relativamente à capilaridade da água no estado líquido ou na forma de permeabilidade ao seu vapor), ou ainda relativamente à composição química no que se refere aos constituintes ou a produtos de reação desenvolvidos (caso do teor em sais solúveis), de modo a garantir-se que não são introduzidas tensões ou componentes que possam provocar ou conduzir ao desenvolvimento de situações desfavoráveis (RODRIGUES, 2004).

Todos os provetes de alvenaria ensaiados Ma, Mb, Mc, Md, foram executados com uma argamassa de traço 1: 0,5: 3, respetivamente de cal aérea, pozolana e areia (Tab. 11). O uso de pozolanas em argamassa é uma prática ancestral, designadamente foi uma prática recorrente no tempo do império romano (PACHECO-TORGAL, [et al.], 2012). O traço adotado neste estudo está enquadrado nas formulações usadas em construções antigas (VEIGA, 2003).

Tabela 11 - Traços dos provetes 4 x 4 x 16 cm.

PROVETES	CAL AÉREA	POZOLANA	AREIA
P 1.1 e P 1.2	1	0,5	3
P 2.1 e P 2.2	1		3
P 3.1 e P 3.2	1		2
P 4.1 e P 5.1	1	0,5	9
P 6	1	0,5	2
P 7	1	0,5	4
P 8	1	0,5	6
P 9	1	0,5	4
M1	1	1	2
Ma, Mb, Mc, Md	1	0,5	3

Na preparação de cada provete Ma, Mb, Mc, Md, retirou-se parte da argamassa para a preparação em pré-moldes dos provetes 4x4x16 cm (Fig. 5.9.), para possibilitar o acompanhamento da evolução da resistência ao longo do tempo. Os provetes P1 a M1, realizados inicialmente, simplesmente foram feitos para ajustes de resistência da argamassa.



Figura 5.9 - Provetes 4x4x16 cm.

Foi realizados ensaios nos provetes de argamassa com dimensões 4 x 4 x 16 cm, à compressão e à flexão (Fig. 5.10. / Fig. 5.11.), com intervalos de tempo regulares, cujos resultados estão apresentados nas (Fig. 5.12).



Figura 5.10 - Ensaio à flexão.

Figura 5.11 - Ensaio à compressão.

Intervalo de tempo do fabrico dos provetes de argamassas com dimensões 4x4x16 cm, com os respetivos traços diferentes, e os ensaios de flexão e compressão que os provetes foram submetidos (Tab. 12).

Tabela 12 - Datas de fabrico e realização dos ensaios à flexão/ compressão.

PROVETES	FABRICO	ENSAIOS	
		FLEXÃO	COMPRESSÃO
P 1.1; P 2.1; P 3.1	23-05-2014	28-05-2014	28-05-2014
			03-06-2014
P 1.2; P 2.2; P 3.2	23-05-2014	09-06-2014	09-06-2014
			25-06-2014
P 4.1; P 5.1; P 6.1	03-06-2014	06-06-2014	06-06-2014
			25-06-2014
P 7; P 8; P 9	18-06-2014	23-06-2014	23-06-2014
			01-08-2014
M 1.1; M 2.1	26-06-2014	03-07-2014	03-07-2014
			25-07-2014
Ma 1.1; Ma 2.1	04-07-2014	14-07-2014	14-07-2014
			25-07-2014
Ma 1.2; Ma 2.2	04-07-2014	05-09-2014	05-09-2014
			08-09-2014
Mb 1.1; Mb 2.1	08-07-2014	23-07-2014	23-07-2014
			01-08-2014
Mb 1.2; Mb 2.2	08-07-2014	05-09-2014	05-09-2014
			08-09-2014
Mb 1.1; Mc 2.1	15-07-2014	23-07-2014	23-07-2014
			01-08-2014
Mc 1.2; Mc 2.2	15-07-2014	05-09-2014	05-09-2014
			08-09-2014
Md 1.1; Md 2.1	18-07-2014	23-07-2014	23-07-2014
			01-08-2014
Md 1.2; Md 2.2	18-07-2014	05-09-2014	05-09-2014
			08-09-2014

Evolução da resistência ao longo do tempo (Fig. 5.12.), dos provetes P1 a P9 e M1, com dimensões 4x4x16 cm com os respetivos traços apresentados (Tab. 4).

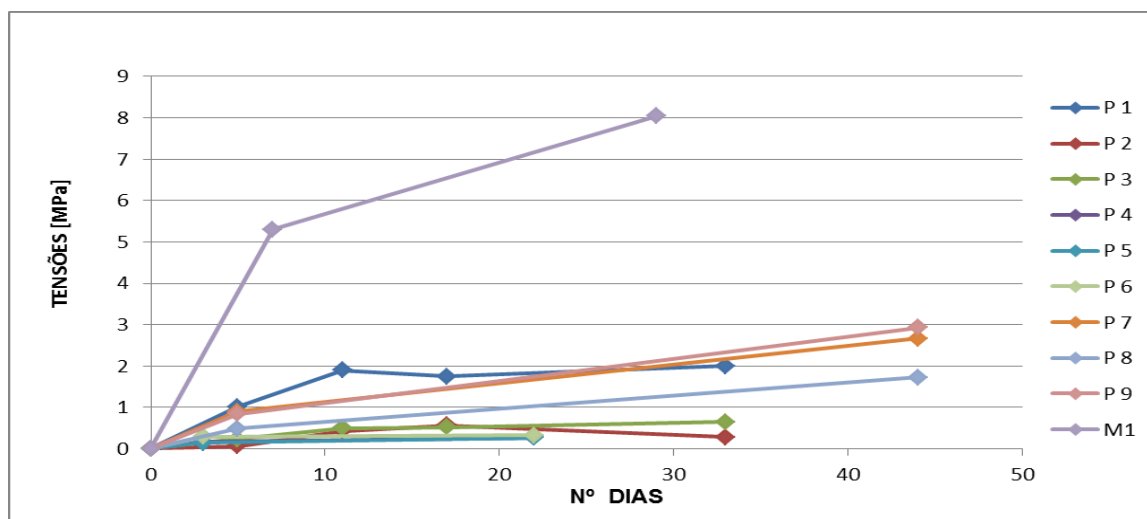


Figura 5.12 - Evolução da tensão de rotura à compressão dos provetes P1 a P9, 4x4x16 cm.

A evolução da resistência ao longo do tempo para a argamassa preparada com o traço referido na Tab. 11, para os provetes Ma, Mb, Mc, Md, esta representada na Tab. 13.

Tabela 13 - Evolução da tensão de rotura à compressão dos provetes de argamassa Ma, Mb, Mc, Md, 4x4x16 cm.

	Força [kN]	Dias [-]	l [mm]	b [mm]	h [mm]	Área [mm ²]	σ [MPa]
Ma	0	0	0	0	0	0	0
	3,61	10	100	40	40	160000	2,26
	3,18	15	100	40	40	160000	1,99
	2,65	21	100	40	40	160000	1,66
	3,26	63	100	40	40	160000	1,46
Mb	0	0	0	0	0	0	0
	2,19	15	100	40	40	160000	1,37
	3,06	24	100	40	40	160000	1,91
	2,51	59	100	40	40	160000	1,57
	3,11	62	100	40	40	160000	1,94
Mc	0	0	0	0	0	0	0
	2,00	8	100	40	40	160000	1,25
	2,62	17	100	40	40	160000	1,64
	2,72	52	100	40	40	160000	1,70
	2,88	55	100	40	40	160000	1,80
Md	0	0	0	0	0	0	0
	1,15	5	100	40	40	160000	0,72
	2,56	14	100	40	40	160000	1,60
	2,6	49	100	40	40	160000	1,63
	3,56	52	100	40	40	160000	2,23

Verifica-se no gráfico da evolução do valor médio da tensão de rotura à compressão (Fig. 5.13) dos provetes Ma, Mb, Mc, Md, com dimensões 4x4x16 cm. Foi obtido um valor médio final da tensão de rotura à compressão de 1,73 MPa, com um desvio padrão de 0,074. Os ensaios dos provetes de alvenaria foram realizados quando a resistência da argamassa estabilizou.

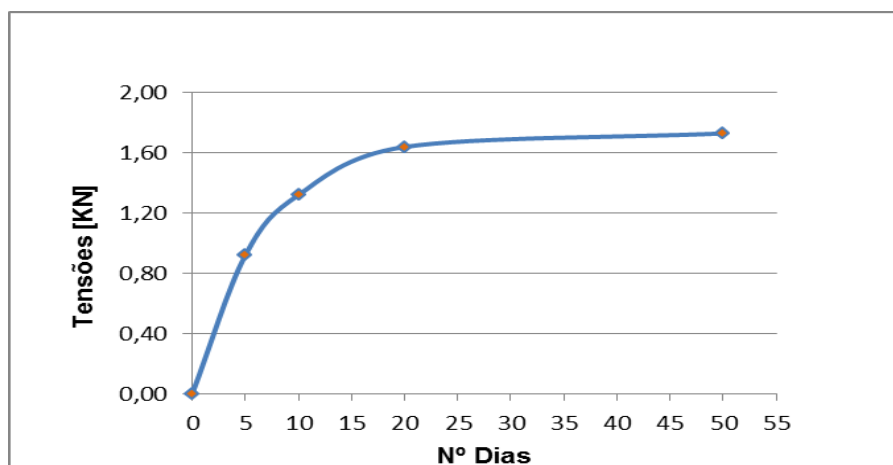


Figura 5.13 - Evolução do valor médio da tensão de rotura à compressão dos provetes de argamassa.

5.5. REALIZAÇÃO DOS PROVETES DE ALVENARIA.

Na preparação dos provetes de alvenaria, a colocação das pedras e o preenchimento da argamassa foi feito de forma a tentar reduzir ao máximo o volume de vazios. Todo este processo foi executado num molde pré-preparado com dimensões 24,5 x 24,5 x 37 cm. Os muretes foram executados em cima de uma base que continha 2 cm de areia. Antes do início do processo de execução, as pedras utilizadas ficaram um dia numa câmara de refrigeração, de modo a reduzir a temperatura das mesmas. Seguidamente, em cada junta de assentamento, registou-se a localização das pedras por intermédio de uma câmara termográfica, de forma a registar as diferenças de temperaturas superficiais entre as pedras (previamente refrigeradas) e a argamassa (à temperatura ambiente). Em cada face dos provetes foram colocados nas pedras, através de bucha química, dois parafusos roscados para fixar os transdutores lineares de deslocamentos. Cada provete foi composto por um valor entre 30 a 32 Kg de pedras, e por cerca de 18,5 kg de argamassa.

Foram registadas, com câmara termográfica (Fig. 5.14.), 6 juntas horizontais de assentamento, como está apresentado nas (Fig. 5.15.) com índice forma entre $0,8 \leq I_f \leq 1$, (Fig. 5.16.), com o índice forma entre $0,7 < I_f < 0,8$, (Fig. 5.17.), com índice forma entre $0,6 < I_f \leq 0,7$, e na (Fig. 5.18.), com um índice forma entre $0,5 < I_f \leq 0,6$.



Figura 5.14 - Câmara termográfica.

É de notar que as pedras estão representadas com tonalidades azuis e lilases, e a argamassa de assentamento em tonalidades de amarelo. Este procedimento possibilitou registar, com elevado rigor, a disposição das unidades de alvenaria em cada provete, pois viabilizou a captura do volume de cada pedra dentro do provete, mesmo quando estas estavam envolvidas com argamassa (principalmente nos provetes envolvendo as pedras mais redondas).

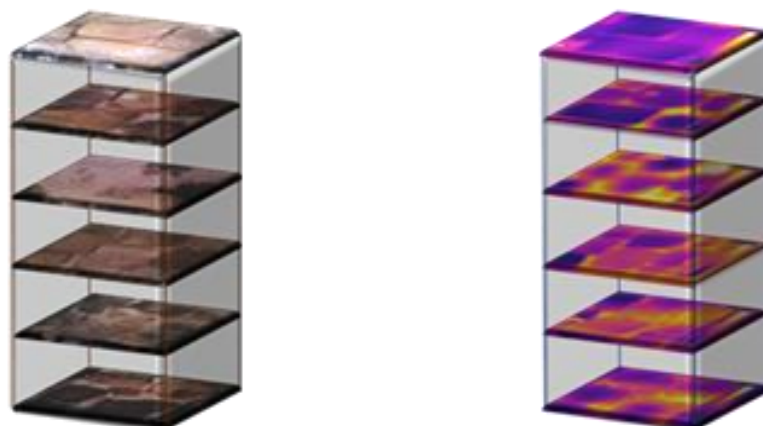


Figura 5.15 - Proвете Ma, com índice forma entre $0,8 \leq I_f \leq 1$.

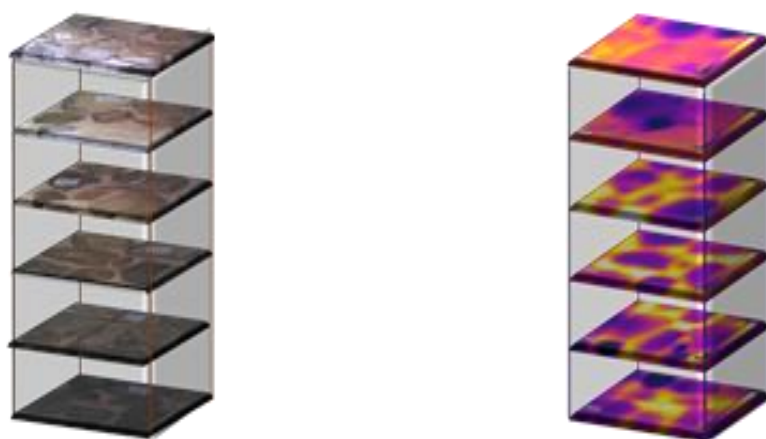


Figura 5.16 - Provete Mb, com índice forma entre $0,7 < I_f < 0,8$.

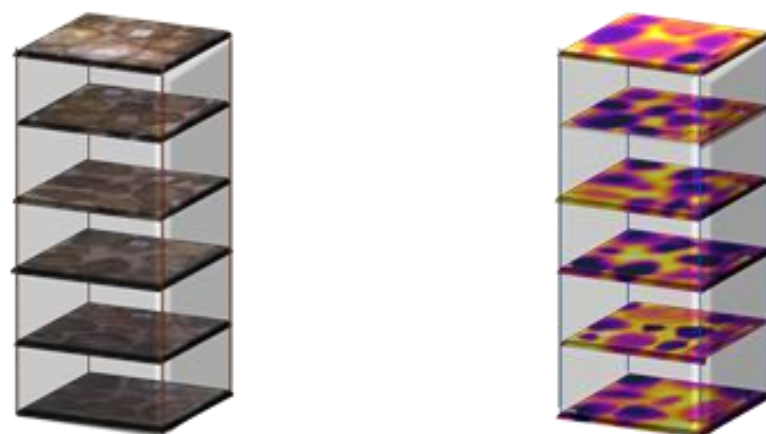


Figura 5.17 - Provete Mc, com índice forma entre $0,6 < I_f \leq 0,7$.

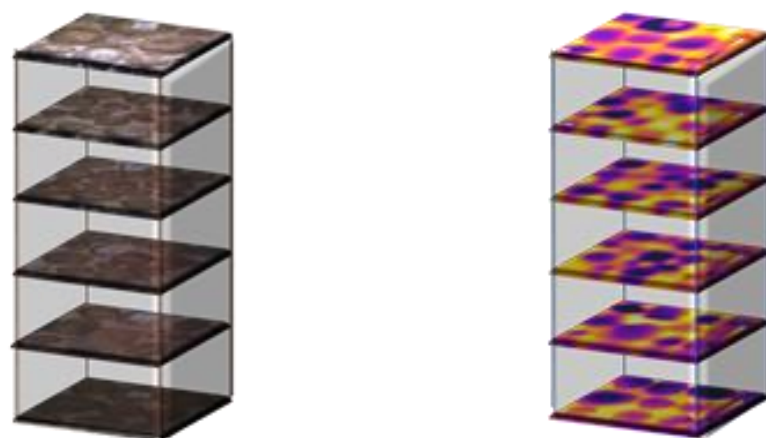


Figura 5.18 - Provete Md, com índice forma entre $0,5 < I_f \leq 0,6$.

5.6. ENSAIO ULTRASSONS

5.6.1. PRINCÍPIO DO ENSAIO

O ensaio de ultrassons baseia-se no princípio da propagação das ondas elásticas, segundo o qual a sua velocidade de propagação depende das propriedades elásticas do meio (JORNE, [et al.], 2012), (GOMES, (1995a)).

As velocidades de propagação das ondas dependem das propriedades do material que atravessam, e reenviam indiretamente o seu estado de conservação, já que a presença de vazios e fissuras, que constituem descontinuidades, tem consequências na velocidade de propagação das ondas no seu interior. Constituintes de paredes de alvenaria quando mais degradados e com fraca coesão entre eles, apresentam valores de velocidade de propagação inferiores aos de materiais mais compactos ou menos degradados. A presença de água nos espaços vazios influencia as propriedades de propagação das ondas sónicas, pelo que esse efeito deverá ser tido em conta na análise dos resultados obtidos (MAGALHÃES, [et al.], 2013).

Em materiais heterogéneos, como é o caso das alvenarias, o ensaio com ultrassons demonstrou ser inadequado já que emite pulsos que, pelas suas características, não conseguem realizar a viagem que separa o emissor do recetor. Torna-se, nestes casos, necessário utilizar o ensaio sónico que, por gerar ondas de maior comprimento de onda, é mais indicado para este tipo de materiais (MIRANDA, 2013).

Quando mais denso for o material maior é a sua velocidade em que a ondas se propagam por vibração pelas partículas do material, pela variação da velocidade é possível detetar as características do material (JORNE, [et al.], 2012).

Para o ensaio realizado nesta dissertação o equipamento usado foi PUNDIT (Portable Ultrassónica Non-destructive Digital Indicating Tester) (Fig. 5.19.), que emite um impulso elétrico de baixa frequência ultrassónica.



Figura 5.19 - Unidade central do ultrassom.

O impulso elétrico de 50 kHz é transmitido ao transmissor emissor (Tx) e ao fazer o percurso do ensaio é captado por outro transmissor recetor (Rx), sendo que a onda do impulso volta à unidade central.

Na preparação prévia do ensaio, o aparelho é calibrado com uma barra padrão é que o tempo de propagação é conhecido. Esta calibração consiste em fazer coincidir a leitura do aparelho digital com o valor de referência da barra padrão, através do botão de ajuste do aparelho. Na realização deste ensaio o tempo de transição da barra padrão foi de 26 μ s.

Na norma (EN, 2004) é indicado três posições dos transdutores para a medição do tempo da propagação das ondas ultrassónico (Fig. 5.20. / Fig. 5.21. / Fig. 5.22.).

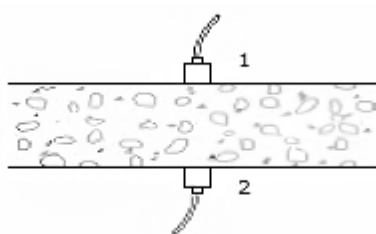


Figura 5.20 - Transmissão direta.

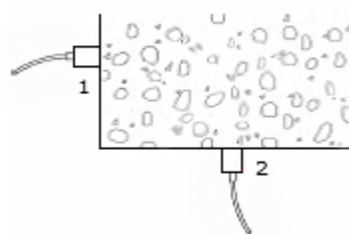


Figura 5.21 - Transmissão semidirecta.



1-Tx

2- Rx

Figura 5.22 - Transmissão indireta ou superficial.

Normalmente, a transmissão direta (Fig. 5.20.) é a mais adequada, sendo que o emissor está no mesmo alinhamento do recetor, fazendo com que a máxima energia do impulso seja transmitida, e o comprimento do percurso possa ser medido com maior precisão, e tem como finalidade a avaliação das características de resistência mecânica e de homogeneidade e deteção de discontinuidades no betão, ou na pedra.

Para a elaboração deste ensaio utilizaram-se as posições de transmissão direta (Fig. 5.20.), sendo a propagação de ondas uma velocidade aparente, porque a trajetória das ondas está

submetida a maior incerteza e se aceita genericamente para o mesmo a distância entre transdutores.

A velocidade é dada pela seguinte equação:

$$v = \frac{d}{t} [k_m / s] \quad (2)$$

O valor do módulo de elasticidade (E) é dado pela seguinte equação:

$$E = \frac{v^2 \times \rho}{K_D} [GPa] \quad (3)$$

Pelo ensaio do método direto o valor do (K_D) é dado pela seguinte equação:

$$K_D = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \times (1-2\nu)} \quad (4)$$

5.6.1. MEDIÇÃO DA PROPAGAÇÃO DAS ONDAS ULTRA SÓNICAS

Os provetes Ma, Mb, Mc, Md, foram preparados e submetidos ao ensaio de ultrassons em duas das faces de cada provete. Registaram-se 3 leituras de cada face, e o coeficiente poisson utilizado foi de 0,42, valor obtido no ensaio *in-situ* (Lagos), correspondente à primeira curva do transdutor d2. A densidade de cada provete foi calculada pela relação entre o peso das pedras e argamassa, e o volume do provete.

O valor absoluto do módulo de elasticidade do provete Ma, foi de 0,3 GPa, inferior ao valor obtido no ensaio à compressão de 0,38 GPa, no provete Mc, foi de 0,4 GPa, superior ao valor obtido no ensaio à compressão de 0,2 GPa (ver em anexo Tab.14), tendo em conta que materiais mais degradados, ou de coesão mais fraca, apresentam valores de velocidade de propagação inferiores aos de materiais compactos ou menos degradados (MAGALHÃES, [et al.], 2013).

5.7. REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS À COMPRESSÃO

Foram instalados quatro transdutores lineares de deslocamentos, nas diferentes faces de cada provete de alvenaria (Fig. 5.23), que foram ligados ao equipamento de aquisição de dados. Também foi usada uma célula de carga de modo a registar a carga de compressão induzida pelo macaco hidráulico.

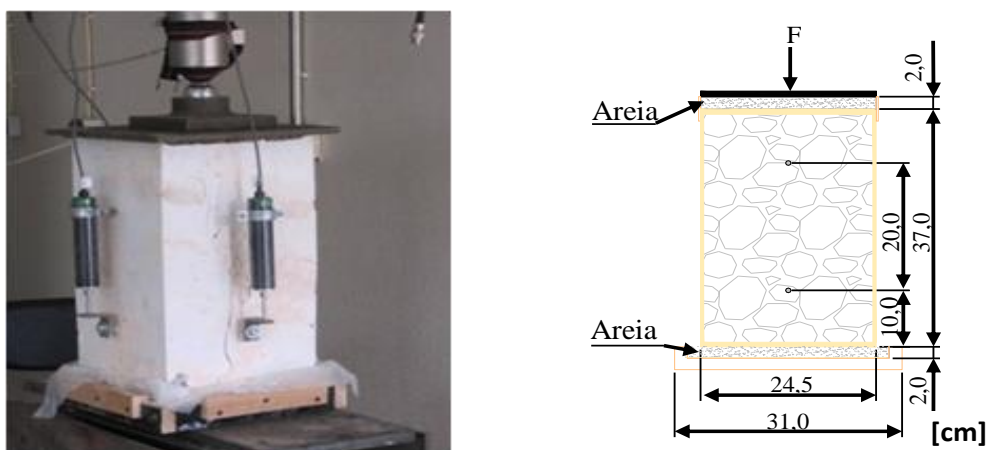


Figura 5.23 - Ilustração da preparação do ensaio.

Todos os provetes foram levados até à rotura, e registadas as respetivas tensões de rotura. Contudo, só foi possível registar as relações entre as tensões e as extensões até à rotura, em algumas faces dos provetes Ma e Mc, cujos resultados estão apresentados nas Fig. 5.24. / Fig. 5.25., respetivamente. Tal esteve relacionado com o nível de danos existente nas faces dos provetes de alvenaria, ainda antes de se atingir o ponto limite. De acordo com o observado durante os ensaios, o problema relacionou-se com a rotação/ destacamento das pedras dessas faces, impedindo os registos nos transdutores lineares de deslocamento até ao final do ensaio, tal como é possível observar na Fig. 5.25.

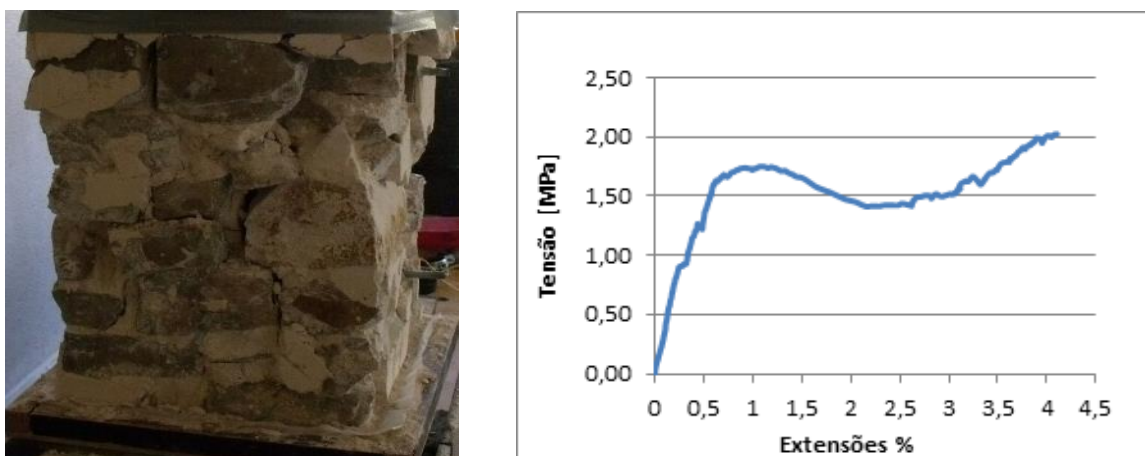


Figura 5.24 - Resultados obtidos no provete de alvenaria Ma.

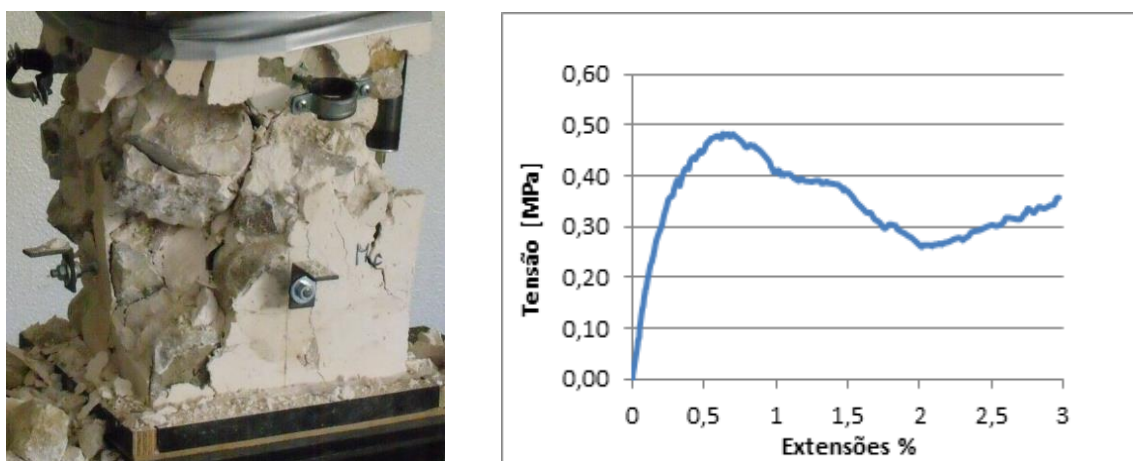


Figura 5.25 - Resultados obtidos no provete de alvenaria Mc.

O valor máximo da tensão de compressão do provete Ma foi de 2,02 MPa. O módulo de elasticidade foi calculado para uma tensão igual a 1/3 do valor da tensão de rotura do provete de alvenaria, de acordo com a norma NP EN 1052-1:2002 (IPQ, 2002), obtendo-se um módulo de elasticidade de 0,38 GPa. No provete Mc foi obtida uma tensão de rotura à compressão de 0,48 MPa e um módulo de elasticidade de 0,20 GPa, ver tabelas em anexo.

Em relação aos provetes de alvenaria Mb e Md (Fig. 5.26. / Fig. 5.27.) foram obtidos, respetivamente, valores de tensão de rotura de 0,72 MPa e de 0,47 MPa.



Figura 5.26 - Reajustamento do provete Mb.



Figura 5.27 - Reajustamento do provete Md.

A relação obtida entre o índice de forma médio das unidades de alvenaria de cada provete e a correspondente tensão de rotura está apresentada na (Fig. 5.28).

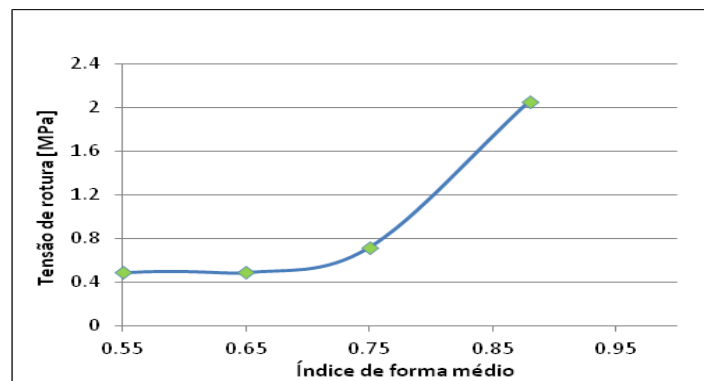


Figura 5.28 - Relação entre o índice de forma médio dos provetes e as tensões de rotura.

O provete Md com um índice forma média de 0,55 (pedras aproximadamente redondas), como se ilustra na (Fig. 5.29.), a distribuição de forças quando sujeito à força de compressão, há um reajustamento de imbricamento nas pedras depois de a argamassa plastificar e que ganha novamente resistência devido ao contacto entre as pedras, até levar a rotura, este exemplo ilustra o comportamento mecânico de uma parede de alvenaria de pedra, quando sujeita a forças de compressão.



Figura 5.29 - Reajustamento antes de entrar em colapso.

6. Conclusões

Neste trabalho foi proposto um índice de forma (I_f) das pedras que constituem a alvenaria, de modo a traduzir a sua regularidade e a forma como as pedras estão imbricadas.

Os ensaios realizados às pedras calcárias existentes no Algarve revelaram que estas podem possuir a resistência equivalente a um betão de alta resistência. A resistência das paredes de alvenaria poderá resultar da geometria das pedras, da forma como estas estão imbricadas nas paredes, e parece ser condicionada por fenómenos de instabilidade local e global.

A realização dos ensaios evidenciou a grande dificuldade em captar os gráficos das relações entre as extensões e as tensões até à rotura completa dos provetes de alvenaria ensaiados, quando os transdutores lineares de deslocamento são colocados no terço central dos provetes.

Da observação do gráfico da Fig. 5.28., é possível constatar que entre o provete Md (I_f médio de 0,55) e o provete Mc (I_f médio de 0,65), não se verifica qualquer subida significativa de tensão de rotura. Contudo, a partir do provete Mb (I_f médio de 0,75) a tensão de rotura sobe significativamente, com crescimento, aparentemente, exponencial. É importante realçar que as argamassas apresentavam resistências da mesma ordem de grandeza, à data dos ensaios em cada murete, sendo os respetivos traço e quantidades também idênticos.

Dos gráficos obtidos entre as extensões e as tensões (Figs. 10 e 11), foi possível constatar um comportamento global tipo "snap-through", pois foi possível observar que, após a ultrapassagem do primeiro ponto limite, a que se seguiu o amolecimento do material (provavelmente associado à plastificação da argamassa de assentamento das pedras), o provetes voltavam a ganhar rigidez e resistência novamente (provavelmente associado ao rearranjo das ligações entre as pedras). Em alguns ensaios, foi audível a rotura de algumas pedras (confirmada após inspeção visual posterior) antes de se verificar um incremento da resistência.

O murete Ma, com um índice de forma médio de 0,88 apresentou a maior tensão de rotura, o que era espectável, atendendo à maior área de contacto entre pedras, oferecendo consequentemente uma maior resistência.

Quando comparados os módulos de elasticidade obtidos *in-situ* com macacos planos, e os obtidos dos ensaios laboratoriais, é possível concluir que o provete Ma apresenta os valores mais próximos dos obtidos *in-situ*, o que está de acordo com a inspeção visual da alvenaria

da construção ensaiada, constituída por pedras calcárias de resistência semelhante e indiciando um elevado índice de forma médio.

Tendo por base os ensaios realizados, é possível concluir que a resistência à rotura e o módulo de elasticidade das paredes de alvenaria tradicional existente no Algarve, provavelmente são muito condicionadas pelo índice médio de forma das pedras usadas na sua construção.

Assim, os resultados apontam para que seja recomendável que as futuras avaliações da vulnerabilidade deste tipo de construção Algarvia tenham em conta o fator de forma. Neste contexto, também será desejável que se realize, no futuro, um estudo específico sobre as tipologias típicas existentes no Algarve, no que diz respeito ao índice de forma médio das unidades de alvenaria. Será desejável que esse estudo contemple a realização de ensaios *in-situ*, com macacos planos e a realização de ensaios laboratoriais.

7. Bibliografia

Almeida, C. ; Guedes, J.P. ; Arêde, A. ; Costa, A. - *PAREDES DE ALVENARIA DE PEDRA DE FOLHA ÚNICA: CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E COMPORTAMENTO ESTRUTURAL*. 9º Congresso Nacional de Mecânica Experimental Aveiro. (2014), p.12.

Almeida, Celeste- *Paredes de Alvenaria do Porto. Tipificação e Caracterização Experimental*. Porto, 2013. 335 p.

Andreini, Marco, [et al.]- *Mechanical characterization of masonry walls with chaotic texture: Procedures and results of in-situ tests*. International Journal of Architectural Heritage. ISSN 1558-3058. Vol. 8, n.º 3 (2014), p.376-407.

Arêde, António; Costa, Aníbal- *Inspecção e Diagnóstico Estrutural de Construções Históricas*. Algumas contribuições da FEUP. Seminário sobre A Intervenção no Património. Práticas de Conservação e Reabilitação, FEUP-DGEMN, FEUP, Porto. (2002), p.34.

ASTM- *Standard C1196 - Standard test method for In situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flatjack measurements*. West Conshohocken, United States: ASTM International, 2004a.

ASTM- *Standard C1197 - Standard test method for in situ measurement of masonry deformability properties using the flatjack method*. West Conshohocken, United States: ASTM International, 2004b.

ASTM- *Standard C 1531-Standard Test Methods for In Situ Measurement Of Masonry Mortar Joint Shear Strength Index I*. West Conshohocken, United States: ASTM international, 2003.

Baronio, G, [et al.]- *Characterisation of the materials used in the construction of the Noto Cathedral*. Construction and Building Materials. ISSN 0950-0618. Vol. 17, n.º 8 (2003), p.557-571.

Barros, Ricardo S., [et al.]- *Experimental characterization of physical and mechanical properties of schist from Portugal*. Construction and Building Materials. ISSN 0950-0618. Vol. 50, n.º 0 (2014), p.617-630.

Bentinho, Kid- *POWERED BY BLOGGER.COM* 2013. Disponível em WWW: <<http://kid-bentinho.blogspot.pt/2012/12/10-incriveis-cidades-construidas-em.html>>.

Binda, L- *Sperimentazione di tecniche di intervento di miglioramento strutturale su edifici in muratura nei centri storici: caratterizzazione meccanica delle murature in pietra della Lunigiana e verifica sperimentale dell'efficienza delle tecniche d'intervento per la riparazione ed il consolidamento degli edifici in muratura*. Convenzione di studio tra la Regione Toscana e il Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano. (1998).

Binda, L, [et al.]- *Repair and investigation techniques for stone masonry walls*. Construction and Building Materials. ISSN 0950-0618. Vol. 11, n.º 3 (1997), p.133-142.

Binda, L; Penazzi, D- *Classification of masonry cross sections and of typologies of historic buildings*. Book of Commissione RILEM MMM. (2000a), p.14.

- Binda, L; Saisi, A- *Non destructive testing applied to historic buildings: The case of some Sicilian Churches*. Historical constructions. University of Minho, Guimarães. (2001a), p.18.
- Binda, L; Saisi, A- *State of the art of research on historic structures in Italy*: Dept. of Structural Engineering, Politecnico of Milan, Italy. 2001b.
- Binda, L; Saisi, A; Tiraboschi, C- *Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries*. Construction and Building Materials. ISSN 0950-0618. Vol. 14, n.º 4 (2000b), p.199-233.
- Binda, Luigia, [et al.]- *A classification of structures and masonries for the adequate choice of repair: Workshop Repair Mortars for Historic Masonry*. RILEM Pro067. 2009.
- Binda, Luigia; Tiraboschi, Claudia- *Flat-Jack Test: A slightly destructive technique for the diagnosis of brick and stone masonry structures*. International Journal for Restoration of Buildings and Monuments. ISSN 0947-4498. (1999), p.449-472.
- Borri, A; De Maria, A- *Indice di Qualità Muraria (IQM) e sue applicazioni nell'ambito delle NTC 2008, su L'Edilizia*, Ed. De Lettera. (2009), p.12.
- Braga, Alfredo M; Estêvão, João MC- *DIFICULDADES ASSOCIADAS À REABILITAÇÃO DO PATRIMÓNIO CONSTRUÍDO EM TAIPA NO ALGARVE*: Congresso Construção. Coimbra, 2012.
- Camelo, Rui Vasques- *Modelação numérica de edifícios históricos de alvenaria*. UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA, 2010. 144 p.
- Cardoso, Al- *O Granito e as Casas da Beira!* , 2007. Disponível em WWW: <http://dalgodres.blogspot.pt/2007_05_01_archive.html>.
- Carvalho, Rafael- *Arquitectura D'ouro*, 2007. Disponível em WWW: <http://arquitecturadouro.blogspot.pt/2011_04_01_archive.html>.
- Casella, Gabriella, [et al.]- *Gramáticas de pedra: levantamento de tipologias de construção murária*. (2003), p.304. ISSN 9729419434.
- Cavaca, José- *Casas típicas da Aldeia.*, 2011. Disponível em WWW: <<http://cavaca.blogs.sapo.pt/2011/09/>>.
- CEN- *EN 1998-3: 2005. Eurocode 8, Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Assessment and retrofitting of buildings*. Brussels: Comité Européen de Normalisation, 2005.
- Chester, David K; Chester, Olivia K- *The impact of eighteenth century earthquakes on the Algarve region, southern Portugal*. The Geographical Journal. Vol. 176, n.º 4 (2010), p.350–370.
- Corradi, M; Borri, A; Vignoli, A- *Strengthening techniques tested on masonry structures struck by the Umbria–Marche earthquake of 1997–1998*. Construction and Building Materials. ISSN 0950-0618. Vol. 16, n.º 4 (2002), p.229-239.
- Costa, Alexandre A., [et al.]- *In situ cyclic tests on existing stone masonry walls and strengthening solutions*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. ISSN 1096-9845. Vol. 40, n.º 4 (2011), p.449-471.

Costa, Alexandre; Seabra, Clara; Nunes, Seabra- *O que nos diz a história*. In Costa, Alexandre; Abreu, Maria Conceição- 1755 - Terramoto no Algarve. Faro: Centro Ciência Viva do Algarve, 2005. p. 13-152.

Costa, AlexandreA, [et al.]- *Out-of-plane behaviour of existing stone masonry buildings: experimental evaluation*. Bulletin of Earthquake Engineering. ISSN 1570-761X. Vol. 10, n.º 1 (2012), p.93-111.

Costa, Aníbal- *Determination of mechanical properties of traditional masonry walls in dwellings of Faial Island, Azores*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. ISSN 1096-9845. Vol. 31, n.º 7 (2002), p.1361-1382.

EN, NP- 12504-4 *Testing concrete-Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity*. (2004), p.12.

Farinha, J.S.B., [et al.]- *Tabelas técnicas*. Edições Técnicas E.T.L., 1996. ISBN 9789729973123.

Filipe, Marco Gonçalves- *Caraterização de alvenarias antigas. Ensaios de Flat Jack*. Universidade de Aveiro 2012. 126 p.

Giuffrè, Antonino; Carocci, Caterina; Baggio, Carlo- *Sicurezza e conservazione dei centri storici: il caso Ortigia: codice di pratica per gli interventi antisismici nel centro storico*. Editori Laterza, 1993. ISBN 8842042501.

GNDT- *Manuale per la compilazione della scheda di 1° livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza post-sismica* (2000), p.117.

Gomes, A.- *Caracterização de argamassas tradicionais utilizadas nos revestimentos exteriores dos edifícios*. Instituto Superior Técnico, (1995a). 269 p.

Gregorczyk, Paulo B. Lourenço; Pawel- *A Review on Flat-Jack Testing*. Universidade do Minho, 2000. 12 p.

Huerta Fernández, Santiago- *Mechanics of masonry vaults: the equilibrium approach*. Escuela T. S. de Arquitectura. Departamento de Estructuras. (2001), p.24. ISSN 9728692013.

ICOMOS- *(COMITÉ CIENTÍFICO INTERNACIONAL PARA A ANÁLISE E RESTAURO DE ESTRUTURAS DO PATRIMÓNIO ARQUITECTÓNICO)*, Recomendações para a análise, conservação e restauro estrutural do património arquitectónico. (2003), p.42.

IPQ- NP EN 1052-1. *Método de ensaio para alvenaria. Parte 1: Determinação da resistência à compressão*. [22]. (2002), p.17.

IPQ- NP EN 1097-6. *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volumica e da absorção de água*. (2003), p.33.

Jorne, Fernando; Henriques, Fernando; Baltazar, Luís G- *Avaliação da técnica de injeção de grout recorrendo ao ensaio de ultra-sons e tomografia ultra-sónica*. (2012), p.12.

JRC- *Field Manual for post-earthquake damage and safety assessment and short term countermeasures (AeDES)*. European Commission. (2007), p.100.

LAMEGO, Paula- *Avaliação de técnicas construtivas utilizadas na reabilitação sísmica de edifícios em alvenaria de pedra*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, 2007.

LNEC- *Carta geológica de Portugal*, 2010. Disponível em WWW: <<http://www.lneg.pt/download/2769/cgp500k.pdf>>.

Lourenço, Paulo B; Pagaimo, Filipe; Júlio, Eduardo- *Caracterização das paredes de alvenaria da vila de Tentúgal*. (2005), p.8.

Lourenço, Paulo B, [et al.]- *Experimental investigation on the seismic performance of masonry buildings using shaking table testing*. Bulletin of Earthquake Engineering. ISSN 1570-761X. Vol. 11, n.º 4 (2013), p.1157-1190.

Magalhães, [et al.]- *Diagnóstico de anomalias de revestimentos de paredes com técnicas de ensaio in situ, Avaliação da resistência mecânica. Actas do 3º ENCORE: Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios*. Lisboa, LNEC. Lisboa, LNEC, 2013.

Marrocos. 1987. Disponível em WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/A%C3%Aft_Benhaddou#mediaviewer/File:A%C3%Aft_Benhaddou4_%28js%29.jpg>.

Miranda, Luís Filipe Barbosa- *Ensaaios acústicos e de macacos planos em alvenarias resistentes*. Universidade do Porto, 2013. 259 p.

Miranda, M; Carrilho, F- *45 anos do sismo de 28 de fevereiro de 1969* [3]. Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2014.

Morais, Hugo Miguel Pinela de Lacerda- *Análise experimental de um murete de alvenaria de pedra tradicional*. (2011), p.105.

Mota, Kátia Eliane Miranda de Vasconcelos- *Caracterização e tipificação in situ de paredes de alvenaria de pedra*. Universidade do Porto, 2009. 113 p.

Neves, Filipe, [et al.]- *Seismic vulnerability assessment and characterisation of the buildings on Faial Island, Azores*. Bulletin of Earthquake Engineering. ISSN 1570-761X. Vol. 10, n.º 1 (2012), p.27-44.

Nikolov-*Cidade mais antiga da Europa*, 2012. Disponível em WWW: <<http://veja.abril.com.br/noticia/ciencia/arqueologos-descobrem-cidade-mais-antiga-da-europa#provincia>>.

Nunes, João Miguel Correia de Andrade- *Modelação numérica de modelos experimentais de alvenaria de pedra tradicional*. (2011), p.105.

Oliveira, Bruno de Sousa- *Análise numérica da representatividade de ensaios com macacos planos em paredes de alvenaria de pedra*. Universidade do Porto: 2010. 184 p.

Oliveira, Daniel V.; Lourenço, Paulo B.- *Experimental behaviour of three-leaf stone masonry walls* [9]: Heritage protection : construction aspect : proceedings of the Conference and Brokerage Event the Construction Aspects of Built Heritage Protection. Dubrovnik, Croatia, 2006.

Pacheco-Torgal, F.; Faria, J.; Jalali, S.- *Some considerations about the use of lime–cement mortars for building conservation purposes in Portugal: A reprehensible option or a lesser evil?* [20]: Construction and Building Materials. 2012. Disponível em WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061811006805>>. ISBN/ISSN 0950-0618.

- Pagaimo, Filipe Alexandre Loureiro, [et al.]- *Caracterização morfológica e mecânica de alvenarias antigas caso de estudo da vila histórica de Tentúgal*. (2004), p.8.
- Pasticier, Laurent; Amadio, Claudio; Fragiaco, Massimo- *Non-linear seismic analysis and vulnerability evaluation of a masonry building by means of the SAP2000 V. 10 code*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. ISSN 1096-9845. Vol. 37, n.º 3 (2008), p.467-485.
- Pedro Medeiros, José Oliveira- *Caracterização mecânica de provetes de alvenaria de pedra tradicional dos Açores: 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas / Encontro Nacional Betão Estrutural 2014 / 9º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica*. LISBOA: LNEC, 2014.
- Pereira, Sofia Patrícia Leite- *COMPORTAMENTO DA ALVENARIA DE PEDRA AO ESFORÇO DE CORTE*. (2003), p.67.
- Pinho, Fernando; Baião, Manuel; Lúcio, Válder- *Técnicas de consolidação de paredes de edifícios antigos*. 3º Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, LNEC, Lisboa. (2003), p.9.
- ProtAlgarve- *Apreciação do Risco Sísmico no Algarve*. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Algarve. Vol. II (2004), p.55.
- Queirós, Margarida; Vaz, Teresa; Palma, Pedro- *Uma reflexão a propósito do risco*. VI Congresso da Geografia Portuguesa. (2007), p.23.
- Quitério, Paulo- *Arquiteturas ou vivências de um espaço (Algarve- Portugal)*. Arquitectura vernácula en el mundo ibérico: actas del congreso internacional sobre arquitectura vernácula. (2007), p.312-319. ISSN 8469096397.
- Ribeiro, Maria- *Casas com alma / Homes with soul*, 2013. Disponível em WWW: <<http://www.pinterest.com/lenar53/casas-com-alma-homes-with-soul/>>.
- Ribeiro, Vítor- *Casa rural no Minho*, 2009. Disponível em WWW: <<https://www.flickr.com/photos/vribeiro/5346293835/in/photostream/>>.
- RILEM- RILEM recommendation MDT. D.5—*in-situ stress-strain behaviour tests based on the flat jack*. Materials and Structures. ISSN 1359-5997. Vol. 37, n.º 7 (2004a), p.497-501.
- RILEM- RILEM recommendation MDT. D. 4: *In-situ stress tests based on the flat jack*. Materials and Structures. ISSN 1359-5997. Vol. 37, n.º 7 (2004b), p.491-496.
- Rodrigues, H, [et al.]- *Sismo de L'Aquila de 6 de Abril de 2009: ensinamentos para Portugal*. SÍSMICA 2010 – 8º CONGRESSO DE SISMOLOGIA E ENGENHARIA SÍSMICA. (2010), p.14.
- Rodrigues, Maria Paulina Santos Forte Faria- *Argamassa de revestimento para alvenarias antigas*. Universidade Nova De Lisboa, 2004. 414 p.
- Romão, Miguel- *1ª Travessia Pedra Amarela da Via Algarviana*. 2009. Disponível em WWW: <<http://omeuadmiravelcantinho.blogspot.pt/2009/02/1-travessia-pedramarela-via-algarviana.html>>.
- Romeu Vicente, Tiago Ferreira, Rui Maio,; Humberto Varum, Alexandre A. Costa; Aníbal Costa, Carlos S. Oliveira, João Estevão- *Seismic Vulnerability Assessment of existing masonry buildings*:

Case study of the old city centre of Faro, Portugal SECOND EUROPEAN CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING AND SEISMOLOGY. (2014), p.9.

Romeu Vicente; J. A. R., Mendes da Silva; Humberto Varum; Hugo Rodrigues; Eduardo Júlio- *Caracterização mecânica de paredes de alvenaria em construções antigas- Ensaio com macacos planos*: Revista Internacional Construlink. 2009. ISBN/ISSN 1645-5576.

Roque, João C Almendra- *Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria*. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, 2002. 352 p.

Roque, João C. Almendra; Lourenço, Paulo B.- *Caracterização mecânica de paredes antigas de alvenaria* : um caso de estudo no centro histórico de Bragança. Engenharia Civil. Vol. 17 (2003), p.31-42.

Rosa, Carlos Francisco Meneses Fernandes Faria- *Caracterização de alvenarias de pedra antigas*. Universidade Nova de Lisboa, 2013. 114 p.

Simões, A., [et al.]- *Characterization of old masonry walls: flat-jack method*. 15th World Conference on Earthquake Engineering [14]. (2012), p.1-10, paper 2438.

Síria. 2005. Disponível em WWW: http://pt.wikipedia.org/wiki/Revolu%C3%A7%C3%A3o_urbana#mediaviewer/File:DuraEuropos-PalmyraGate.jpg.

Trindade, Vanda Rute Nazário Neves- *Caracterização construtiva, análise de anomalias e propostas de intervenção*. Universidade Nova de Lisboa, 2008. 125 p.

Valluzzi, MR- *Comportamento meccanico di murature consolidate con materiali e tecniche a base di calce*. Università di Padova, Italy, 2000. 276 p.

Varum, H, [et al.]- *Estudo da Vulnerabilidade e Soluções de Reforço de edifícios em alvenaria*: Centro Histórico de Coimbra. (2005), p.19. ISSN 1415-3025.

Veiga, M. Rosário- *Argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações correntes*. 3º ENCORE - Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios [21]. (2003), p.1-10.

Vicente, Romeu da Silva- *Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana*. Universidade de Aveiro, 2008. 617 p.

ANEXOS

Tabela completa do registo do ensaio duplo dos macacos planos

Pressão	σ	σ	L ₂		L ₄	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	V ₂	V ₃
			379	380	290					
[MPa]	[MPa]	[GPa]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0,2	0,125	0,00013	0,035	0,050	0,000	0,0001	0,0001	0,0000		
0,3	0,188	0,00019	0,075	0,030	0,000	0,0002	0,0001	0,0000		
0,4	0,251	0,00025	0,120	0,050	0,000	0,0003	0,0001	0,0000		
0,5	0,313	0,00031	0,170	0,075	-0,005	0,0004	0,0002	0,0000		
0,6	0,376	0,00038	0,190	0,090	-0,010	0,0005	0,0002	0,0000		
0,7	0,438	0,00044	0,210	0,095	-0,010	0,0006	0,0003	0,0000		
0,8	0,501	0,00050	0,235	0,105	-0,015	0,0006	0,0003	-0,0001		
0,9	0,564	0,00056	0,250	0,115	-0,020	0,0007	0,0003	-0,0001	0,2563	0,4604
1,0	0,626	0,00063	0,280	0,130	-0,025	0,0007	0,0003	-0,0001		
1,1	0,689	0,00069	0,295	0,140	-0,030	0,0008	0,0004	-0,0001		
1,2	0,752	0,00075	0,325	0,150	-0,035	0,0009	0,0004	-0,0001		
1,3	0,814	0,00081	0,360	0,170	-0,040	0,0009	0,0004	-0,0001		
1,5	0,940	0,00094	0,425	0,220	-0,055	0,0011	0,0006	-0,0002		
1,6	1,002	0,00100	0,480	0,260	-0,070	0,0013	0,0007	-0,0002		
1,4	0,877	0,00088	0,485	0,265	-0,070	0,0013	0,0007	-0,0002		
1,0	0,626	0,00063	0,470	0,245	-0,070	0,0012	0,0006	-0,0002		
0,6	0,376	0,00038	0,425	0,210	-0,060	0,0011	0,0006	-0,0002		
0,2	0,125	0,00013	0,335	0,145	-0,045	0,0009	0,0004	-0,0002		
0,0	0,000	0,00000	0,280	0,110	-0,040	0,0007	0,0003	-0,0001		
0,3	0,188	0,00019	0,300	0,130	-0,040	0,0008	0,0003	-0,0001		
0,6	0,376	0,00038	0,365	0,170	-0,040	0,0010	0,0004	-0,0001		
0,9	0,564	0,00056	0,425	0,210	-0,050	0,0011	0,0006	-0,0002		
1,2	0,752	0,00075	0,465	0,250	-0,065	0,0012	0,0007	-0,0002		
1,5	0,940	0,00094	0,510	0,285	-0,075	0,0013	0,0008	-0,0003		
1,7	1,065	0,00106	0,590	0,340	-0,095	0,0016	0,0009	-0,0003		
1,8	1,128	0,00113	0,610	0,360	-0,100	0,0016	0,0009	-0,0003		
1,9	1,190	0,00119	0,635	0,375	-0,105	0,0017	0,0010	-0,0004		
2,0	1,253	0,00125	0,670	0,405	-0,110	0,0018	0,0011	-0,0004		
2,1	1,315	0,00132	0,725	0,445	-0,135	0,0019	0,0012	-0,0005		
2,2	1,378	0,00138	0,795	0,505	-0,155	0,0021	0,0013	-0,0005	0,4196	0,5040
2,3	1,441	0,00144	0,860	0,560	-0,175	0,0023	0,0015	-0,0006		
2,4	1,503	0,00150	0,915	0,610	-0,190	0,0024	0,0016	-0,0007		
2,5	1,566	0,00157	0,960	0,640	-0,205	0,0025	0,0017	-0,0007		
2,6	1,629	0,00163	1,010	0,685	-0,225	0,0027	0,0018	-0,0008		
2,7	1,691	0,00169	1,060	0,730	-0,240	0,0028	0,0019	-0,0008		
2,8	1,754	0,00175	1,135	0,795	-0,270	0,0030	0,0021	-0,0009		

Continuação da tabela do ensaio duplo dos macacos planos.

Pressão	σ	σ	L_2		L_4	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	V_2	V_3
			379	380	290					
[MPa]	[MPa]	[GPa]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
2,9	1,817	0,001817	1,250	0,900	-0,320	0,0033	0,0024	-0,0011		
2,5	1,566	0,001566	1,245	0,885	-0,320	0,0033	0,0023	-0,0011		
2,0	1,253	0,001253	1,225	0,865	-0,320	0,0032	0,0023	-0,0011		
1,5	0,940	0,00094	1,185	0,825	-0,310	0,0031	0,0022	-0,0011		
1,0	0,626	0,000626	1,125	0,780	-0,290	0,0030	0,0021	-0,0010		
0,5	0,313	0,00031	1,025	0,700	-0,255	0,0027	0,0018	-0,0009		
0,0	0,000	0,00000	0,855	0,560	-0,210	0,0023	0,0015	-0,0007		
0,5	0,313	0,00031	0,925	0,620	-0,205	0,0024	0,0016	-0,0007		
1,0	0,626	0,00063	1,060	0,725	-0,230	0,0028	0,0019	-0,0008		
1,5	0,940	0,00094	1,140	0,795	-0,260	0,0030	0,0021	-0,0009		
2,0	1,253	0,001253	1,200	0,850	-0,285	0,0032	0,0022	-0,0010		
2,5	1,566	0,001566	1,250	0,890	-0,305	0,0033	0,0023	-0,0011		
3,0	1,879	0,00188	1,335	0,970	-0,345	0,0035	0,0026	-0,0012		
3,1	1,942	0,001942	1,380	1,010	-0,360	0,0036	0,0027	-0,0012		
3,2	2,004	0,00200	1,410	1,040	-0,375	0,0037	0,0027	-0,0013		
3,4	2,130	0,00213	1,450	1,075	-0,400	0,0038	0,0028	-0,0014		
3,5	2,192	0,00219	1,490	1,110	-0,415	0,0039	0,0029	-0,0014	0,9312	0,7946
3,6	2,255	0,00226	1,605	1,290	-0,530	0,0042	0,0034	-0,0018		
3,7	2,318	0,00232	1,660	1,360	-0,580	0,0044	0,0036	-0,0020		
3,8	2,380	0,00238	1,735	1,440	-0,630	0,0046	0,0038	-0,0022		
2,0	1,253	0,00125	1,650	1,360	-0,620	0,0044	0,0036	-0,0021		
1,0	0,626	0,00063	1,545	1,255	-0,550	0,0041	0,0033	-0,0019		
0,5	0,313	0,00031	1,430	1,150	-0,485	0,0038	0,0030	-0,0017		
0,0	0,000	0,00000	1,280	1,000	-0,420	0,0034	0,0026	-0,0014		

Tabela completa do Índice forma Ma.

Grupo	Amostra	Massa [g]	M* [g]	V _{REAL} [cm ³]	L _x [cm]	L _y [cm]	L _z [cm]	V _{PRISMA} [cm ³]	Índice
1	1	754,0	466,0	288,0	7,4	9,8	4,2	304,6	0,95
1	2	994,5	613,0	381,5	7,0	13,0	5,0	455,0	0,84
1	3	863,5	533,5	330,0	7,5	9,3	5,3	369,7	0,89
1	4	998,5	618,5	380,0	6,7	10,5	5,8	408,0	0,93
1	5	657,0	404,5	252,5	8,4	8,5	3,8	271,3	0,93
1	6	1420,5	881,5	539,0	8,5	10,3	7,0	612,9	0,88
1	7	523,5	324,5	199,0	5,8	7,5	5,4	234,9	0,85
1	8	675,5	417,7	257,8	8,0	9,5	4,0	304,0	0,85
1	9	640,0	396,0	244,0	8,3	8,9	3,8	280,7	0,87
1	10	1220,5	762,0	458,5	9,2	12,0	4,9	541,0	0,85
1	11	803,5	496,5	307,0	10,3	10,2	3,5	367,7	0,83
1	12	677,0	422,5	254,5	7,8	11,0	3,5	300,3	0,85
1	13	387,5	239,0	148,5	5,0	6,8	5,1	173,4	0,86
1	14	257,5	160,0	97,5	5,0	6,0	3,5	105,0	0,93
1	15	716,5	443,0	273,5	7,5	9,0	4,7	317,3	0,86
1	16	958,5	595,5	363,0	8,5	10,5	4,9	437,3	0,83
1	17	771,0	479,0	292,0	8,5	10,0	4,1	348,5	0,84
1	18	1705,0	1054,5	650,5	8,7	13,0	5,9	667,3	0,97
1	19	248,0	154,0	94,0	5,5	7,0	2,9	111,7	0,84
1	20	842,0	516,0	326,0	8,5	7,0	5,9	351,1	0,93
1	21	313,0	193,5	119,5	6,0	6,0	3,7	133,2	0,90
1	22	794,5	490,5	304,0	6,6	10,4	4,5	308,9	0,98
1	23	1536,0	949,7	586,3	11,5	11,0	5,0	632,5	0,93
1	24	1248,5	773,0	475,5	8,0	10,0	6,4	512,0	0,93
1	25	923,5	569,5	354,0	9,8	12,0	3,6	423,4	0,84
1	26	444,5	279,0	165,5	7,0	11,0	2,5	192,5	0,86
1	27	575,5	354,0	221,5	4,5	9,4	6,1	258,0	0,86
1	28	1139,0	704,3	434,7	10,5	10,0	4,8	504,0	0,86
1	29	681,5	421,4	260,1	9,0	7,5	4,5	303,8	0,86
1	30	559,5	346,0	213,5	11,5	5,0	4,5	258,8	0,83
1	31	464,5	287,2	177,3	8,0	6,5	3,7	192,4	0,92
1	32	2734,0	1697,0	1037,0	19,0	10,0	6,0	1140,0	0,91
1	33	2263,0	1402,5	860,5	13,0	12,5	6,5	1056,3	0,81
1	34	2648,0	1641,5	1006,5	14,0	10,0	7,5	1050,0	0,96
1	35	658,0	407,5	250,5	9,0	11,0	3,0	297,0	0,84
1	36	1668,0	1029,0	639,0	17,5	9,0	5,0	787,5	0,81

Tabela completa do Índice forma Mb.

Grupo	Amostra	Massa [g]	M* [g]	V _{REAL} [cm ³]	L _x [cm]	L _y [cm]	L _z [cm]	V _{PRISMA} [cm ³]	ÍNDICE
2	1	938,0	582,0	356,0	8,7	8,4	6,3	460,4	0,77
2	2	1611,0	1003,5	607,5	10,0	9,8	8,1	793,8	0,77
2	3	883,5	549,0	334,5	7,1	9,6	6,5	443,0	0,76
2	4	468,5	293,0	175,5	5,5	8,7	5,1	244,0	0,72
2	5	823,5	505,0	318,5	6,6	8,5	7,2	403,9	0,79
2	6	388,0	240,5	147,5	5,0	8,0	5,0	200,0	0,74
2	7	980,0	598,5	381,5	8,2	9,5	6,2	483,0	0,79
2	8	321,5	197,5	124,0	4,5	7,5	4,8	162,0	0,77
2	9	437,0	270,0	167,0	5,5	7,0	5,8	223,3	0,75
2	10	423,5	260,0	163,5	5,5	7,1	5,3	207,0	0,79
2	11	665,0	415,5	249,5	7,0	11,0	4,4	338,8	0,74
2	12	313,0	194,0	119,0	4,5	8,3	4,1	153,1	0,78
2	13	275,0	169,0	106,0	5,5	5,0	5,0	137,5	0,77
2	14	247,5	153,0	94,5	4,5	5,6	4,8	121,0	0,78
2	15	365,5	226,5	139,0	5,1	7,5	4,6	176,0	0,79
2	16	439,5	270,0	169,5	5,1	7,0	6,5	232,1	0,73
2	17	250,5	156,5	94,0	5,0	5,5	4,5	123,8	0,76
2	18	252,5	154,5	98,0	5,6	4,6	4,8	123,6	0,79
2	19	281,0	171,5	109,5	4,2	6,5	5,2	142,0	0,77
2	20	1006,5	608,0	398,5	10,5	10,0	5,3	556,5	0,72
2	21	899,0	554,0	345,0	8,0	7,0	8,3	464,8	0,74
2	22	330,0	204,0	126,0	8,0	6,0	3,5	168,0	0,75
2	23	298,0	183,0	115,0	4,4	8,0	4,6	161,9	0,71
2	24	317,5	194,0	123,5	5,2	7,8	4,3	174,4	0,71
2	25	253,0	157,0	96,0	5,0	6,5	4,1	133,3	0,72
2	26	175,5	107,5	68,0	5,0	4,4	4,4	96,8	0,70
2	27	276,0	169,5	106,5	4,5	6,1	5,4	148,2	0,72
2	28	199,5	124,0	75,5	5,0	6,0	3,5	105,0	0,72
2	29	1250,0	768,5	481,5	9,5	10,2	6,3	610,5	0,79
2	30	494,5	304,0	190,5	6,5	10,5	3,8	259,4	0,73
2	31	428,0	265,0	163,0	6,6	8,0	3,9	205,9	0,79
2	32	345,0	214,5	130,5	5,3	8,0	4,1	173,8	0,75
2	33	586,5	361,0	225,5	7,3	8,0	5,0	292,0	0,77
2	34	358,5	222,0	136,5	5,5	10,0	3,2	176,0	0,78
2	35	1048,5	646,0	402,5	9,1	10,5	5,3	506,4	0,79
2	36	356,5	218,0	138,5	5,9	7,6	3,9	174,9	0,79
2	37	472,0	288,0	184,0	7,1	8,0	4,2	238,6	0,77
2	38	1119,0	701,5	417,5	9,5	12,0	4,9	558,6	0,75
2	39	1175,0	718,5	456,5	6,7	11,5	7,6	585,6	0,78
2	40	1969,0	1214,6	754,4	11,5	15,0	7,0	1207,5	0,62
2	41	1858,0	1146,1	711,9	11,0	13,5	7,1	1054,4	0,68
2	42	1694,0	1045,0	649,0	8,0	12,5	7,5	750,0	0,87
2	43	939,0	579,2	359,8	8,5	9,5	6,5	524,9	0,69

Tabela completa do Índice forma Mc.

Grupo	Amostra	Massa [g]	M* [g]	V _{REAL} [cm ³]	L _x [cm]	L _y [cm]	L _z [cm]	V _{PRISMA} [cm ³]	ÍNDICE
3	1	910,5	559,0	351,5	9,5	7,5	7,3	520,1	0,68
3	2	824,5	515,0	309,5	6,4	8,3	8,4	446,2	0,69
3	3	481,5	294,0	187,5	6,7	7,5	5,6	281,4	0,67
3	4	647,5	396,0	251,5	7,0	8,4	6,2	364,6	0,69
3	5	426,5	264,0	162,5	8,5	6,5	4,7	259,7	0,63
3	6	844,0	518,5	325,5	6,7	11,5	6,7	516,2	0,63
3	7	1621,5	1007,5	614,0	12,0	10,0	7,6	912,0	0,67
3	8	752,0	468,5	283,5	6,1	10,5	6,5	416,3	0,68
3	9	1695,5	1049,0	646,5	11,5	12,0	7,0	966,0	0,67
3	10	1526,0	948,0	578,0	10,0	11,0	8,0	880,0	0,66
3	11	902,5	553,5	349,0	8,5	9,5	6,5	524,9	0,66
3	12	653,5	404,5	249,0	7,2	9,0	5,6	362,9	0,69
3	13	544,0	336,5	207,5	6,6	8,8	5,2	302,0	0,69
3	14	261,5	161,0	100,5	5,5	6,0	4,5	148,5	0,68
3	15	640,0	392,0	248,0	6,6	8,2	6,7	362,6	0,68
3	16	401,5	251,0	150,5	7,0	8,0	4,5	252,0	0,60
3	17	194,5	119,0	75,5	5,5	4,6	4,4	111,3	0,68
3	18	327,5	198,5	129,0	8,4	6,0	4,3	216,7	0,60
3	19	559,5	343,0	216,5	8,5	8,0	4,8	326,4	0,66
3	20	464,0	288,5	175,5	7,0	5,5	6,7	258,0	0,68
3	21	322,5	198,0	124,5	7,0	6,0	4,4	184,8	0,67
3	22	605,0	374,0	231,0	7,8	8,7	5,0	339,3	0,68
3	23	189,5	118,0	71,5	6,0	5,0	3,6	108,0	0,66
3	24	670,0	414,0	256,0	10,0	6,0	6,7	402,0	0,64
3	25	374,5	229,5	145,0	8,0	6,0	4,6	220,8	0,66
3	26	355,0	218,5	136,5	7,5	6,5	4,2	204,8	0,67
3	27	562,0	344,0	218,0	8,7	7,3	5,7	362,0	0,60
3	28	295,0	182,5	112,5	7,1	6,0	4,4	187,4	0,60
3	29	394,0	242,5	151,5	8,5	6,5	4,6	254,2	0,60
3	30	487,0	299,5	187,5	8,5	6,0	5,9	300,9	0,62
3	31	208,5	128,5	80,0	5,5	4,5	4,7	116,3	0,69
3	32	287,5	179,0	108,5	6,0	6,5	4,6	179,4	0,60
3	33	297,0	180,0	117,0	5,5	7,5	4,6	189,8	0,62
3	34	748,0	465,0	283,0	9,5	7,0	7,0	465,5	0,61
3	35	178,5	107,5	71,0	6,3	4,2	4,4	116,4	0,61
3	36	138,5	85,0	53,5	4,5	4,0	4,6	82,8	0,65
3	37	574,0	354,0	220,0	9,0	8,0	4,9	352,8	0,62
3	38	325,0	197,5	127,5	6,5	6,0	5,0	195,0	0,65
3	39	466,5	286,5	180,0	8,0	6,0	6,0	288,0	0,63
3	40	443,0	271,0	172,0	6,0	9,5	4,9	279,3	0,62
3	41	135,0	84,0	51,0	3,5	6,0	3,8	79,8	0,64
3	42	223,0	139,5	83,5	5,0	6,0	4,2	126,0	0,66
3	43	149,5	89,5	60,0	5,5	4,2	3,9	90,1	0,67
3	44	537,0	309,0	228,0	7,5	8,5	5,3	337,9	0,67
3	45	220,0	136,0	84,0	5,0	6,0	4,3	129,0	0,65
3	46	271,5	168,0	103,5	4,4	7,5	5,1	168,3	0,61
3	47	322,0	198,0	124,0	4,9	10,0	4,1	200,9	0,62
3	48	427,0	262,7	164,3	8,0	7,0	4,5	252,0	0,65
3	49	1172,0	721,0	451,0	11,5	9,0	6,5	672,8	0,67
3	50	842,0	518,0	324,0	9,8	6,9	7,0	473,3	0,68
3	51	1786,0	1098,7	687,3	14,0	10,5	7,0	1029,0	0,67
3	52	1093,0	672,4	420,6	10,5	10,0	6,0	630,0	0,67
3	53	675,0	415,2	259,8	8,0	7,5	6,4	384,0	0,68

Tabela completa do Índice forma Md.

Grupo	Amostra	Massa [g]	M* [g]	V _{REAL} [cm ³]	L _x [cm]	L _y [cm]	L _z [cm]	V _{PRISMA} [cm ³]	ÍNDICE
4	1	889,0	554,0	335,0	8,8	9,4	8,1	670,0	0,50
4	2	503,5	311,5	192,0	6,9	9,3	6,0	385,0	0,50
4	3	341,0	211,0	130,0	6,0	7,0	5,7	239,4	0,54
4	4	444,0	275,0	169,0	6,3	8,6	5,6	303,4	0,56
4	5	725,0	448,5	276,5	7,5	9,5	6,5	463,1	0,60
4	6	443,5	275,5	168,0	7,7	6,3	6,4	310,5	0,54
4	7	273,0	169,0	104,0	6,1	6,8	4,6	190,8	0,55
4	8	517,5	323,5	194,0	6,5	7,8	6,5	329,6	0,59
4	9	398,0	246,5	151,5	7,2	7,5	4,9	264,6	0,57
4	10	199,0	124,0	75,0	4,4	6,2	4,7	128,2	0,58
4	11	164,0	102,0	62,0	4,5	5,8	4,2	109,6	0,57
4	12	264,0	163,5	100,5	5,5	8,0	4,5	198,0	0,51
4	13	856,0	532,5	323,5	7,5	10,0	7,2	540,0	0,60
4	14	1497,5	929,5	568,0	12,0	9,5	8,4	957,6	0,59
4	15	1251,5	774,0	477,5	8,5	11,5	8,2	801,6	0,60
4	16	955,5	592,5	363,0	9,3	10,2	6,5	616,6	0,59
4	17	1565,0	963,5	601,5	9,7	10,8	9,6	1005,7	0,60
4	18	279,0	171,5	107,5	5,0	7,3	4,9	178,9	0,60
4	19	335,5	205,5	130,0	5,5	7,2	5,6	221,8	0,59
4	20	312,0	193,0	119,0	6,0	6,5	6,1	237,9	0,50
4	21	270,0	166,5	103,5	6,5	6,0	5,0	195,0	0,53
4	22	336,5	209,0	127,5	6,7	5,7	5,6	213,9	0,60
4	23	520,0	321,0	199,0	8,0	7,0	6,3	352,8	0,56
4	24	180,0	112,0	68,0	4,7	5,5	4,6	118,9	0,57
4	25	456,0	282,0	174,0	6,9	7,5	5,7	295,0	0,59
4	26	490,5	306,5	184,0	6,5	7,5	7,0	341,3	0,54
4	27	123,5	77,0	46,5	4,5	4,5	3,8	77,0	0,60
4	28	163,0	101,5	61,5	5,1	5,3	4,5	121,6	0,51
4	29	466,5	290,0	176,5	7,4	7,6	5,7	320,6	0,55
4	30	227,0	141,0	86,0	5,4	5,7	4,5	138,5	0,62
4	31	170,0	106,0	64,0	4,5	6,0	4,5	121,5	0,53
4	32	127,5	78,5	49,0	3,5	6,5	3,9	88,7	0,55
4	33	58,0	36,0	22,0	3,7	3,8	3,0	42,2	0,52
4	34	63,5	39,5	24,0	3,5	3,7	3,3	42,7	0,56
4	35	114,0	71,0	43,0	4,0	4,5	4,1	73,8	0,58
4	36	134,0	83,0	51,0	4,5	5,2	3,7	86,6	0,59
4	37	169,0	105,0	64,0	4,9	5,2	4,6	117,2	0,55
4	38	130,0	80,5	49,5	5,5	4,5	3,9	96,5	0,51
4	39	429,0	267,0	162,0	7,5	7,0	5,5	288,8	0,56
4	40	361,0	223,0	138,0	6,5	8,0	4,9	254,8	0,54
4	41	252,5	156,5	96,0	7,0	6,0	4,5	189,0	0,51
4	42	153,5	95,5	58,0	4,3	5,5	4,3	101,7	0,57
4	43	99,0	61,0	38,0	4,5	3,4	4,2	64,3	0,59
4	44	117,0	72,5	44,5	3,2	8,0	3,3	84,5	0,53
4	45	193,0	120,0	73,0	6,5	4,5	4,2	122,9	0,59
4	46	447,5	278,0	169,5	6,8	7,3	6,5	322,7	0,53
4	47	336,0	206,0	130,0	6,5	6,5	5,3	223,9	0,58
4	48	234,0	143,0	91,0	5,0	6,5	5,0	162,5	0,56
4	49	361,0	224,5	136,5	6,8	7,3	5,4	268,1	0,51
4	50	189,5	117,0	72,5	4,8	6,5	4,4	137,3	0,53
4	51	392,5	245,5	147,0	6,3	6,5	5,9	241,6	0,61
4	52	465,5	289,5	176,0	7,5	7,5	6,2	348,8	0,50

Tabela de Resultados do ensaio ultrassom.

	ρ	ν	DISTÂNCIA	LEITURAS			MÉDIA	$v = \frac{d}{t}$	$K = \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu) \times (1 - 2 \times \nu)}$	$E = \frac{v^2 \times \rho}{k}$
	[kg/m ³]		[m]	[μ s]			[μ s]			
Ma	2255	0,42	0,245	375,00	424,40	559,70	453,03	0,54	2,55	0,3
	2255	0,42	0,245	367,60	848,30	540,60	585,50	0,42	2,55	0,2
Mb	2185	0,42	0,245	309,30	998,70	644,80	650,93	0,38	2,55	0,1
	2185	0,42	0,245	589,40	366,70	800,70	585,60	0,42	2,55	0,2
Mc	2184	0,42	0,245	256,10	612,30	462,00	443,47	0,55	2,55	0,3
	2184	0,42	0,245	349,30	396,80	382,70	376,27	0,65	2,55	0,4
Md	2198	0,42	0,245	694,50	515,80	662,50	624,27	0,39	2,55	0,1
	2198	0,42	0,245	765,50	768,00	357,90	630,47	0,39	2,55	0,1

Cálculo do módulo de elasticidade a 1/3 do valor de tensão de rotura, no provete Ma

		Ma	M01	M02	M03	M04
F	[kN]	123,5	39,4	28,2	39,4	39,4
c1	[mm]	249,0	249,0	249,0	249,0	249,0
c2	[mm]	246,0	246,0	246,0	246,0	246,0
A	[mm ²]	61254,0	61254,0	61254,0	61254,0	61254,0
s	[Mpa]	2,0	0,6	0,5	0,6	0,6
d	[mm]		0,3	0,2	0,4	0,2
l	[mm]		200,0	200,0	200,0	200,0
e	[-]		0,0	0,0	0,0	0,0
E	[Mpa]		378,4	383,6	321,6	714,7

Cálculo do módulo de elasticidade a 1/3 do valor de tensão de rotura, no provete Mc.

		Mc	M01	M02	M03	M04
F	[kN]	29,3	7,3	12,2	11,5	
c1	[mm]	248,0	248,0	248,0	248,0	248,0
c2	[mm]	245,0	245,0	245,0	245,0	245,0
A	[mm ²]	60760,0	60760,0	60760,0	60760,0	60760,0
s	[Mpa]	0,5	0,1	0,2	0,2	0,0
d	[mm]		0,1	0,2	0,2	
l	[mm]		200,0	200,0	200,0	200,0
e	[-]		0,0	0,0	0,0	
E	[Mpa]		200,2	178,5	189,3	