



Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

***Caracterização estrutural de alvenarias antigas do  
Centro Histórico de Leiria***

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Civil

**Patrick Pinheiro Rodrigues**

Leiria, Março de 2015





Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

***Caracterização estrutural de alvenarias antigas do  
Centro Histórico de Leiria***

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Civil

**Patrick Pinheiro Rodrigues**

**Orientador:** Paulo Alexandre Lopes Fernandes  
(Professor Coordenador, ESTG-IPL)

**Co-Orientador:** Pedro Miguel Duarte Santos  
(Engenheiro Civil, GRUPO VESAM)

Leiria, Março de 2015



*“Aos meus pais”*



# ***Agradecimentos***

---

A capa da dissertação revela o nome do autor a título individual, mas de uma forma direta ou indireta foram vários os “autores” responsáveis pelo apoio e desenvolvimento de todo o trabalho realizado. O meu profundo agradecimento:

- ao Professor Paulo Fernandes meu Orientador Científico, e ao Professor Pedro Santos meu Co-Orientador, manifesto o meu profundo agradecimento e reconhecimento pela orientação meticulosa, disponibilidade muitas vezes com prejuízo pessoal e pelos conhecimentos teóricos e práticos durante a minha formação académica;

- ao Professor Eduardo Júlio pela imediata disponibilidade demonstrada e por ter sido responsável de um dos temas da dissertação, nomeadamente os ensaios de macacos planos;

- ao Professor Hugo Rodrigues pela sua sincera vontade de ajudar, pelo interesse demonstrado, pela partilha de conhecimento e pelo desbloqueio dos entraves que iam surgindo na realização dos ensaios;

- ao Professor José Sena da Universidade do Minho, pelo empréstimo de equipamento de ensaio, que apesar da distância entre as instituições conseguiu sempre agilizar todo o processo de uma forma simples;

- ao Professor Sérgio Silva do Departamento de Engenharia Eletrotécnica do IPL, por resolver questões relacionadas com equipamento de laboratório, nomeadamente sistemas sensoriais e de aquisição de dados, questões estas fora da minha formação académica;

- aos proprietários dos edifícios do Centro Histórico de Leiria onde foram realizados os ensaios, que colocaram amavelmente as suas propriedades à disposição sem qualquer compromisso;

- à empresa Maxical nomeadamente ao Sr. Abílio Guerra, fico grato pelo fornecimento da cal viva em pó para a construção dos muretes e pelo interesse demonstrado pelo trabalho realizado;

- à empresa *Hilti*, representada pelo Eng<sup>o</sup>. David Pinto fico agradecido pela espontânea vontade de ajudar, pela cedência de material para ensaio e pela ajuda na realização dos ensaios de arranque realizados no Centro Histórico de Leiria;

- à Eng<sup>a</sup>. Vânia, Técnica Superior do Laboratório de Estruturas e Betão do DEC-ESTG, e aos técnicos das equipas de manutenção da DST do IPL pela contínua disponibilidade demonstrada;

- ao gabinete da Câmara Municipal de Leiria responsável pela requalificação do Centro Histórico de Leiria nomeadamente à Arquiteta Vitória Mendes pela simples e sincera vontade de ajudar;

- aos colegas e amigos do Departamento de Engenharia Civil por toda a ajuda prestada quer a nível de trabalho laboratorial, trabalho de campo, troca e discussão de ideias. Um especial agradecimento ao David Caneira, João Baptista, Micael Morgado, Nelson Silva, Pedro Oliveira e Tiago Lopes por terem ajudado a vencer as “batalhas” em laboratório e não só;

- à minha família e a todos os meus amigos pelo apoio e amizade que me foi prestada durante todo o trabalho realizado.

**MUITO OBRIGADO!**

## **Resumo**

---

Apesar das estruturas de alvenaria de pedra se encontrarem praticamente em todo o mundo, o seu estudo e caracterização deve ser feito a nível regional, pois cada região tem a sua própria identidade, materiais e recursos. A escassez de recursos, a necessidade de promover um desenvolvimento mais sustentado e o aumento da consciência das populações sobre estas temáticas, estão na base do aumento da reabilitação de construções e consequentemente da necessidade de melhorar o conhecimento sobre este tipo de estruturas, o que se pode comprovar através do grande número de estudos sobre estas temáticas e do desenvolvimento das técnicas de ensaio e diagnóstico hoje existentes.

A caracterização estrutural dos edifícios a reabilitar, em particular dos edifícios históricos é essencial para poder executar um correto diagnóstico e suportar uma posterior intervenção/reabilitação caso haja necessidade. Este trabalho de investigação procurou contribuir para a caracterização estrutural das diferentes tipologias de alvenarias que se encontram no Centro Histórico de Leiria, de modo a disponibilizar elementos que suportem as intervenções em curso e planeadas para este edificado. Para a sua concretização, foi definido um programa experimental constituído pela realização de ensaios *in-situ* de caracterização mecânica, através de uma campanha de ensaios com macacos planos no edificado do Centro Histórico de Leiria. Os principais parâmetros avaliados foram o estado de tensão instalado nas paredes, a deformabilidade, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade.

Este trabalho compreendeu ainda uma componente experimental em laboratório que consistiu na construção de muretes de alvenaria de pedra, adotando as técnicas tradicionais de construção, com o objetivo de reproduzir o tipo de alvenaria (ordinária de pedra) existente no Centro Histórico de Leiria. Os materiais empregues e o método de construção encontram-se descritos no desenvolvimento deste trabalho. Os muretes foram submetidos a uma série de ensaios com o objetivo de obter as suas características mecânicas e caracterizar o seu comportamento estrutural, tais como, ensaios de identificação dinâmica, ensaios com macacos planos e, por fim, ensaios de carga até à rotura por compressão.

Foram também caracterizados mecanicamente os materiais adotados na construção dos muretes, nomeadamente a resistência à compressão e o módulo de elasticidade da pedra e a argamassa constituinte dos muretes.

Palavras-chave: edifícios antigos, alvenaria de pedra, macacos planos, compressão axial, características mecânicas, análise experimental.

## ***Abstract***

---

Stone masonry structures are present worldwide, but the study of such structures should be made at a regional level since each region has its own identity, materials and resources. Nowadays, there is a concern for improving the knowledge of this type of structures, evidenced by the effort and quality of Civil Engineering in Portugal, resulting in a large developing of testing techniques and in the increase of the studied areas in our country.

To provide information about the rehabilitation of buildings, in particular in historic buildings, it is essential to perform a correct diagnosis and subsequent intervention/rehabilitation if necessary. Therefore, this experimental study aims to provide data that can help interventions in the historical built heritage, with its main focus in the built heritage of the Historic Center of Leiria. Under this scope, several *in situ* tests were performed to characterize the mechanical properties and behavior of ancient masonry walls, through a campaign of flat-jack tests in the Historic Center of Leiria. The flat-jack tests aimed to evaluate the mechanical behavior of masonry, through the characterization of the installed stress state in the walls, deformability, compressive strength and Young modulus.

This research study also had an experimental component conducted in laboratory. Stone masonry walls were built adopting traditional construction techniques in order to reproduce the type of masonry buildings that exists in the Historic Center of Leiria. The masonry walls were submitted to several tests in order to obtain the mechanical characteristics and to characterize the structural behavior of this type of masonry, such as dynamic identification tests, flat-jack tests and axial compression tests.

The materials employed in the construction of the masonry walls were also analyzed as well, namely the compressive strength and the Young modulus of the stone and mortar.

Key-Words: ancient buildings, stone masonry, flat-jack, axial compression, mechanical characteristics, experimental analysis.



*Centro Histórico de Leiria está a cair...*



*(Exemplos de edifícios a necessitarem de uma urgente intervenção) [Jornal de Leiria]*



# Índice

---

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE.....</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>XV</b>
<b>ÍNDICE DE QUADROS .....</b>	<b>XIX</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>XXI</b>
<b>LISTA DE ACRÓNIMOS .....</b>	<b>XXIII</b>
<b>CAPÍTULO I. ENQUADRAMENTO, OBJETIVOS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Objetivos da dissertação .....	3
1.3. Estrutura da dissertação .....	4
<b>CAPÍTULO II. EDIFÍCIOS ANTIGOS.....</b>	<b>5</b>
2.1. Caracterização construtiva .....	5
2.2. Alvenaria.....	5
2.3. Paredes principais, paredes resistentes ou paredes-mestras.....	6
2.4. Paredes de alvenaria de pedra .....	7
2.4.1. Caracterização e Tipologias .....	8
2.5. Caracterização mecânica das alvenarias .....	11
<b>CAPÍTULO III. ENSAIOS COM MACACOS PLANOS .....</b>	<b>13</b>
3.1. Generalidades.....	13
3.2. Descrição geral do ensaio .....	14
3.3. Ensaio simples .....	14
3.4. Ensaio Duplo.....	17
3.5. Equipamento necessário .....	19
3.6. Normalização .....	20
3.7. Proposições e condicionantes .....	21
3.8. Coeficiente de correção Km .....	22

<b>CAPÍTULO IV – CARACTERIZAÇÃO DOS EDIFÍCIOS ENSAIADOS NO CENTRO HISTÓRICO DE LEIRIA .....</b>	<b>23</b>
4.1. Introdução .....	23
4.2. Centro Histórico de Leiria .....	23
4.3. Caracterização dos edifícios submetidos a ensaios .....	24
4.3.1. Edifício Largo da Sé .....	26
4.3.2. Edifício D. Afonso Henriques .....	27
4.3.3 Edifício Pero Alvito.....	27
4.3.3.1. Estimativas de tensão instalada.....	28
<b>CAPÍTULO V. CAMPANHA EXPERIMENTAL. ENSAIOS COM MACACOS PLANOS.....</b>	<b>31</b>
5.1. Equipamento empregue nos ensaios <i>in-situ</i> .....	31
5.2. Trabalhos preparatórios .....	32
5.2.1. Remoção da camada de revestimento.....	32
5.2.2. Definição da localização dos alinhamentos .....	33
5.2.3. Aplicação dos varões .....	34
5.3. Ensaio simples .....	35
5.3.1. Estimativa das tensões instaladas .....	37
5.4. Ensaio Duplo .....	39
5.4.1. Estimativa do módulo de elasticidade .....	41
5.5. Parâmetros do ensaio (Ka e Km).....	45
5.5.1. Determinação do parâmetro Ka.....	45
5.5.1.1. Resultados do parâmetro Ka .....	45
5.5.2. Determinação do parâmetro Km.....	46
5.5.2.1. Resultados do parâmetro Km.....	48
5.5.3. Síntese dos valores obtidos ka e km .....	49
5.6. Ensaios de arranque .....	50
5.6.1. Procedimento e execução de ensaio .....	50
<b>CAPÍTULO VI. ANÁLISE EXPERIMENTAL EM LABORATÓRIO .....</b>	<b>53</b>
6.1. Construção dos muretes em laboratório .....	53
6.1.1. Caracterização dos materiais .....	53
6.1.1.1. Características da cal viva em pó (cal virgem) .....	54
6.1.1.2. Características da água.....	54
6.1.1.3. Características da areia de areeiro.....	55
6.1.1.4. Características do calcário do Centro Histórico de Leiria .....	55
6.1.2. Proveniência dos materiais empregues nos muretes.....	55
6.1.2.1. Origem da Pedra e método de obtenção (demolição) .....	55
6.1.2.2. Argamassa de assentamento.....	57

6.1.3. Tecnologia construtiva .....	58
6.1.3.1. Base das paredes .....	63
6.1.3.2. Distribuição das cargas no topo das alvenarias.....	64
6.1.4. Preparação dos muretes para os ensaios .....	65
6.1.4.1. Transporte .....	65
6.1.4.2. Preparação do pórtico .....	65
6.2. Ensaio de identificação dinâmica .....	66
6.3. Ensaio com macacos planos .....	67
6.3.1. Equipamento empregue nos ensaios <i>em Laboratório</i> .....	67
6.3.2. Trabalhos preparatórios .....	68
6.3.2.1. Aplicação da carga estimada no murete.....	68
6.3.2.2. Definição da localização dos alinhamentos .....	69
6.3.2.3. Aplicação dos pontos de referência .....	70
6.3.3. Ensaio simples.....	71
6.3.3.1. Estimativa das tensões instaladas .....	73
6.3.3.2. Estimativa das tensões instaladas por cálculo analítico .....	75
6.3.4. Ensaio duplo .....	76
6.3.5. Estimativa do módulo de elasticidade .....	79
6.3.6. Parâmetros do ensaio ( $K_a$ e $K_m$ ).....	81
6.3.6.1. Determinação do Parâmetro $K_a$ .....	81
6.3.6.2. Parâmetro $K_m$ .....	81
6.3.7. Síntese dos valores obtidos $k_a$ e $k_m$ .....	83
6.4. Ensaio de compressão axial.....	83
6.4.1. Introdução.....	83
6.4.2. Sistema e instrumentação do ensaio de compressão axial.....	84
6.4.2.1. Setup do ensaio .....	84
6.4.2.2. Instrumentação e sistema de aquisição de dados .....	86
6.4.2.3. Programa de ensaio .....	89
6.4.2.4. Preparação final do ensaio .....	90
6.4.2.5. Registo de eventos dos ensaios de compressão .....	91
6.4.2.6. Execução dos ensaios. Descrição do comportamento dos muretes durante o ensaio à compressão axial .....	91
6.5. Caracterização mecânica dos materiais utilizados na construção dos muretes .....	96
6.5.1. Preparação dos carotes .....	96
6.5.1.1. Extração dos provetes cilíndricos .....	96
6.5.1.2. Serração dos carotes cilíndricos e cúbicos.....	97
6.5.1.3. Retificação dos carotes .....	98
6.5.2. Ensaio de caracterização mecânica em carotes de pedra calcária.....	99
6.5.2.1. Ensaio de determinação do módulo de elasticidade .....	99
6.5.2.2. Ensaio de compressão .....	101
6.5.3. Ensaio realizados aos provetes de argamassa de assentamento .....	104

6.5.3.1. Ensaio de flexão e compressão aos provetes da argamassa de construção dos muretes .....	105
<b>CAPÍTULO VII. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....</b>	<b>109</b>
<b>CAPÍTULO VIII. CONCLUSÕES.....</b>	<b>113</b>
8.1 Síntese final .....	113
8.2 Conclusões e considerações finais.....	113
8.3 Desenvolvimentos futuros .....	115
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>117</b>
<b>ANEXO A. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA DE ENSAIO DA TÉCNICA DE MP'S .....</b>	<b>121</b>
<b>ANEXO B. CARACTERIZAÇÃO DOS EDIFÍCIOS. ESTIMATIVAS DE CARGA .....</b>	<b>123</b>
B.1. Ensaio E2 (Edifício A – Pero Alvito) .....	123
B.2. Ensaio E3 (Edifício B – D. Afonso Henriques).....	125
B.3. Estimativa de tensão instalada – Edifício C – Largo da Sé .....	127
<b>ANEXO C. CAMPANHA DE ENSAIOS. ENSAIOS COM MACACOS PLANOS IN-SITU .....</b>	<b>129</b>
C.1. Ensaio Simples.....	129
C.1.1. Ensaio E2 – Edifício Pero Alvito.....	129
C.1.2. Ensaio E3 – Edifício D. Afonso Henriques .....	130
C.1.3. Ensaio E4 – Largo da Sé.....	131
C.2. Ensaio Duplo.....	132
C.2.1. Ensaio E2 – Edifício Pero Alvito.....	132
C.2.2. Ensaio E3 – Edifício D. Afonso Henriques .....	133
C.2.3. Ensaio E4 – Edifício Largo da Sé.....	134
C.3. Parâmetro $K_a$ .....	135
C.3.1. Edifício Pero Alvito – Ensaio E1 .....	135
C.3.2. Edifício Pero Alvito – Ensaio E2.....	135
C.3.3. Edifício D. Afonso Henriques – Ensaio E3 .....	136
C.3.4. Edifício Largo da Sé – Ensaio E4 .....	136
<b>ANEXO D. PEDRA ARMAZENADA EM LABORATÓRIO PARA CONSTRUÇÃO DOS MURETES .....</b>	<b>137</b>
D.1. Pesagem da pedra armazenada em laboratório.....	137
<b>ANEXO E. ENSAIOS DE MACACOS PLANOS EM LABORATÓRIO .....</b>	<b>139</b>
E.1. Ensaio Simples.....	139
E.1.1. Murete 1 – Alçado A.....	139

E.1.2. Murete 2 – Alçado A.....	140
E.1.3. Murete 2 – Alçado B.....	141
E.2. Ensaio duplo.....	143
E.2.1. Murete 1 – Alçado A.....	143
E.2.2. Murete 2 – Alçado A.....	144
E.2.3. Murete 2 – Alçado B.....	144
E.3. Parâmetro $K_a$ .....	145
E.3.1. Murete 1/Alçado A – Ensaio MLI.....	145
E.3.2. Murete 1/Alçado B – Ensaio MLII.....	145
E.3.3. Murete 2/Alçado A – Ensaio MLIII.....	146
E.3.4. Murete 2/Alçado B – Ensaio MLIV.....	146
<b>ANEXO F. ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL – REGISTO DE EVENTOS... 147</b>	
F.1. Registo de eventos do ensaio à compressão axial ECI.....	147
F.2. Registo de eventos do ensaio à compressão axial EC II.....	148
F.3. Descrição do comportamento do murete 2 durante o ensaio à compressão axial ECII.....	148
<b>ANEXO G. ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EM PROVETES DE PEDRA ..... 153</b>	
G.1. Resultados dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade .....	153
<b>ANEXO H. ENSAIOS COMPLEMENTARES SOBRE A ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO..... 155</b>	
H.1. Avaliação da consistência por espalhamento e determinação do teor em ar .....	155



## ***Índice de Figuras***

---

<b>Figura 1</b> – Constituição típica de uma alvenaria de pedra argamassada. ....	7
<b>Figura 2</b> – Classificação das alvenarias de pedra quanto ao tipo de aparelho.....	9
<b>Figura 3</b> – Classificação quanto ao assentamento. ....	10
<b>Figura 4</b> – Tipos de secção transversal.....	10
<b>Figura 5</b> – Representação esquemática do trabalho de investigação experimental .....	12
<b>Figura 6</b> – Exemplo da configuração geométrica de um macaco plano.....	14
<b>Figura 7</b> – Esquema das 3 fases correspondentes ao ensaio simples. ....	15
<b>Figura 8</b> – Fases de ensaio correspondentes ao ensaio duplo.....	18
<b>Figura 9</b> – Localização dos edifícios ensaiados. ....	25
<b>Figura 10</b> – Identificação dos locais de ensaio em planta e respetivos alçados do edifício Largo da Sé.....	26
<b>Figura 11</b> – Identificação em planta e alçados da zona a ensaiar do Edifício D. Afonso Henriques. ....	27
<b>Figura 12</b> – Identificação dos locais de ensaios em planta e alçados do edifício Pero Alvito.....	28
<b>Figura 13</b> – Plantas do edifício Pero Alvito com respetivas áreas de influência. ....	29
<b>Figura 14</b> – Equipamento empregue nos ensaios de macacos planos no C.H.L. ....	32
<b>Figura 15</b> – Remoção da camada de revestimento. ....	33
<b>Figura 16</b> – Identificação e marcação dos rasgos e alinhamentos.....	33
<b>Figura 17</b> – Aplicação dos varões de suporte aos sensores para ensaio simples e duplo...	34
<b>Figura 18</b> – Potenciómetro utilizado no ensaio simples. ....	35
<b>Figura 19</b> – Protocolo esquemático dos ensaios simples ....	36
<b>Figura 20</b> – Perspetiva geral da utilização da técnica de macacos planos - ensaio simples. .....	37
<b>Figura 21</b> – Potenciómetro com extensão utilizado para o ensaio duplo. ....	39
<b>Figura 22</b> – Protocolo esquemático dos ensaios simples. ....	40
<b>Figura 23</b> – Perspetiva geral da utilização da técnica de macacos planos - ensaio duplo..	41
<b>Figura 24</b> – Esquema de cálculo dos diferentes módulos de elasticidade.....	43
<b>Figura 25</b> – Conjuntos papel-químico utilizados nos ensaios in-situ. ....	45
<b>Figura 26</b> – Determinação das áreas de contato relativo ao ensaio simples E1. ....	45
<b>Figura 27</b> – Sistema de simulação de carga num teste real . ....	46
<b>Figura 28</b> – Sistema de calibração desenvolvido no LEBA. ....	47
<b>Figura 29</b> – Preparação dos ensaios de arranque.....	51
<b>Figura 30</b> – Ensaios de arranque. ....	51
<b>Figura 31</b> – Processo de calcinação.....	54
<b>Figura 32</b> – Curva granulométrica.....	55

<b>Figura 33</b> – Identificação de uma das paredes demolidas.....	56
<b>Figura 34</b> – Primeira fase de demolição da parede. ....	56
<b>Figura 35</b> – Segunda fase de demolição da parede. ....	57
<b>Figura 36</b> – Processo de hidratação da cal .....	58
<b>Figura 37</b> – Dimensões adotadas para os muretes construídos .....	59
<b>Figura 38</b> – Primeira fase de construção. ....	60
<b>Figura 39</b> – Identificação das zonas e respetivas distâncias onde foram colocados os perpianhos. ....	61
<b>Figura 40</b> – Colocação dos perpianhos: a) alçado frontal; b) seção transversal. ....	61
<b>Figura 41</b> – Segunda fase de construção. ....	62
<b>Figura 42</b> – Fase final de construção.....	62
<b>Figura 43</b> – Últimos preparos realizados sobre os muretes.....	63
<b>Figura 44</b> – Preparação da base das paredes. ....	63
<b>Figura 45</b> – Execução das cofragens dos lintéis.....	64
<b>Figura 46</b> – Execução do lintel.....	64
<b>Figura 47</b> – Sistema de transporte dos muretes.....	65
<b>Figura 48</b> – Movimentação do pórtico e murete .....	65
<b>Figura 49</b> – Leitura com sismógrafo de acelerações .....	66
<b>Figura 50</b> – Equipamento empregue nos ensaios de macacos planos em laboratório. ....	68
<b>Figura 51</b> – Sistema de aplicação da carga estimada .....	69
<b>Figura 52</b> – Marcação dos alinhamentos e rasgos.....	70
<b>Figura 53</b> – Distâncias definidas para as miras de referência para o ensaio MLI.....	71
<b>Figura 54</b> – Protocolo utilizado no ensaio simples em laboratório.....	73
<b>Figura 55</b> – Sistema de suporte e batente para leituras com defletómetros .....	76
<b>Figura 56</b> – Instrumentação utilizada para o ensaio duplo.....	77
<b>Figura 57</b> – Metodologia adotada ensaio duplo em laboratório.....	78
<b>Figura 58</b> – Perspetiva geral da utilização da técnica de macacos planos - ensaio duplo..	78
<b>Figura 59</b> – Preenchimento dos rasgos com argamassa. ....	79
<b>Figura 60</b> – Vista geral do método e equipamento para determinação do parâmetro Km para os macacos MPSO1 e MPSO2.....	81
<b>Figura 61</b> – Aspeto do murete 1 (Alçado A) antes do ensaio de compressão axial I.....	84
<b>Figura 62</b> – Sistema de ensaio de compressão axial. ....	85
<b>Figura 63</b> – Sistema de segurança utilizado no ensaio de compressão axial. ....	86
<b>Figura 64</b> – Equipamento de monitorização das cargas aplicadas sobre os muretes.....	86
<b>Figura 65</b> – Grupo e cilindro hidráulico (atuador). ....	87
<b>Figura 66</b> – Sistema de aquisição, registo e controlo dos ensaios. ....	88
<b>Figura 67</b> – Representação esquemática do sistema de aquisição de dados, controlo e instrumentação dos ensaios de compressão axial .....	88
<b>Figura 68</b> – Critérios adoptados para a aplicação de carga. ....	90
<b>Figura 69</b> – Preparação final do ensaio à compressão axial.....	90
<b>Figura 70</b> – Ilustração do posicionamento do equipamento de registo de eventos. ....	91
<b>Figura 71</b> – Diagrama história de carga do ensaio de compressão axial do murete 1. ....	92

<b>Figura 72</b> – Comportamento do murete 1 (alçado A) em vários instantes do ensaio de compressão axial .....	93
<b>Figura 73</b> – Diagrama força-deslocamento ensaio compressão axial. ....	94
<b>Figura 74</b> - Diagrama tensão/extensão para determinação do módulo de elasticidade. ....	95
<b>Figura 75</b> – Murete após ensaio.....	95
<b>Figura 76</b> – Processo de carotagem .....	97
<b>Figura 77</b> – Medição dos carotes.....	97
<b>Figura 78</b> – Serração dos carotes.....	98
<b>Figura 79</b> – Retificação dos carotes.....	99
<b>Figura 80</b> – Total de carotes retificados. ....	99
<b>Figura 81</b> – Sistema de ensaio utilizado para a determinação do módulo de elasticidade. ....	100
<b>Figura 82</b> – Resultado obtido na determinação módulo de elasticidade carote nº6. ....	100
<b>Figura 83</b> – Lotes de carotes a realizar o ensaio à compressão.....	101
<b>Figura 84</b> – Ensaio de compressão em carotes de pedra .....	102
<b>Figura 85</b> – Aspecto dos carotes de pedra submetidos aos ensaios de compressão.....	104
<b>Figura 86</b> – Provetes de argamassa de assentamento .....	104
<b>Figura 87</b> – Máquina universal de ensaios de flexão e compressão.....	105
<b>Figura 88</b> – Ensaio de resistência à flexão .....	105
<b>Figura 89</b> – Ensaio de resistência à compressão .....	107
<b>Figura 90</b> – Comparação dos valores obtidos na investigação .....	110
<b>Figura 91</b> – Diagramas comparativos dos ensaios de compressão axial.....	110
<b>Figura 92</b> – Modelação numérica de um dos edifícios ensaiados – Edifício D. Afonso Henriques. ....	115

## **ANEXOS**

### **ANEXO A**

<b>Figura A.1</b> – Representação esquemática do sistema de ensaio de macacos planos.....	121
---	-----

### **ANEXO B**

<b>Figura B.1</b> – Plantas do Edifício Pero Alvito com respetivas áreas de influência – Ensaio E2. ....	123
<b>Figura B.2</b> – Plantas do Edifício D. Afonso Henriques com respetivas áreas de influência.....	125
<b>Figura B.3</b> – Plantas do Edifício Largo da Sé com respetivas áreas de influência. ....	127

### **ANEXO F**

<b>Figura F.1</b> – Diagrama história de carga do ensaio de compressão axial do murete II...	149
<b>Figura F.2</b> – Comportamento do murete 2 (alçado A) em vários instantes do ensaio de compressão axial II .....	150
<b>Figura F.3</b> – Diagrama força-deslocamento ensaio compressão axial. ....	151
<b>Figura F.4</b> – Diagrama tensão/extensão para determinação do módulo de elasticidade..	152

**ANEXO G**

**Figura G.1** – Análise e resultados da determinação do módulo de elasticidade da pedra para os carotes nº 2,3,4,5..... 154

**ANEXO H**

**Figura H.1**- Equipamento utilizado para os ensaios de caracterização da argamassa de assentamento. .... 156

## Índice de Quadros

---

<b>Quadro 1</b> – Localização, número e tipo de ensaios realizados no C.H.L.....	25
<b>Quadro 2</b> – Valores considerados para a estimativa de cargas do edifício A. ....	29
<b>Quadro 3</b> – Resumo das tensões estimadas por cálculo. ....	30
<b>Quadro 4</b> – Identificação dos diversos parâmetros de ensaio. ....	37
<b>Quadro 5</b> – Síntese dos resultados obtidos no ensaio simples E1. ....	38
<b>Quadro 6</b> – Quantificação da variação dos resultados pelos diferentes métodos.....	39
<b>Quadro 7</b> – Valores obtidos no ensaio duplo correspondente ao ensaio E1. ....	42
<b>Quadro 8</b> – Valores dos diversos módulos de elasticidade obtidos nos ensaios.....	43
<b>Quadro 9</b> – Valores de tensão obtidos nos diversos ensaios in-situ.....	44
<b>Quadro 10</b> – Critérios normativos para a tensão de rotura e módulo de elasticidade. ....	44
<b>Quadro 11</b> – Valores de $K_a$ obtidos na campanha experimental in-situ. ....	46
<b>Quadro 12</b> – Calibração macaco plano MPSO3 com transdutor de pressão.....	48
<b>Quadro 13</b> – Valores obtidos no processo de calibração dos macacos planos utilizados <i>in-situ</i> . ....	49
<b>Quadro 14</b> – Síntese dos valores para $K_a$ e $K_m$ correspondentes aos ensaios <i>in-situ</i> .....	49
<b>Quadro 15</b> – Valores obtidos dos ensaios de arranque em alvenaria de pedra do CHL. ...	52
<b>Quadro 16</b> – Referências e síntese dos ensaios realizados sobre os muretes. ....	53
<b>Quadro 17</b> – Análise química quantitativa. ....	54
<b>Quadro 18</b> – Análise granulométrica e reatividade .....	54
<b>Quadro 19</b> – Síntese dos resultados obtidos no ensaio simples MLII.....	74
<b>Quadro 20</b> – Número de ensaios realizados e tipo de macaco utilizado. ....	75
<b>Quadro 21</b> – Cargas consideradas para a estimativa de tensões instaladas.....	75
<b>Quadro 22</b> – Quantificação da variação dos resultados pelos diferentes métodos.....	76
<b>Quadro 23</b> – Valores obtidos correspondentes ao ensaio duplo MLII. ....	79
<b>Quadro 24</b> – Valores dos diversos módulos de elasticidade obtidos nos ensaios em laboratório. ....	80
<b>Quadro 25</b> – Valores de tensão obtidos nos diversos ensaios em laboratório.....	80
<b>Quadro 26</b> – Síntese dos valores de $K_a$ obtidos para os ensaios em laboratório. ....	81
<b>Quadro 27</b> – Calibração macaco plano MPSO1. ....	82
<b>Quadro 28</b> – Síntese dos diversos valores obtidos no processo de calibração.....	83

### ANEXOS

#### ANEXO B

<b>Quadro B.1</b> – Valores considerados para a estimativa de cargas do edifício A.....	123
---	-----

## **ANEXO C**

<b>Quadro C.1</b> – Síntese dos resultados obtidos no ensaio simples E2.....	129
<b>Quadro C.2</b> – Síntese dos resultados obtidos no ensaio simples E3.....	130
<b>Quadro C.3</b> – Síntese dos resultados obtidos no ensaio simples E4.....	131
<b>Quadro C.4</b> – Síntese dos resultados obtidos no ensaio duplo E2.....	132
<b>Quadro C.5</b> – Síntese dos resultados obtidos no ensaio duplo E3.....	133
<b>Quadro C.6</b> – Síntese dos resultados obtidos no ensaio duplo E4.....	134
<b>Quadro C.7</b> – Áreas de contato Ensaio E1 – Pero Alvito.....	135
<b>Quadro C.8</b> – Áreas de contato Ensaio E2 – Pero Alvito.....	135
<b>Quadro C.9</b> – Áreas de contato Ensaio E3 – D. Afonso Henriques .....	136
<b>Quadro C.10</b> – Áreas de contato Ensaio E4 – Largo da Sé. ....	136

## **ANEXO D**

<b>Quadro D.1</b> – Pesagem da pedra empregue na construção das alvenarias. ....	137
--	-----

## **ANEXO E**

<b>Quadro E.1</b> – Síntese dos resultados obtidos no ensaio simples MLI.....	139
<b>Quadro E.2</b> – Síntese dos resultados obtidos no ensaio simples MLIII.....	140
<b>Quadro E.3</b> – Síntese dos resultados obtidos no ensaio simples MLIV.....	141
<b>Quadro E.4</b> – Valores obtidos correspondentes ao ensaio duplo MLI.....	143
<b>Quadro E.5</b> – Valores obtidos correspondentes ao ensaio duplo MLIII.....	144
<b>Quadro E.6</b> – Valores obtidos correspondentes ao ensaio duplo MLIV.....	144
<b>Quadro E.7</b> – Áreas de contato Ensaio MLI – Murete 1/Alçado A.....	145
<b>Quadro E.8</b> – Áreas de contato Ensaio MLII – Murete 1/Alçado B.....	145
<b>Quadro E.9</b> – Áreas de contato Ensaio MLIII – Murete 2/Alçado A.....	146
<b>Quadro E.10</b> – Áreas de contato Ensaio MLIV – Murete 2/Alçado B.....	146

## **ANEXO F**

<b>Quadro F.1</b> – Registo de eventos do ensaio à compressão axial – EC1.....	147
<b>Quadro F.2</b> – Registo de eventos do ensaio à compressão axial – EC2.....	148

## ***Lista de Símbolos***

---

$\sigma$	tensão normal instalada
E	módulo de elasticidade
G	módulo de distorção
$f_k$	valor de cálculo da resistência à compressão da alvenaria
$\nu$	coeficiente de Poisson
$\sigma_m$	tensão média corrigida
$K_m$	coeficiente que traduz a rigidez do macaco e o atrito do sistema hidráulico
$K_a$	coeficiente que reflete a razão entre a área do macaco e a área de corte
P	pressão responsável pela pressurização do fluido no interior dos macacos
$A_m$	área do macaco plano
$D_i$	distância vertical no provete a ensaiar entre os macacos planos
d	distância vertical provete a ensaiar após abertura do rasgo
$p_f$	pressão final lida no manómetro da bomba hidráulica
A	comprimento do macaco plano
B	profundidade do macaco
$\epsilon$	extensão média instalada
$L_i$	distância inicial entre os pontos de referência
$L_f$	distância final entre os pontos de referência
$\sigma_i$	tensão instalada
CaO	óxido de cálcio
MgO	óxido de magnésio
SO <sub>3</sub>	trióxido de enxofre
CO <sub>2</sub>	dióxido de carbono
$\omega$	frequência do murete
L	altura do murete
I	momento de inércia da secção transversal
$E_0$	módulo de elasticidade inicial
$E_{\text{sec}30\%}$	módulo de elasticidade secante, para o valor de 30% da tensão de rotura
$E_{\text{sec}30-60\%}$	módulo de elasticidade secante, entre 30 e 60% da tensão de rotura
$E_{\text{secrotura}}$	módulo de elasticidade secante de rotura

$\sigma_{\text{máx.}}$       tensão máxima atingida nos ensaio duplos de macacos planos

## ***Lista de Acrónimos***

---

LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
ASTM	American Society for Testing and Materials
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux
LEBA	Laboratório de Estruturas e Betão Armado
IPL	Instituto Politécnico de Leiria
LVDT	Linear Variable Differential Transducer
CHL	Centro Histórico de Leiria
E1,E2,E3,E4	Ensaio n° 1, 2, 3 e 4
Cam.	Vista dos ensaios <i>in-situ</i>
MPSO	Macaco plano semioval
A1,A2,A3,A4	Alinhamentos verticais n°1,2,3 e 4
MP	Macaco Plano
CP	Computador pessoal
CH	Cilindro hidráulico
D1 e D2	Defletómetros 1,2
DL	Portable data logger
GH	Grupo hidráulico
IL	Interface de ligação
M	Murete
ML	Murete laboratório
PP	Peso próprio
EC	Ensaio compressão
LAB	Laboratório
EID	Ensaio de identificação dinâmica



# ***Capítulo I. Enquadramento, objetivos e estrutura da dissertação***

---

## **1.1. Enquadramento**

As primeiras habitações permanentes em alvenaria de pedra foram descobertas no lago Hullen em Israel e datam de 9000 a 8000 a. C. Outras descobertas, reveladas em vestígios provenientes de escavações de Aĭn Mallaha na Anatólia e em Tell Mureybet na Síria – Palestina, sugeriam casas de estrutura circular com diâmetros entre os 6 m e os 10 m, semicirculares, enterradas com uma profundidade de 0,70 m. Nas paredes encontravam-se buracos para troncos, indicando a provável existência de madeira na estrutura superior, sendo mais tarde substituída por muros de pedra ligada por argamassa [1].

As estruturas de alvenaria antiga estão presentes por todo o Mundo, em Centros Históricos e urbanos, cujo valor patrimonial, cultural e arquitetónico que exibem, acentuam uma preocupação na sua conservação e manutenção.

Nos últimos tempos, a preservação das paredes exteriores dos edifícios antigos, podem considerar-se no limiar mínimo da conservação do património arquitetónico não monumental [2]. Este facto é compreensível devido às naturais dificuldades de reparação dos edifícios antigos, em parte inerentes ao diminuto domínio que se possui sobre as técnicas de intervenção/reabilitação e os materiais envolvidos.

No que diz respeito a construções históricas, a qualificação de técnicos, em conjunto com a sensibilização e vontade política para a preservação e conservação do património arquitetónico, devem contribuir para um maior desenvolvimento nesta área.

A alvenaria de pedra já foi alvo de diversos estudos por diferentes entidades, salientando-se a investigadora Luigia Binda do Instituto Politécnico de Milão, responsável pelo conhecimento e desenvolvimento das técnicas de ensaio, nomeadamente de algumas das usadas neste trabalho.

Segundo Binda [3], em alguns países europeus os engenheiros e arquitetos, já possuem a sensibilidade de relacionar o uso dos edifícios históricos com a preservação das suas características e estrutura inicial [4].

Nos últimos anos em Portugal devido a diversos fatores como os económicos, políticos ou mesmo de consciencialização, acentuou-se a preocupação na preservação do património histórico. Na maioria dos Centros Históricos nacionais, o “esquecimento” de que este edificado foi objeto, teve como consequência, na maioria dos casos, que processos naturais de conservação tivessem de ser substituídos por obras de reabilitação profundas.

A análise do comportamento estrutural e eventuais intervenções/reabilitações em construções existentes, necessitam, na maioria dos casos, de uma cuidada e prévia inspeção do local, que para sustentar um correto diagnóstico do real estado da estrutura deve ser complementada com a realização de ensaios *in-situ* e laboratoriais.

A avaliação da segurança do edifício deve ser realizada com base em aspetos qualitativos (documentação, observação, etc.) e quantitativos (experimentais, matemáticos e documentação técnica, etc.) tendo em atenção o seu comportamento estrutural, pois qualquer avaliação é afetada pela incerteza dos dados (ações, resistência, deformações, etc.) [5].

Appleton [6] refere que em Portugal, não existe qualquer regulamentação específica para alvenarias, o que dificulta a intervenção nos edifícios antigos, quer seja para ações de conservação, reparação ou reabilitação [7].

Em relação às construções históricas, a complexidade das suas estruturas, em particular no que se refere à diversidade e heterogeneidade dos elementos estruturais e materiais constituintes, induz na maioria dos casos a dificuldades suplementares para a compreensão do real funcionamento da estrutura e das condições em que a mesma se encontra. Desta forma é importante dispor de um conjunto sistematizado de procedimentos, que permitam realizar uma inspeção detalhada da estrutura, idealmente organizado sob a forma de um guião, que permita, não só o diagnóstico estrutural do caso em estudo, como também a constituição de uma base de dados sobre diversos parâmetros como patologias, características mecânicas, entre outros.

## 1.2. Objetivos da dissertação

Embora existam já alguns trabalhos desenvolvidos acerca do edificado do Centro Histórico de Leiria, não há registo de qualquer atividade relacionada com a caracterização mecânica das alvenarias antigas presentes nas construções históricas de Leiria. Assim, o presente trabalho pretende contribuir para aumentar o conhecimento nesses domínios, nomeadamente propondo uma sistematização de procedimentos de inspeção e técnicas de ensaio adequadas à caracterização do real estado de construções antigas ao diagnóstico do comportamento estrutural.

O trabalho de investigação foi focado em dois objetivos principais:

- Realizar uma campanha de ensaios *in-situ* em diversas construções, devidamente caracterizadas, do Centro Histórico de Leiria, através de ensaios com macacos planos, visando obter valores padrão para as características mecânicas, nomeadamente resistência à compressão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.
- Análise experimental em laboratório de uma alvenaria de pedra representativa das alvenarias presentes no Centro Histórico de Leiria, através da construção de dois muretes, construídos com materiais recolhidos num dos edifícios estudados e utilizando as técnicas e métodos construtivos identificados aquando da demolição das alvenarias para obtenção da pedra. Estes provetes foram submetidos a vários ensaios, nomeadamente ensaios de caracterização da sua resposta a excitações dinâmicas, ensaios com macacos planos e ensaios de compressão axial, visando a obtenção de parâmetros caracterizadores do seu comportamento mecânico como, resistência à compressão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. No âmbito desta campanha efetuou-se a caracterização mecânica dos materiais empregues na construção dos muretes, nomeadamente da pedra e argamassa utilizados, através da extração e ensaio de carotes.

O escopo final deste trabalho pode sintetizar-se na caracterização mecânica das alvenarias antigas presentes no Centro Histórico de Leiria através de ensaios, visando a obtenção dos principais parâmetros necessários para suportar futuros projetos de intervenção nesse edificado.

### 1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação está estruturada em 6 capítulos incluindo o presente capítulo (**Capítulo I**) onde é apresentado o enquadramento, a justificação da escolha do estudo, os objetivos definidos e a sua estruturação fundamentada. Assim, o documento está estruturado da seguinte forma:

No **Capítulo II** apresentam-se aspetos gerais inerentes às alvenarias de pedra de edifícios antigos, nomeadamente a sua caracterização construtiva (tipologias e métodos construtivos) e materiais constituintes. Também é abordado de forma esquemática a organização da investigação experimental.

No **Capítulo III** é abordado exclusivamente o ensaio com maior incidência nesta dissertação, o flat-jack testing, sendo denominado em todo o documento como ensaio com macacos planos. Apresenta-se a descrição e procedimento das duas etapas de ensaio, ensaio simples e ensaio duplo, assim como o equipamento, normalização, proposições e condicionantes a ter em conta em todo o ensaio.

No **Capítulo IV** descrevem-se os edifícios alvo de ensaio, localizados no Centro Histórico de Leiria, como o critério adotado para a estimativa de cargas por cálculo analítico.

No **Capítulo V** aborda-se a campanha experimental realizada no Centro Histórico de Leiria, utilizando a técnica de ensaio com macacos planos. É descrito de forma pormenorizada todo o procedimento tomado para a realização dos ensaios assim como os resultados obtidos nos mesmos. Ainda neste capítulo é evidenciado todo o processo e resultados correspondentes aos ensaios de arranque.

O **Capítulo VI** é o mais vasto, e aquele que envolveu maiores recursos. Neste capítulo descreve-se todo o trabalho experimental realizado em laboratório, começando pela construção dos dois muretes de alvenaria de pedra argamassada, os trabalhos preparatórios e o sistema de ensaio. Depois são apresentados de forma detalhada todos os ensaios e resultados, nomeadamente, ensaios dinâmicos, ensaios com macacos planos, ensaios de compressão axial e ensaios e caracterização mecânica dos materiais empregues nos muretes.

No **Capítulo VII** sintetiza-se o trabalho realizado, compara-se valores de ensaio, retirando as respetivas conclusões, apresentadas no **Capítulo VIII**.

## **Capítulo II. Edifícios Antigos**

---

### **2.1. Caracterização construtiva**

Este trabalho é referente a edifícios antigos ou seja a edifícios que no mínimo terão cerca de 50 anos de idade e que ainda mantêm em grande parte as suas características de origem. Assim, estes edifícios qualquer que seja a sua idade, já tem cumprida o período de funcionamento para que foram construídos, admitindo que o tempo médio esperado para a vida de um edifício será de 50 anos. Ao longo dos séculos constata-se que permanecem padrões comuns na construção de edifícios, padrões estes focados no uso de pequeno número de materiais dominantes, naturais e pouco transformados, sendo estes importantes para poder compreender de forma clara, o que é, e como se comporta a generalidade desses edifícios antigos.

As paredes principais ou paredes-mestras dos edifícios antigos não sofreram mudanças significativas ao longo dos séculos a nível construtivo, salientando-se a redução da espessura das paredes de alvenaria com o passar dos tempos. Isto deveu-se sobretudo ao progresso técnico e científico, que permitiu um melhorado domínio das ciências dos materiais e da resistência dos materiais. Do ponto de vista não técnico procurou-se reduzir o custo de construção e ganhar área útil, aligeirando as construções e reduzindo as quantidades de materiais aplicados.

### **2.2. Alvenaria**

A origem da palavra alvenaria deriva do árabe e significa o trabalho feito pelo pedreiro (al-banná). Desde a antiguidade tem sido muito utilizada para a construção de habitações, monumentos, templos religiosos e muros [8].

As paredes de alvenaria são um sistema construtivo, constituído pela associação de elementos resistentes de várias dimensões, como tijolos, blocos, pedras, etc., sobrepostas em repetidas fiadas horizontais ou em camadas parecidas, de maneira a formar maciços rígidos e coesos, unidos entre si geralmente por argamassa para o seu assentamento.

A argamassa é utilizada como o material ligante e é substituída em algumas situações por terra, argila ou substâncias orgânicas.

Esta associação de materiais dá origem a um material heterogéneo, apresentando cavidades ou vazios interiores com ligação fraca entre os elementos, que apresentam uma relativa boa resistência à compressão e uma fraca resistência à tração [2].

As paredes dos edifícios antigos são caracterizadas como elementos construtivos cujo comprimento e altura são bastante superiores à sua espessura. Podem ser classificados segundo dois tipos, paredes resistentes ou mestras (em grande parte exteriores) e paredes divisórias (interiores), que em algumas situações também têm função resistente [5].

Estes elementos construtivos na maioria dos casos eram construídos com materiais existentes na região, em que cada região possuía materiais característicos, mas mantendo as mesmas técnicas de construção [9]. Os elementos estruturais mais comuns nas construções antigas são as paredes de alvenaria de pedra e de tijolo.

### **2.3. Paredes principais, paredes resistentes ou paredes-mestras**

As paredes principais, paredes resistentes ou paredes-mestras, são elementos estruturais que assumem importância na estrutura do edifício, têm geralmente uma espessura elevada (de 0,5 m a 1,5 m) e são constituídos por materiais heterogéneos, dos quais resultam elementos pesados e rígidos apresentando muito pouca resistência à tração [6].

A maior deformabilidade e porosidade por parte dos materiais daquela época são outras características inerentes aos materiais, sendo a capacidade resistente e de proteção assegurada particularmente pela espessura. A denominação paredes resistentes é feita devido à função resistente e também a função de proteção contra os agentes climáticos e às ações externas em geral que estas demonstram.

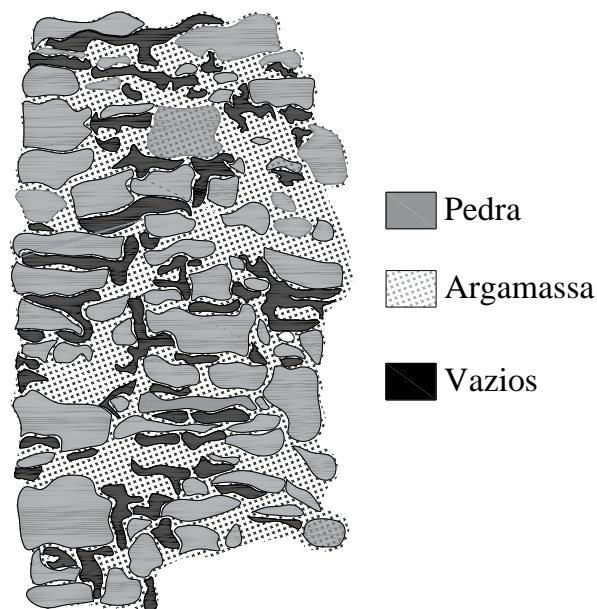
As paredes exteriores, para poderem cumprir a função resistente e a proteção à água, têm de possuir elevadas espessuras com várias camadas de proteção, e os vários constituintes apresentarem uma conjugação de características distintas mas compatíveis e com funções complementares.

A nível estrutural o comportamento destes elementos diz respeito à resistência a cargas verticais (devido à gravidade) e a forças horizontais como as dos sismos, vento, reações de outros elementos estruturais (arcos e abóbadas), impulsos de terras, choques acidentais, entre outros [9].

A elevada espessura deste tipo de paredes, surge devido a razões de natureza mecânica e estrutural, justificando a espessura, de modo a que a parede apresente uma constituição mais resistente aos esforços a que é solicitada. A grande espessura torna a parede mais pesada, funcionando a compressão resultante como força estabilizadora equilibrando as forças horizontais. Sendo maior a largura, significa menor esbelteza da parede, logo menor é o risco de instabilidade devido a fenómenos de encurvadura [9].

## 2.4. Paredes de alvenaria de pedra

A alvenaria de pedra é um tipo de alvenaria peculiar, pois a construção e constituição dependem do local de construção, dos costumes e da época. Os materiais empregues neste tipo de construção diferenciam-se pela sua falta de homogeneidade e regularidade geométrica, resultado da disponibilidade e diversificação das suas características (Figura 1).



---

*Figura 1 – Constituição típica de uma alvenaria de pedra argamassada.*

Os tipos de pedra (magmáticas, metamórficas ou sedimentares) utilizados diferem consoante a localização.

A argamassa tem como função principal, preencher os espaços vazios entre as pedras de modo a proporcionar o seu assentamento.

A quantidade de vazios presentes neste tipo de alvenaria dependem da forma de construção, muitas vezes influenciada pela irregularidade geométrica das pedras que a constituem.

### 2.4.1. Caracterização e Tipologias

As pedras utilizadas nesta técnica construtiva podem ser de diversa natureza, forma e dimensão, regulares e/ou irregulares e podem apresentar-se ligados com terra, argila e argamassa que raramente envolve completamente as pedras.

Para as paredes-mestras, paredes com funções estruturais, é importante uma classificação tipológica quanto às características construtivas. Esta classificação em alvenarias de pedra é baseada em quatro parâmetros de base [2, 10]:

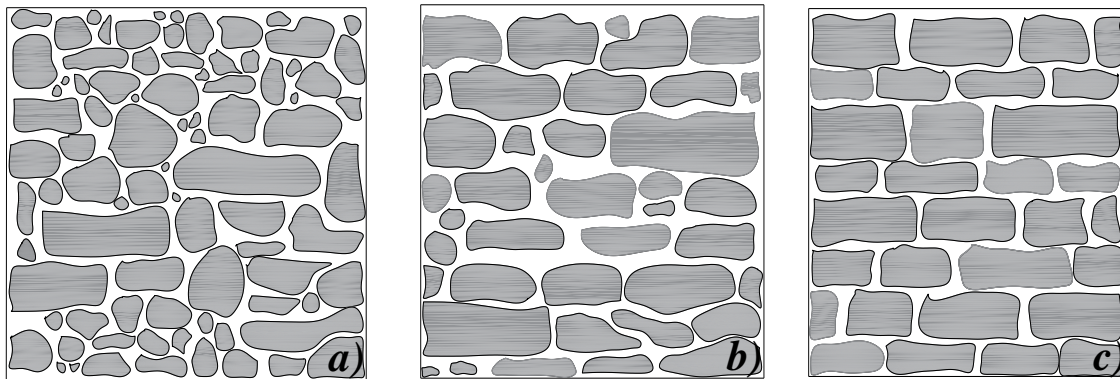
- tipo de pedras usadas - a natureza ou origem, as dimensões, a forma das pedras utilizadas (trabalhados ou não trabalhados), a cor e o estado de conservação;
- secção das pedras, referente à tipologia construtiva - o número de paramentos e respetiva espessura, o grau de sobreposição (ou embricamento) entre paramentos, a presença de pedras transversais que façam a ligação entre os paramentos, ou de cunhas ou calços de assentamento, a dimensão e distribuição de vazios, a percentagem de combinações dos componentes (pedra, argamassa e vazios);
- o assentamento - relativo à textura e regularidade das superfícies de assentamento (regular, irregular, desbastada, etc.) e sua disposição, com destaque para a presença de calços ou cunhas (realizadas com pedras de menores dimensões-seixos de assentamento);
- argamassa de ligação das pedras - utilizada como elemento de ligação entre as pedras (não se considera o reboco ou a argamassa utilizada na correção das juntas), identificando principalmente a sua consistência e, secundariamente, o desempenho, a espessura das juntas, a cor, o diâmetro, a forma e a cor dos agregados.

Os parâmetros em análise estão relacionados, podendo fornecer de uma forma direta ou indireta, informação sobre a resistência da alvenaria e também sobre o comportamento mecânico das suas paredes [8]:

- a forma das pedras tem influência na técnica construtiva utilizada, tal como, o tipo de acabamento ou aparelho (regularidade das fiadas ou camadas) a regularidade das juntas de argamassa e sua espessura, o uso de calços, etc.;
- da qualidade do assentamento dependendo este do aparelho das superfícies de assentamento, pode inferir-se sobre o seu comportamento mecânico e vulnerabilidade aos mecanismos de instabilização;
- a presença de pedras transversais aos paramentos (“perpianhos” ou “travadouros”), informa sobre o grau de ligação entre paramentos e, evidencia, a sua potencial apetência para fenómenos de desagregação;
- da presença, distribuição e dimensão dos vazios, pode retirar-se informação sobre a qualidade de construção, o estado de degradação e sobre as possibilidades de intervenção.

As paredes de alvenaria de pedra podem ser classificadas quanto ao tipo de aparelho como [8, 11] (Figura 2):

- de juntas desalinhadas (Figura 2a);
- de juntas irregulares alinhadas (Figura 2b);
- de juntas regulares alinhadas (Figura 2c).

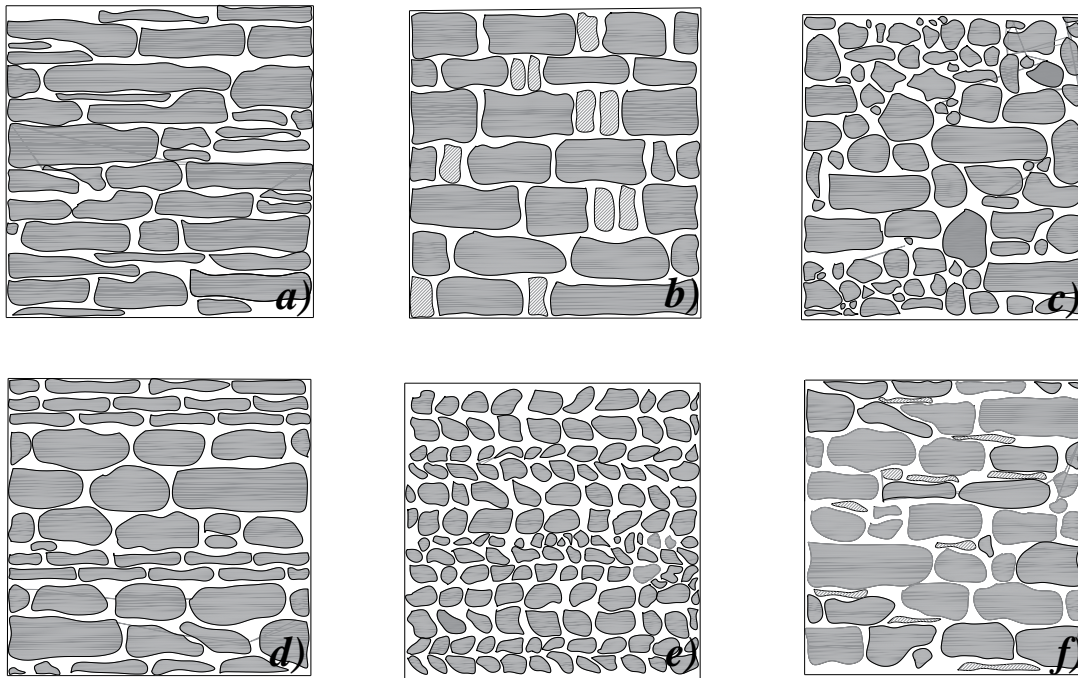


**Figura 2** – Classificação das alvenarias de pedra quanto ao tipo de aparelho (adapt. [11]):  
a) juntas desalinhadas; b) juntas irregulares alinhadas; c) juntas regulares alinhadas.

Quanto ao assentamento, o método varia, dependendo dos conhecimentos e experiência dos operadores em que cada região, por norma era usado um método característico. Assim as paredes de alvenaria podem ter diferentes tipos de assentamento:

- horizontal (Figura 3a);
- horizontal/vertical (Figura 3b);
- aleatório (Figura 3c);

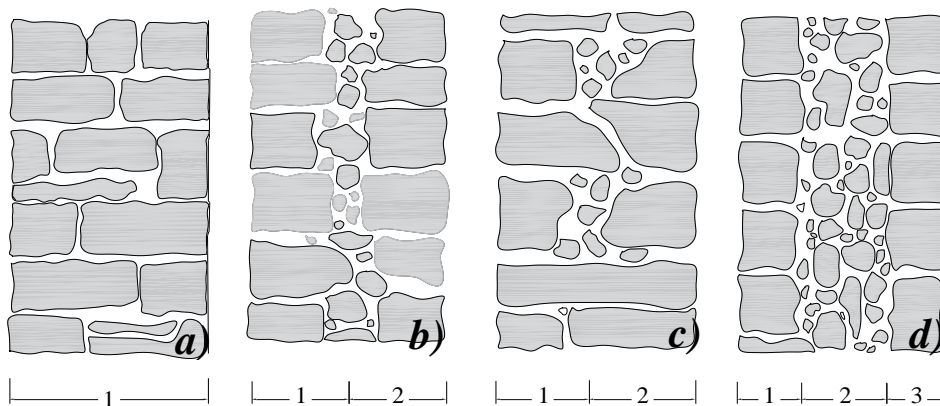
- escalonada com fiadas de regularização (Figura 3d);
- em espinha de peixe (Figura 3e);
- com calços ou cunhas (Figura 3f).



**Figura 3** – Classificação quanto ao assentamento (adapt.[11]).

As paredes de alvenaria também são classificadas segundo a sua secção/paramento [4, 11, 12] (Figura 4):

- de pano simples (Figura 4a);
- de dois panos sem ligação (Figura 4b);
- de dois panos com ligação (Figura 4c);
- de três panos (2 panos separados por 1 núcleo de fraca qualidade) (Figura 4d).



**Figura 4** – Tipos de secção transversal: a) pano simples (1); b) dois blocos (1+2) sem ligação; c) dois panos (1+2) com ligação; d) três panos (1+2+3) (adapt. [11, 12]).

Nos edifícios antigos existe uma diversificação quanto aos tipos de alvenaria:

- alvenaria ordinária;
- construções de cantaria e enxilharia;
- construções mistas;
- alvenaria de pedra seca ou mal argamassada.

Neste documento as alvenarias que vão ser alvo de investigação são as alvenarias ordinárias de pedra argamassada.

## 2.5. Caracterização mecânica das alvenarias

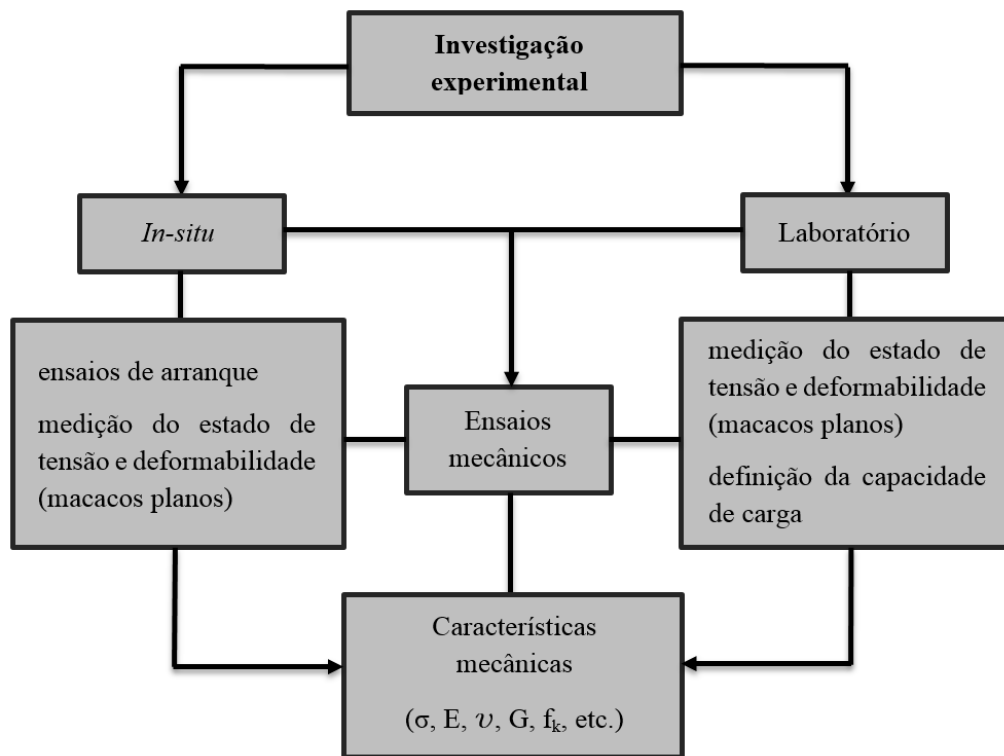
Para definir uma estratégia e criar soluções de reabilitação de edifícios antigos com paredes de alvenaria resistente, é essencial uma adequada caracterização prévia dos seus materiais constituintes, bem como das soluções construtivas existentes. A ausência de dados/conhecimento do comportamento das construções antigas conduz por vezes, a intervenções que utilizam técnicas exageradamente intrusivas, descaracterizando a autenticidade do património construído, e em algumas situações até incompatíveis mecanicamente com o existente.

O tipo e a extensão dos procedimentos e dos ensaios a realizar, *in-situ* ou em laboratório, dependem de alguns fatores, como por exemplo:

- Valor artístico ou histórico da construção;
- Recursos disponíveis;
- Tipo de danos;
- Orçamento;
- Tipo de intervenção desejada.

Em algumas situações pode ser necessário efetuar-se a monitorização ao longo do tempo de algumas anomalias presentes no edifício (tais como fendas ou assentamentos de fundações), de modo a acompanhar a sua evolução e prevenir maiores danos na estrutura.

No presente trabalho de investigação a caracterização mecânica das alvenarias é abordada através de ensaios *in-situ* e em laboratório. A Figura 5 mostra de forma esquemática e resumida os caminhos seguidos neste trabalho de investigação assim como os parâmetros obtidos através de todo o trabalho experimental.



---

**Figura 5** – Representação esquemática do trabalho de investigação experimental (adapt. [12, 13]).

## **Capítulo III. Ensaio com macacos planos**

---

Neste capítulo é abordada a técnica de ensaio com macacos planos. É feita uma descrição detalhada da metodologia de ensaio, equipamento, normalização e das proposições e condicionantes do ensaio.

### **3.1. Generalidades**

O ensaio com macacos planos (*flat-jack testing*) é considerada uma técnica de ensaio pouco intrusiva (abertura de rasgos de pequena dimensão e espessura) que permite determinar *in-situ* a tensão instalada e as características de deformabilidade de uma alvenaria. Presentemente, este ensaio é conhecido muitas vezes como um ensaio associado a alvenarias, mas o mesmo teve a sua origem na Mecânica das Rochas sofrendo uma adaptação por parte do investigador Paolo Rossi, em meados de 1980.

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), no final da década de 1960, estabeleceu alterações que se revelaram importantes para a melhoria da técnica (LNEC, 1970), estabelecendo [14]:

- a redução significativa do dano causado pelo teste na zona envolvente;
- a estimativa mais precisa dos parâmetros estimados;
- uma importante redução do tempo requerido para a realização do ensaio.

Uma melhoria significativa foi a alteração da configuração geométrica dos macacos, passando de uma geometria retangular para uma semicircular, permitindo assim uma melhoria considerável no ajuste macaco-rasgo.

Esta técnica de ensaio tem-se revelado credível, eficaz, alvo de várias campanhas de ensaios um pouco por todo o mundo. O elevado nível de confiança nos resultados provenientes dos ensaios deste tipo, deve-se essencialmente às reduzidas (ou mesmo inexistentes) perturbações na zona delimitada da parede, onde se pretende obter as características mecânicas e ainda à significativa área de alvenaria que é envolvida no ensaio [15].

## 3.2. Descrição geral do ensaio

O ensaio com macacos planos de uma forma geral é um sistema de ensaio constituído por duas chapas metálicas com um tipo de aço definido pela norma, chapas estas uniformemente soldadas ao longo das suas extremidades, formando um reservatório fechado com duas portas de comunicação com o exterior, uma de entrada, responsável pela injeção de óleo por um sistema hidráulico para o interior do macaco e outra de saída, que permite a purga do macaco (Figura A.1).



*Figura 6 – Exemplo da configuração geométrica de um macaco plano.*

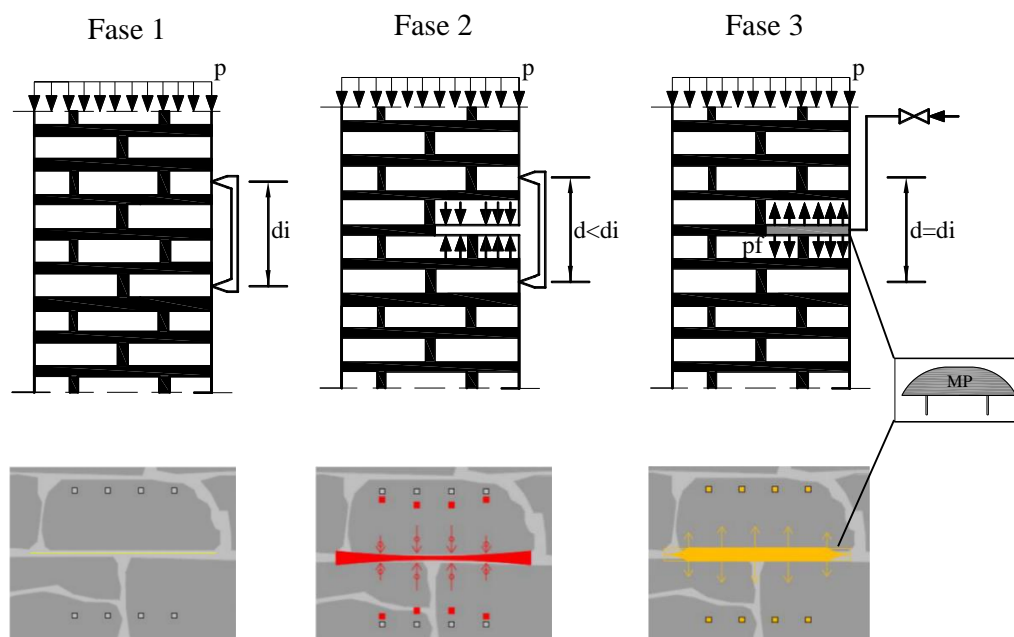
Os macacos planos podem tomar várias configurações geométricas, dependendo do tipo de secção e material que se pretende ensaiar. Neste documento é abordado principalmente a configuração geométrica semioval (Figura 6) uma vez que os macacos planos utilizados na investigação apresentavam esta mesma configuração.

O ensaio é efetuado através da abertura de um ou dois rasgos, dependendo do tipo de ensaio. Uma vez os macacos inseridos nos rasgos, estes são pressurizados, entram em contacto com o objeto em estudo, que neste caso serão os elementos constituintes da alvenaria e assim determina-se a tensão instalada na parede (ensaio simples) e as características de deformabilidade (ensaio duplo).

## 3.3. Ensaio simples

O ensaio simples tem como finalidade determinar a tensão instalada na parede, sobretudo no rasgo em estudo através do uso de um macaco plano. Este ensaio é o ensaio preliminar desta técnica e contempla três fases [14, 16]:

- Fase 1 – Seleção da zona a realizar a abertura do rasgo na parede para a inserção do macaco plano e marcação de 3 ou 4 alinhamentos verticais [17] dispostos perpendicularmente à zona de corte. Registo das distâncias iniciais entre pontos de referência normalmente usando miras (discos metálicos de pequenas dimensões ou varões roscados dependendo do tipo de equipamento de ensaio) colocados perpendicularmente ao plano de corte, antes da abertura do rasgo, como é ilustrado na Figura 7 – Fase1;
- Fase 2- Realização do corte (as dimensões dependem dos macacos a utilizar) e limpeza do material proveniente do mesmo. A ausência de material na zona de corte vai provocar uma descompressão (libertação do estado de tensão), resultando assim a aproximação das miras (Figura 7 – Fase 2). A fase 2 é finalizada com o registo das distâncias entre os pontos de referência;
- Fase 3 – Introdução do macaco plano no rasgo e injeção gradual de pressão, com a finalidade de repor o estado de deformação da parede (ponto de equilíbrio), que termina quando a leitura das distâncias entre os pontos de referência alcançam os valores iniciais, distâncias estas registadas na fase 1, antes da abertura do rasgo. A pressão aplicada ao macaco plano nesse momento, corresponde à tensão de compressão instalada no local (Figura 7 – Fase 3).



**Figura 7** – Esquema das 3 fases correspondentes ao ensaio simples: Fase1) fixação das miras e leituras das dist's antes do corte; Fase 2) leitura das dist's depois do corte; Fase 3) aplicação de pressão no macaco, em ciclos de carga até obter as dist's iniciais (adapt. [14, 18]).

Na última fase do ensaio simples (fase 3), antes do início da injeção de óleo para o interior do macaco plano, é aconselhado ajustá-lo à superfície do rasgo, aplicando-lhe metade da pressão que se estima existir no local a ensaiar, procedendo à despressurização logo de seguida. De seguida aplica-se pressão no macaco por patamares, realizando uma leitura das distâncias entre as miras em cada patamar [8, 19].

O valor da tensão,  $\sigma_m$ , na parede de alvenaria é estimado segundo a seguinte expressão:

$$\sigma_m = k_m \times k_a \times P \quad [1]$$

- em que:
- $\sigma_m$  – tensão média corrigida (em MPa), tendo como fatores de correção os coeficientes  $K_m$  e  $K_a$ ;
  - $k_m$  – coeficiente (adimensional) que traduz a rigidez do macaco plano e o atrito do sistema hidráulico, determinado segundo testes de calibração (de acordo com a norma ASTM C1196-91 [1991a] [19]);
  - $K_a$  – coeficiente (adimensional) que reflete a razão entre a área do macaco plano ( $A_m$ ) e a área de corte;
  - $P$  – pressão (em MPa), lida no manómetro da bomba, responsável pela pressurização do fluido no interior dos macacos.

Durante a realização do ensaio, a pressão lida pelo utilizador (pressão do fluido no interior do macaco), não é de facto a aplicada na alvenaria, uma vez que o valor indicado no manómetro à saída da bomba hidráulica, não tem em consideração a rigidez do macaco à deformação (fator  $k_m$ ), o atrito do sistema hidráulico e a diferença entre a área do macaco plano e a área do rasgo (fator  $k_a$ ). O parâmetro  $k_m$  é determinado em laboratório enquanto o parâmetro  $k_a$  é determinado *in-situ*. Ambos apresentam um valor inferior a 1, contribuindo assim para reduzir a pressão ( $P$ ) exercida no interior do macaco plano, que passa assim a ser representada pelo valor efetivamente aplicado pelo macaco à alvenaria. Ambos os parâmetros serão abordados de forma mais exaustiva no capítulo V.

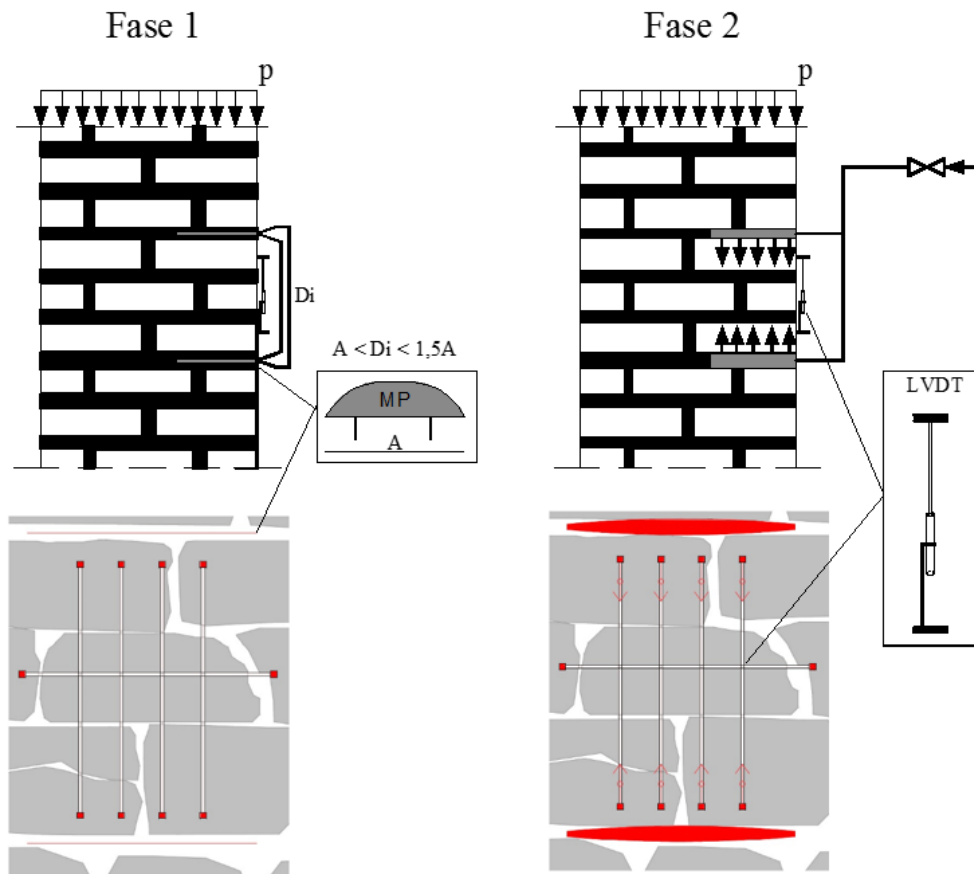
Sucintamente o ensaio simples pode ser definido como sendo um ensaio manual, em que o utilizador regista a pressão lida no manómetro e as diversas distâncias entre as miras de referência.

### 3.4. Ensaio Duplo

O ensaio duplo com macacos planos, designado também como ensaio de deformabilidade, é realizado após o ensaio simples, tendo como principal diferença do último, a utilização de dois macacos planos para aplicar carga na parede, inseridos em dois rasgos horizontais, paralelos e alinhados, em que o rasgo realizado no ensaio simples pode ser aproveitado, tal como o macaco plano inserido neste mesmo rasgo. O principal objetivo deste ensaio é determinar as características de deformabilidade. O procedimento do ensaio duplo consiste, conforme é ilustrado na Figura 8 genericamente em duas fases:

- Fase 1 – Após a realização do ensaio simples, é efetuado um segundo rasgo, superior e paralelo ao primeiro, onde é colocado o segundo macaco plano, ambos na posição horizontal. A distância entre os macacos é definida pelas normas ASTM C 1197-91 [1991b] [20] e RILEM LUM.D.3 [1990b] [21], segundo as dimensões dos macacos planos utilizados. Ambas as normas têm em conta o comprimento (A) e profundidade (B) dos macacos, para restringir a distância ( $D_i$ ) entre os mesmos, recomendando que  $D_i$  deverá ser superior a 1,5 vezes a dimensão A do macaco (Figura 8 – Fase 1). Nesta fase são definidos os alinhamentos de controlo de deformação e os respetivos pontos de referência, em que a distância entre estas deve ser no mínimo 400 mm, de modo a abranger pelo menos duas juntas de argamassa, respeitando a norma RILEM [21] acima referida. Depois é montado o conjunto de aparelhos de medição de deslocamentos nos alinhamentos anteriormente definidos, usualmente são utilizados 4 ou 5, dos quais 3 ou 4 na vertical e 1 na horizontal no respetivo provete de alvenaria formado entre os dois macacos [17].
- Fase 2 – Os dois macacos são ligados ao sistema de pressurização (bomba manual), sendo aplicados incrementos constantes de pressão, definidos normalmente em função da capacidade resistente expectável do tipo de parede de alvenaria. Ao pressurizar os macacos, a carga é aplicada ao provete (zona delimitada pelos macacos), criando um estado de tensão de compressão aproximadamente uniaxial. Durante os diversos ciclos carga/descarga são registadas leituras da deformação para cada incremento de pressão. Em consequência do aumento de pressão nos macacos, a distância inicial entre os pontos de referência diminui (Figura 8 – Fase 2) e a relação Tensão/Extensão pode assim ser determinada.

Assim o módulo de elasticidade (módulo de Young/deformabilidade) pode ser determinado através da curva experimental tensão/extensão. Durante o ensaio, é feita a monitorização do diagrama força/deslocamento e no instante em que se verificar uma mudança de inclinação significativa por parte das curvas de deslocamento, a aplicação da carga dá-se por concluída. Quando possível o carregamento é levado até a rotura da alvenaria, que se verifica pelo relaxamento/ausência de reação à aplicação de pressão nos macacos [19].



**Figura 8** – Fases de ensaio correspondentes ao ensaio duplo (adapt. [14, 18]).

Este ensaio permite ao utilizador caracterizar o comportamento mecânico da alvenaria no provete entre os macacos planos. Possibilita obter as características de deformabilidade, o módulo de elasticidade e estimar a resistência à compressão da parede.

O modo de elasticidade (módulo de Young/deformabilidade) para cada intervalo de tensão ( $\sigma_m$ ) pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$E = \frac{\sigma_m}{\varepsilon} \quad [2]$$

- onde:
- E – módulo de elasticidade (GPa);
  - $\sigma_m$  – tensão média corrigida (MPa);
  - $\varepsilon$  – extensão correspondente à deformação medida nos LVDT's (mm/mm).

A extensão média correspondente a cada parte onde foi monitorizada a deformação é calculada através da seguinte fórmula:

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_i}{L_i} \quad [3]$$

- em que:
- $\varepsilon$  – extensão média estimada (mm/mm);
  - $L_i$  – distância inicial entre as bases de medição (mm);
  - $L_f$  – distância final entre as bases de medição (mm).

Salienta-se que tal como no ensaio simples também para o ensaio duplo é necessário corrigir as pressões registadas no manómetro tendo em conta os coeficientes de correção  $K_m$  e  $K_a$ .

### 3.5. Equipamento necessário

O equipamento indispensável à realização dos ensaios com macacos planos é composto por:

- Uma máquina de corte, com disco apropriado ao tipo de material constituinte da alvenaria a ensaiar. Pode ser necessário o uso de berbequim no caso do uso de macacos planos de forma retangular (nos ensaios realizados neste trabalho bastou uma máquina de corte com disco diamantado uma vez que se usou macacos planos semicirculares);
- Um ou dois macacos planos (devidamente calibrados), dependendo do tipo de ensaio a realizar (simples ou duplo);
- Uma bomba hidráulica manual com manómetro e transdutor de pressão acoplados à mesma para o registo de pressão;
- Tubagem flexível responsável pela ligação bomba hidráulica – macacos planos;
- Sistema de medição de distâncias para ensaio simples (conjunto alongâmetro + miras ou conjunto de Potenciómetro do tipo Gefran + varões roscados);
- Sistema de medição de deslocamentos e deformações para ensaio duplo (conjunto de defletómetros ou conjunto de potenciómetros do tipo Gefran);
- Um sistema de aquisição de dados ligado a um computador portátil.

Para a realização dos ensaios é necessário material complementar:

- para a remoção de argamassas (picadeira);
- material para instalação de dispositivos e limpeza do rasgo;
- equipamento de segurança como máscara, luvas, óculos e botas;
- máquina fotográfica para registo de eventos;
- miras e respetivo material de colagem;
- diversos (papel químico, fita métrica).

Salienta-se que o equipamento utilizado nos ensaios de macacos planos diferiu, pois foi utilizado um equipamento diferente nos ensaios em laboratório em relação ao equipamento empregue nos ensaios *in-situ*. O equipamento utilizado para cada ensaio é expresso nos capítulos V e VI.

### **3.6. Normalização**

Todo o protocolo de ensaio de macacos planos é definido pelas normas ASTM (“American Society for Testing Materials”) e RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages).

O organismo norte-americano publicou duas normas sendo estas aprovadas em 1991:

- ASTM Standard Test Methods C 1196-91, In-Situ Compressive Stress Within Solid Unit Masonry Estimated Using Flat-Jack Measurements [ASTM,1991a] [19];
- ASTM Standard Test Methods C 1197-91, In-Situ Measurement of Masonry Deformability Properties Using the FlatJack Method [ASTM, 1991b] [20].

Na Europa foram também aprovadas duas normas em 1990:

- RILEM, LUM.D.2, In-Situ stress tests on masonry based on the flat jack [RILEM, 1990] [22];
- RILEM, LUM.D.3, In-Situ strength/elasticity tests on masonry based on the flat-jack [LUM.D.3,1990][21].

O trabalho de investigação desenvolvido neste documento utilizando a técnica de macacos planos quer *in-situ* quer em laboratório, foi baseado na normalização exposta neste capítulo.

### 3.7. Proposições e condicionantes

Apresentam-se de seguida algumas proposições, correspondentes aos ensaios de macacos planos, ensaios simples e ensaios duplos [4, 19]:

- a alvenaria deforma-se simetricamente em relação ao eixo dos rasgos horizontais;
- o estado de tensão inicialmente instalado nas paredes de alvenaria é de compressão;
- alvenaria ao redor do rasgo é homogénea;
- tem-se em conta que a tensão aplicada pelos macacos é uniforme;
- a alvenaria deve estar em regime elástico antes da realização do ensaio, ou seja, os valores de tensão estimados devem, quando comparados com os da resistência à compressão, assegurar que a alvenaria está em regime elástico, possível de confirmar por visualização da curva de tensão-deformação obtida, durante o ensaio simples.

As condicionantes provadas e reconhecidas quer dos ensaios simples quer dos ensaios duplos, estão principalmente relacionadas com:

- difícil interpretação dos resultados, quando após a execução do corte a recuperação das distâncias entre miras não se faz com sucesso;
- confiança nos resultados para valores de carga muito baixos, consequência de o nível baixo de deformação imposta;
- apoio inadequado ou carga insuficiente sobre a zona da parede em ensaio com vista a garantir as condições de reação necessárias à pressão introduzida pelo macaco plano;
- fiabilidade da interpretação dos resultados em situações de material muito fraco e pouco homogéneo;
- as tensões instaladas podem não corresponder às tensões efetivamente instaladas na alvenaria, devido a uma distribuição assimétrica de tensões, uma vez que este tipo de paredes é altamente hiperestético, permitindo que se criem caminhos preferenciais de carga, resultando concentrações de tensões, em detrimento de outras zonas, onde as tensões são aliviadas;
- registo da área de carregamento efetivo dos macacos, durante o ensaio, para vários níveis de tensão e área de carregamento final (para isto é fundamental que se faça a troca de papel químico do ensaio simples para o duplo);
- os resultados variam conforme a zona ensaiada devido à proximidade de pontos singulares da alvenaria (cunhais, aberturas, mudanças de espessura das paredes);

- regularidade do corte, que por vezes, exige o calçamento do macaco de forma diferenciada ao longo do rasgo (por exemplo, se o rasgo intersecta parcialmente pedra, a argamassa na vizinhança, fragiliza-se com muita facilidade);
- cumprimento das normas, no que diz respeito à localização das miras de controlo de deformação em relação ao rasgo e entre si, de acordo com pressupostos regulamentares. No caso de alvenaria de pedra irregular são altamente condicionados pela localização das pedras (criação dos alinhamentos verticais e colocação das miras sobre as pedras);
- numa parede, a realização de ensaios em cada um dos alçados poderá obter-se valores diferentes do estado de tensão devido a alvenaria estar sujeita a carregamento excêntrico [14].

### **3.8. Coeficiente de correção $K_m$**

O coeficiente  $K_m$ , cujo valor é adimensional e menor que a unidade, traduz a rigidez do macaco plano e o atrito do sistema hidráulico. Este coeficiente é fornecido pelo fabricante, embora possa ser obtido através de testes de calibração realizados em laboratório respeitando a norma ASTM C 1196-91 [23].

Para a realização do processo de calibração, foi montado um sistema constituído por material disponível no LEBA-IPL. Uma vez que se utilizou equipamento diferente para os ensaios de macacos planos *in-situ* e em laboratório nomeadamente macacos planos e sistema hidráulico diferentes, foi necessário proceder a processos de calibração distintos. Estes processos serão abordados nos capítulos V e VI correspondentes aos ensaios de macacos planos *in-situ* e em laboratório.

## ***Capítulo IV – Caracterização dos edifícios ensaiados no Centro Histórico de Leiria***

---

### **4.1. Introdução**

Neste capítulo será exposto a aplicação da técnica de macacos planos em edifícios do Centro Histórico de Leiria. Sentiu-se a necessidade de complementar a informação obtida anteriormente sobre o edificado do CHL, com ensaios de caracterização mecânica em alvenarias de pedra nomeadamente em paredes resistentes, de modo a poder atingir um melhor nível de compreensão do funcionamento interno das mesmas. O conhecimento sobre as alvenarias poderá ser de extrema utilidade por forma de não submeter os edifícios a técnicas de intervenção demasiadas intrusivas que muitas vezes são incompatíveis com o comportamento das construções. No capítulo V são expostas algumas caracterizações ao nível morfológico aquando a demolição da alvenaria no CHL, para obtenção de materiais.

### **4.2. Centro Histórico de Leiria**

A região de Leiria apresenta, desde a Pré-História Antiga, uma ocupação humana inquestionável que deixam marcas profundas na paisagem. Leiria apresenta uma situação geográfica privilegiada, junto ao rio, entre Coimbra e Santarém, com um castelo difícil de tomar que terá contribuído para a fixação de população e de vida económica progressivamente mais ativa [24, 25].

Encontrando-se a região sob o domínio dos Mouros, em 1135 D. Afonso Henriques tomou aos mouros o Castelo de Leiria. Ocorreu uma rápida expansão territorial entre os rios Lis e Lena, desenvolvendo-se o povoamento cristão em redor do Castelo, surgindo deste modo o que iria ser o Centro Histórico de Leiria. [26].

O núcleo do Centro Histórico de Leiria, na sua zona baixa apresenta uma altitude média que não excede os 30 metros, sendo que as altitudes médias em torno da cidade rondam os 400 metros. Em termos genéricos, o clima apresenta um carater Mediterrânico [27, 28].

Quanto à morfologia nos dias de hoje, o Centro Histórico, com 29,4 hectares, é um valor acrescentado, uma vez que a maior parte das ruas datam do século XV, ainda que tenha mudado a toponímia.

“A rua Direita é a que vai direita ao centro ou de um extremo ao outro, no geral de uma porta a outra porta, atravessando todo o burgo (...). É esta noção de eixo maior de atravessamento que explica a aplicação da mesma designação à artéria principal de muitos bairros (...)” [29]. A rua Direita (atual Rua Barão Viamonte), revelou ser um eixo estruturante do Centro Histórico de Leiria, existindo dezoito ruas que lhe são perpendiculares, dez a nascente e oito a poente.

“A cidade de Leiria, por ter ultrapassado há muito o seu núcleo histórico “esqueceu-se” de preservar e proteger a zona que revela as suas origens e se encarrega de esconder no edificado físico, social e económico a sua herança identitária” [26, 29].

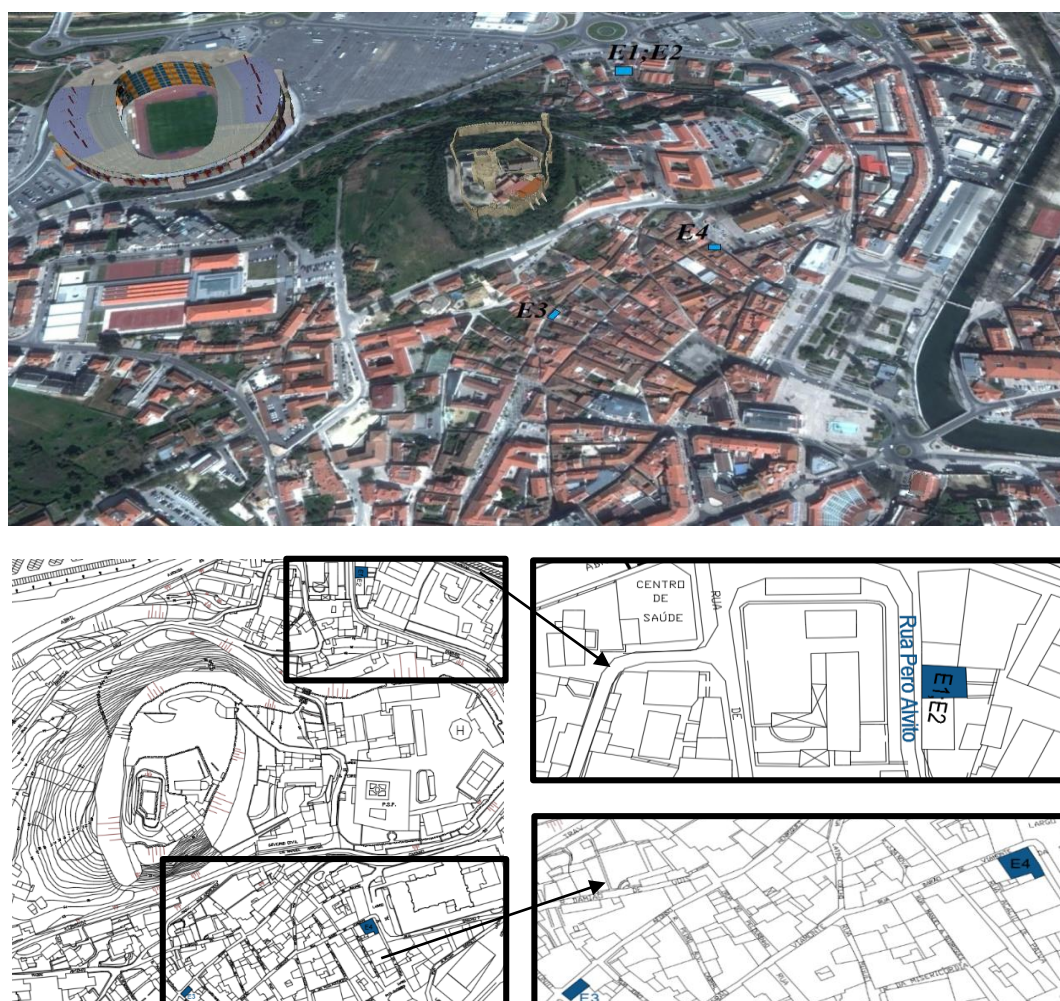
### **4.3. Caracterização dos edifícios submetidos a ensaios**

Procedeu-se à recolha de informação de todas as características que fossem pertinentes aos ensaios de modo a poder caracterizar o que correspondia à construção típica utilizada no CHL. Desta recolha de informação percebeu-se que os materiais predominantes nas alvenarias resistentes são essencialmente constituídas por pedra irregular argamassada e paredes de compartimentação de tabique fasquiado. A madeira é o material que constitui os elementos estruturais dos pavimentos e coberturas. As coberturas eram predominantemente cobertas com um revestimento exterior cerâmico.

Para a seleção dos edifícios foram seguidos três critérios [19]:

- os edifícios tinham de apresentar condições mínimas de estabilidade estrutural, que não comprometessem os ensaios e a segurança dos intervenientes;
- as paredes ensaiadas fossem representativas do tipo de alvenaria típica do C.H.L.;
- só eram ensaiadas zonas que cumprissem os requisitos impostos pelas normas ASTM C1196-91[1991a] [23] e RILEM LUM.D.2[1990a] [22].

Foram selecionados com critério, três edifícios constituídos por paredes resistentes de alvenaria de pedra para a aplicação da técnica de macacos planos. Os edifícios escolhidos estão localizados no Centro Histórico de Leiria (Figura 9), nos quais foram realizados oito ensaios de macacos planos (4 ensaios simples e 4 ensaios duplos).



*Figura 9 – Localização dos edifícios ensaiados.*

Foi atribuído para cada edifício e respetivo ensaio uma referência distinta de modo a simplificar a identificação de cada um. O nome que foi atribuído a cada edifício corresponde à identificação do arruamento onde se situa, correspondendo uma determinada letra de referência. Assim como para os edifícios, os ensaios foram denominados por uma referência por ordem de datas que foram realizados. A identificação dos edifícios e ensaios podem ser consultados no Quadro 1.

*Quadro 1 – Localização, número e tipo de ensaios realizados no CHL.*

Edifício ensaiado		Ensaio realizado				
Ensaio	Localização	Referência		Tipo de ensaios		
		Edifício	Ensaio	Ensaio simples	Ensaio duplo	Arranque
E1 / E2	Rua Pero Alvito nº12	A	I / II	2	2	–
E3	Rua D. Afonso Henriques nº31	B	III	1	1	5
E4	Largo da Sé / Rua Barão Viamonte nº12	C	IV	1	1	–

A localização e identificação dos locais escolhidos nos edifícios para a realização dos ensaios estão presentes na Figura 9.

Para a realização do trabalho de investigação foi necessário proceder ao levantamento geométrico e estrutural dos edifícios em análise, levantamento este feito *in-situ*.

#### 4.3.1. Edifício Largo da Sé

O edifício C (Largo da Sé) pertence a época de construção do século XIX, pertence ao núcleo central do CHL, tem uma configuração em planta semelhante a um retângulo, era constituído por 3 pisos (piso térreo + 2 pisos elevados) e encontra-se num estado de conservação razoável (Figura 10). Este edifício foi submetido ao ensaio com macacos planos denominado como ensaio E4.



**Figura 10** – Identificação dos locais de ensaio em planta e respetivos alçados do edifício Largo da Sé.

Este edifício é constituído por uma cobertura cerâmica (telha canudo), por paredes resistentes de alvenaria de pedra irregular, paredes de compartimentação de tabique fasquiado e com elementos estruturais dos pavimentos e cobertura em madeira. Depois de inspeção visual, verificou-se que os elementos horizontais do pavimento do piso 1 descarregavam na parede resistente onde se localizava a zona de ensaio, o mesmo não acontecendo nos restantes pisos.

### 4.3.2. Edifício D. Afonso Henriques

O edifício B (D. Afonso Henriques) é referente à época de construção do século XIX, pertence ao núcleo central do CHL, tem uma configuração geométrica em planta idêntica a um retângulo, constituído por 3 pisos (piso térreo + 2 pisos elevados) e encontra-se num estado de conservação razoável (Figura 11). Este edifício foi submetido ao ensaio com macacos planos denominado como ensaio E3.

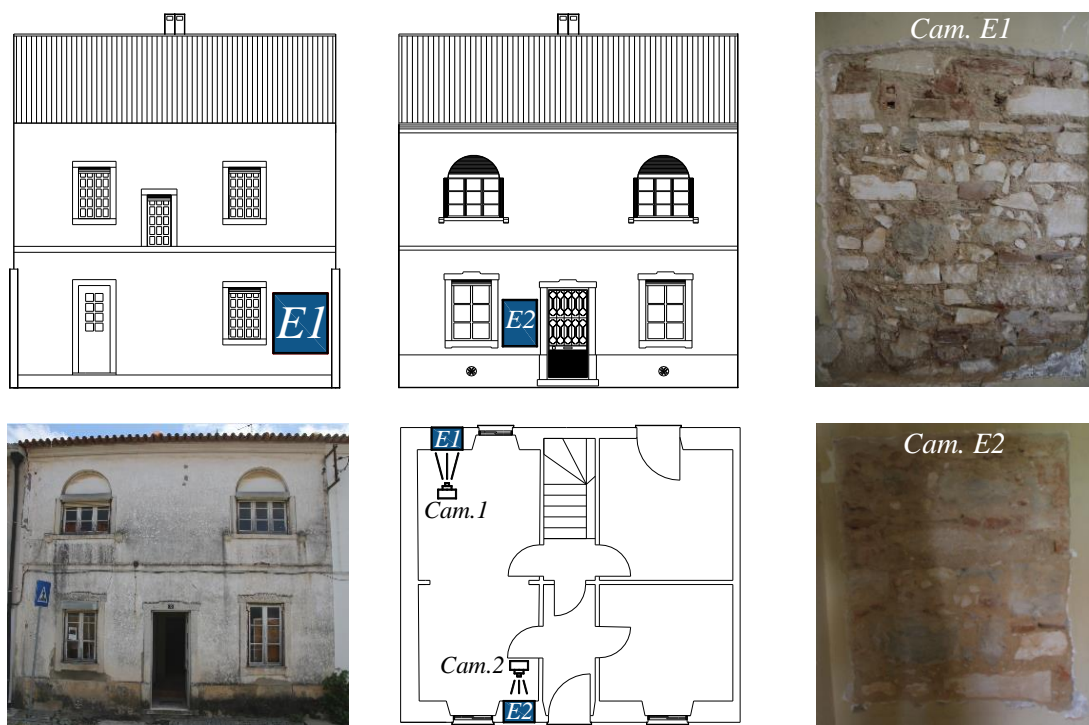


*Figura 11 – Identificação em planta e alçados da zona a ensaiar do Edifício D. Afonso Henriques.*

Este edifício é constituído por uma cobertura cerâmica (telha canudo), por paredes resistentes de alvenaria de pedra irregular, paredes de compartimentação de tabique fasquiado e com elementos estruturais dos pavimentos e cobertura em madeira.

### 4.3.3 Edifício Pero Alvito

O edifício A (Pero Alvito) pertence a época de construção do século XX (40-70), pertence à encosta norte-nascente do CHL, possui uma configuração em planta próxima de um quadrado, constituído por 2 pisos (piso térreo + piso elevado) e encontra-se num estado de conservação razoável (Figura 12). Este edifício foi submetido a dois ensaios com macacos planos denominado como ensaio E1 e E2.



**Figura 12** – Identificação dos locais de ensaios em planta e alçados do edifício Pero Alvito.

Este edifício é constituído por uma cobertura cerâmica (telha marselha), por paredes resistentes de alvenaria de pedra irregular, paredes de compartimentação de tabique fasquiado e com elementos estruturais dos pavimentos e cobertura em madeira.

#### 4.3.3.1. Estimativas de tensão instalada

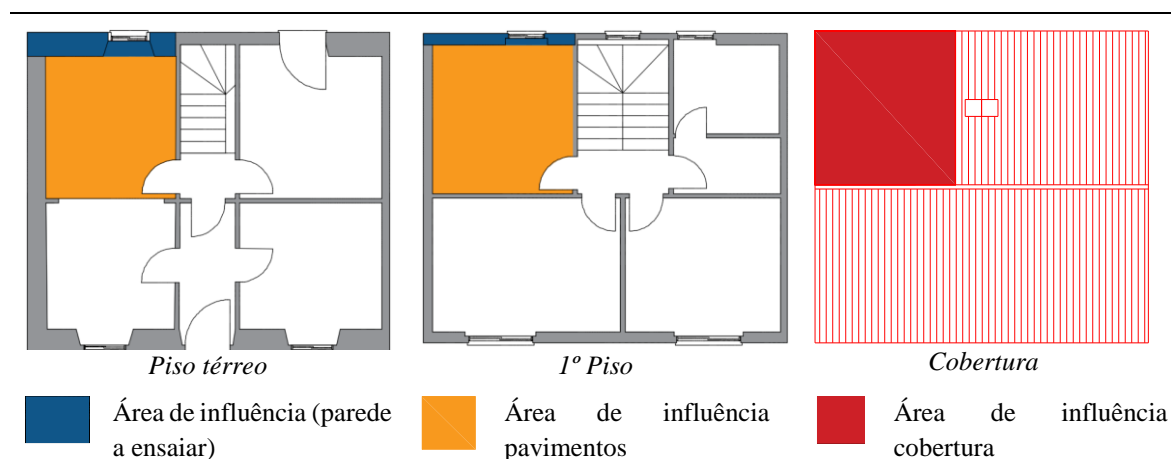
De forma a poder calcular uma estimativa de tensão nas paredes dos edifícios a ensaiar, foi necessário fazer o levantamento das características geométricas (Quadro 2) e material constituinte dos diversos elementos estruturais dos edifícios como referido anteriormente, assim como perceber o método construtivo adotado.

As estimativas de tensão calculadas serviram também como referência, para saber qual a carga a aplicar nos muretes construídos em laboratório para os ensaios flat jack, assunto abordado no Capítulo VI.

Serve o edifício A, ensaio E1 como exemplo do método de cálculo adotado das estimativas de carga. As estimativas de carga correspondentes aos restantes ensaios encontram-se no anexo B.

A estimativa de tensão calculada, foi em relação à parede de fachada onde iria ser efetuado o ensaio e calculou-se à cota onde se iria realizar o rasgo do ensaio simples.

A Figura 13 ilustra as áreas de influência consideradas para o cálculo analítico.



**Figura 13** – Plantas do edifício Pero Alvito com respectivas áreas de influência.

Foram admitidas ações permanentes correspondentes ao peso próprio das paredes, às áreas de influência dos pavimentos e cobertura. Não foram consideradas sobrecargas adicionais.

**Quadro 2** – Valores considerados para a estimativa de cargas do edifício A.

Pisos	Espessura alvenarias [m]	Pé-direito pisos [m]
Piso Térreo	0,57	3,00
1º Piso	0,32	3,12
Cobertura	–	–

As ações permanentes e sobrecargas foram considerados valores segundo consulta das tabelas técnicas [30].

Pesos próprio:

- Paredes de alvenaria de pedra calcária:  $\gamma = 22,6 \text{ kN/m}^3$ ;
- Cobertura constituída por telha marselha (com  $33^\circ$  de inclinação) suportada por ripas e varas de madeira =  $0,7 \text{ kN/m}^2$ ;
- Pavimento com elementos estruturais do tipo solho sobre vigas de madeira e forro de madeira rincoado =  $0,6 \text{ kN/m}^2$ .

A tensão estimada foi calculada segundo:

- $pp_{\text{cobertura}} = (0,7/\cos(33^\circ)) \times 3,5 = 2,92 \text{ kN/m}$ ;
- $pp_{\text{pavimentos}} = 0,6 \times 2 \times 3,5 = 4,2 \text{ kN/m}$ ;
- $pp_{\text{paredes}} = 22,6 \times [0,57 \times (3 - 0,56 \text{ (cota do rasgo)}) + 0,32 \times 3,12] = 54 \text{ kN/m}$ ;

- $p_{TOTAL} = 61,12 \text{ kN/m}$ ;
- $\sigma_{ESTIMADA} = p_{TOTAL}/\text{espessura} = 61,12/0,57 = 107,2 \text{ kN/m}^2 = 0,107 \text{ MPa}$ .

No Quadro 3 podem ser consultados os valores obtidos para as estimativas de tensão correspondentes a todos os edifícios ensaiados.

**Quadro 3 – Resumo das tensões estimadas por cálculo.**

Ensaio	Edifício	Localização	Tensão estimada por cálculo analítico (MPa)
E1	A	Rua Pero Alvito nº12	0,107
E2	A	Rua Pero Alvito nº12	0,110
E3	B	Rua D. Afonso Henriques nº 31	0,194
E4	C	Largo da Sé nº12	0,175

## **Capítulo V. Campanha experimental.**

### **Ensaaios com macacos Planos**

---

Uma vez realizada a caracterização dos edifícios a ensaiar e a estimativa de cargas correspondentes aos mesmos, procedeu-se ao início da campanha experimental *in-situ*. Neste capítulo serão expostos todos os procedimentos tomados na campanha experimental, referentes aos ensaios com macacos planos e ensaios de arranque.

#### **5.1. Equipamento empregue nos ensaios *in-situ***

Para a realização dos ensaios com macacos planos no CHL foi necessário um equipamento específico, equipamento este que apesar não ser de grande complexidade, exige uma sensibilidade especial na sua aplicabilidade, pois esta sensibilidade é refletida nos resultados.

Os diversos equipamentos empregues na preparação e execução dos ensaios de macacos planos são expostos na Figura 14. Foram utilizados macacos planos de configuração geométrica semioval com 100 mm de profundidade, 400 mm de comprimento e 3 mm de espessura, denominados como MPSO 3Inf. e MPSO 4Sup. (em dia de ensaio o conjunto de macacos era reforçado com mais dois macacos de reserva como medida preventiva). Estes foram devidamente calibrados em laboratório, assunto abordado em 5.5.2. A máquina de corte para abertura dos rasgos foi um “moto-disco” a gasolina com disco adiamantado. O sistema hidráulico era composto por uma bomba manual da ENERPAC®, bomba esta preparada para ser ligada a dois macacos planos através de mangueiras flexíveis de engate rápido e também dois derivadores hidráulicos acoplados à mesma, que permitiam a ligação em série, de um manómetro (25 bar) e um transdutor de pressões da marca Druck do tipo PTX 1400 com capacidade de 100 bar (Figura A.1). Este por sua vez estava ligado ao sistema de aquisição de dados. O sistema hidráulico utilizado respondia ao critério imposto pela norma [23] de ser capaz de manter uma pressão constante num intervalo de tempo no mínimo de 5 minutos.

Para registo e medição de deslocamentos, foram utilizados potenciómetros da marca GEFTRAN, modelo PZ-12-A-025 Rectilinear Displacement Transducer with cylindrical case, ligados ao sistema de aquisição e controlo de dados.

O sistema de aquisição de dados utilizado era composto por um computador portátil, com o respetivo *software* de aquisição e tratamento de dados e também por um sistema onde se conectavam os potenciômetros, o transdutor de pressão, o computador portátil e a alimentação do sistema. Para registo de eventos foi utilizada uma máquina fotográfica.

Para além do equipamento exposto na Figura 14 também foi necessário material diverso, exposto nos subcapítulos 5.2 e 5.3, de preparação e execução dos ensaios.



*Figura 14 – Equipamento empregue nos ensaios de macacos planos no CHL.*

## 5.2. Trabalhos preparatórios

Os trabalhos preparatórios considerados, foram todos os trabalhos de campo desenvolvidos para poder aplicar a técnica com macacos planos. A primeira etapa foi escolher o edifício e local onde abrir a janela de inspeção para ensaio. Uma vez definido o local a ensaiar procedeu-se as etapas que são de seguida discriminadas.

### 5.2.1. Remoção da camada de revestimento

Antes de proceder à picagem do reboco, marcou-se com giz sem precisão, os limites da janela de inspeção a abrir, com aproximadamente as medidas pretendidas tendo como ponto de referência o pavimento do edifício. Depois procedeu-se a remoção da camada de revestimento com auxílio de uma picadeira (Figura 15).

Posteriormente, uma vez que se pretendia caracterizar a percentagem dos constituintes da alvenaria a ensaiar e perceber o que acontecia durante os ensaios, procedeu-se a um processo

de escovagem com uma escova de aço, até ter-se uma percepção dos limites dos constituintes da alvenaria.



**Figura 15** – Remoção da camada de revestimento: a) durante a picagem; b) depois da picagem.

### 5.2.2. Definição da localização dos alinhamentos

Através de inspeção visual foram localizados os locais para marcação do desenvolvimento dos rasgos (Figura 16a). Uma vez marcada a zona a realizar os rasgos foram marcados os alinhamentos batendo uma linha azul. Foram definidos três alinhamentos verticais identificados como A1, A2, A3 e um alinhamento horizontal correspondendo a identificação A4 (Figura 16b,c).



**Figura 16** – Identificação e marcação dos rasgos e alinhamentos: a) marcação dos rasgos; b) marcação dos alinhamentos; c) identificação dos alinhamentos e respectivas distâncias.

### 5.2.3. Aplicação dos varões

A marcação dos alinhamentos permitiu a marcação de pontos para a fixação dos varões roscados, varões estes que serviriam de suporte aos potenciômetros. As extremidades dos potenciômetros são constituídas por um sistema de rótula perfurada com diâmetro de 5 mm.

Uma vez marcados os pontos de referência foram feitas as perfurações com broca de 7 mm com berbequim elétrico (Figura 17a). Foram removidas todas as impurezas das perfurações com bomba de ar e escova (Figura 17b,c). Depois foram preenchidos 2/3 do comprimento dos furos com químico de 2 componentes da marca *Hilti* (Figura 17d). Imediatamente após aplicação do químico foram embebidos os varões no químico oscilando os varões de modo ao ar ser expulso do interior do furo (Figura 17e). Durante o processo de secagem do químico o varão era seguro aproximadamente 5 minutos, tempo este suficiente para o varão estabilizar. Os varões utilizados tinham um sistema de porca/contra-porca de modo, a que mesmo transmitida alguma vibração aos varões o sistema de aperto a dissipasse.

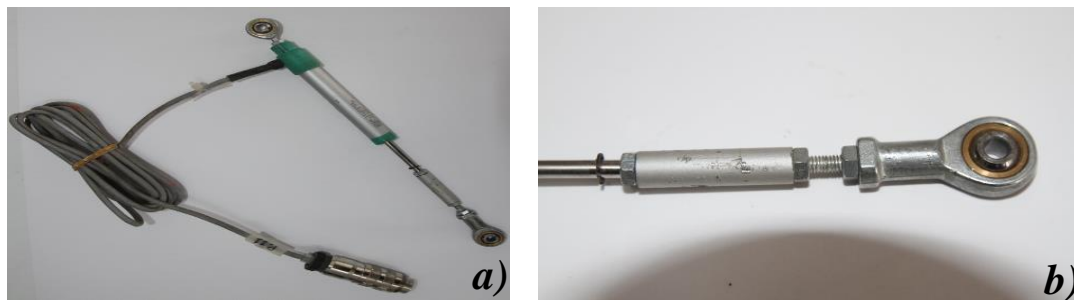


**Figura 17** – Aplicação dos varões de suporte aos sensores para ensaio simples e duplo: a) furação para aplicação do químico; b,c) limpeza dos furos; d) aplicação do químico; e) colocação dos varões de suporte dos sensores; f) aspeto janela inspeção após fixação dos varões.

Neste capítulo vai ser tomado como exemplo de todo o protocolo considerado para os ensaios com macacos planos *in-situ*, o ensaio E1 (I) realizado no edifício A (Pero Alvito). Os restantes ensaios podem ser consultados no Anexo C.

### 5.3. Ensaio simples

Posteriormente à etapa de preparação dos ensaios de macacos planos, foram instalados os sensores (potenciômetros) nos três alinhamentos verticais previstos para o ensaio simples. Aos potenciômetros foram acoplados extensões por forma a satisfazer a distâncias entre os varões roscados fixos nas alvenarias, que funcionavam como pontos de referência e suporte dos sensores (Figura 18).



*Figura 18 – Potenciômetro utilizado no ensaio simples; a) com extensão; b) pormenor extensão.*

Foi utilizado um sistema de aperto dos sensores como foi dito anteriormente de porca/contraporca de forma aos sensores não se movessem horizontalmente. Para a fixação foram utilizadas chaves de bocas para aperto das porcas. Os sensores foram conectados ao sistema de aquisição de dados e deu-se o início do ensaio, começando por registar as distâncias iniciais (Figura 19a). Esta etapa foi denominada como fase 1 no capítulo III onde é explicado o procedimento teórico.

A etapa que se seguiu passou pela abertura do rasgo com um moto-disco a gasolina no local inicialmente marcado para o efeito (Figura 19b). Este processo revelou ser o mais difícil de todo o ensaio de macacos planos pois o peso do moto-disco e a posição de corte não ofereciam uma boa posição de trabalho que era agravado aquando a realização do corte na junta de argamassa (corte suave), se encontrava na sua profundidade alguma pedra, sentindo a dureza da mesma no disco diamantado do moto-disco. Outra agravante era a poeira libertada resultante da execução do corte, que para além dificultar a visão durante o processo de corte também implicava a proteção de todo equipamento de ensaio. Seguiu-se a limpeza do rasgo com bomba de ar (Figura 19c) e fixou-se novamente os sensores registando as novas distâncias após corte. Esta etapa tal como a anterior encontra-se explicada no capítulo III correspondendo à fase 2. Para finalizar o ensaio simples removeu-se os sensores da etapa anterior, introduziu-se o macaco plano (com os químicos de determinação da área de contacto) no rasgo, obrigando em alguns ensaios o uso de calços metálicos para que o

contacto macaco plano-rasgo existisse e fosse uniforme. Os calços metálicos eram usados essencialmente em locais pontuais onde aquando a realização do corte ocorria um desprendimento local de pequenas porções de argamassa. Com o macaco plano inserido e calçado instrumentou-se novamente o local de ensaio, e registou-se as distâncias (Figura 19e), distâncias estas que eram registadas para cada ciclo de carga. Optou-se por realizar incrementos de 0,05 MPa, em cada ciclo de carga até as distâncias iniciais serem reestabelecidas.

Em consulta do capítulo III, esta etapa tem o mesmo significado da fase 3.



**Figura 19** – Protocolo esquemático dos ensaios simples: a) registo das distâncias iniciais; b,c,d) abertura, limpeza e aspeto do rasgo; e) medição das distâncias após abertura do rasgo e colocação do macaco plano; f) restabelecimento das distâncias iniciais.

Na Figura 20 é representado uma vista geral do ensaio simples. Como nota final acerca do ensaio simples salienta-se que os incrementos de pressão realizados através do sistema hidráulico, o aperto das porcas e montagem dos potenciómetros foram executados todos eles pelo mesmo operador, por forma a manter sempre a mesma coerência, sensibilidade e método de ensaio.



**Figura 20** – Perspetiva geral da utilização da técnica de macacos planos - ensaio simples.

### 5.3.1. Estimativa das tensões instaladas

Uma vez realizada a campanha de ensaios no CHL, resta analisar e tratar os dados obtidos provenientes dos vários parâmetros e do ensaio em si. Pretende-se com análise dos dados obter a estimativa da tensão instalada nas paredes.

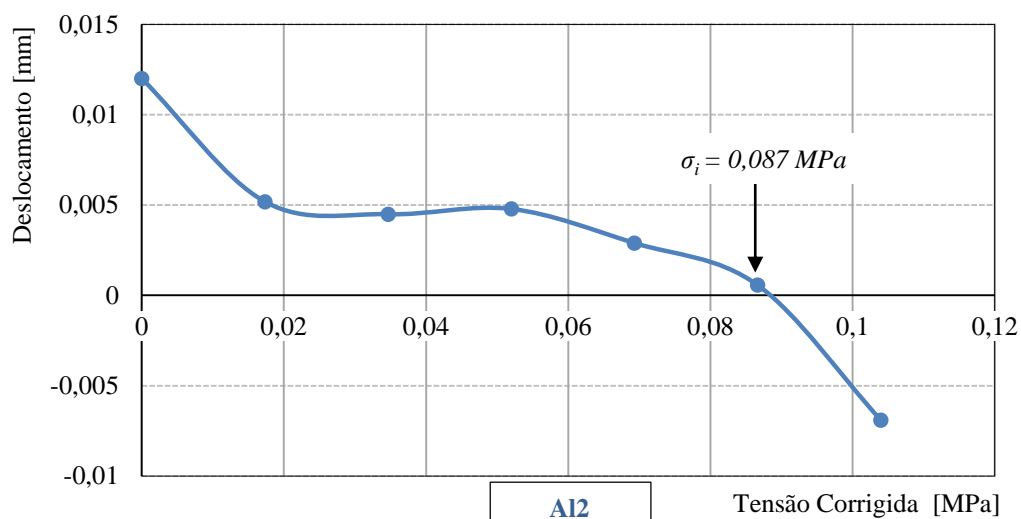
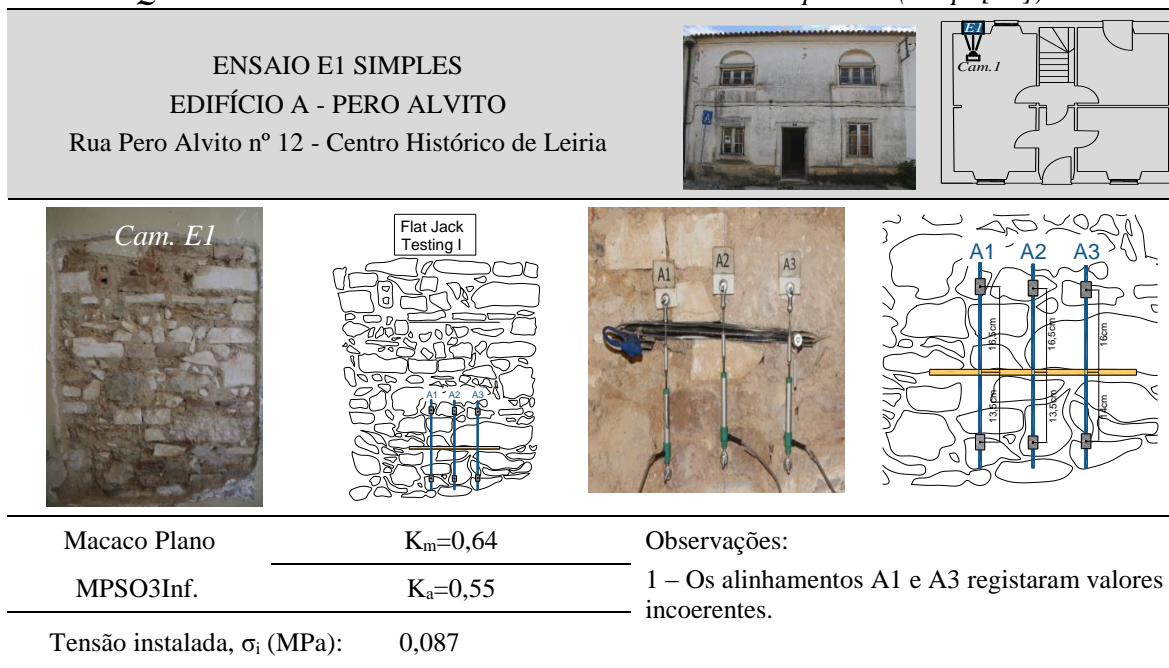
O Quadro 4 indica as identificações atribuídas aos diversos parâmetros de ensaios.

**Quadro 4** – Identificação dos diversos parâmetros de ensaio.

Edificado ensaiado		Ensaio realizado				Secção e nome do macaco
Ensaio	Localização	Referência		Tipo de ensaios		
		Edifício	Ensaio	Ensaio simples	Ensaio Duplo	
E1 / E2	Rua Pero Alvito nº12	A	I / II	2	2	MPSO3 / MPSO4*
E3	Rua D. Afonso Henriques nº31	B	III	1	1	
E4	Largo da Sé nº12	C	IV	1	1	

Nota\*: MPSO toma o significado de macaco plano semioval.

**Quadro 5 – Síntese dos resultados obtidos no ensaio simples E1 (adapt.[31]).**



Pressão no macaco (KPa)	A1 (mm)	A2 (mm)	A3 (mm)	Tensão não corrigida (MPa)	Tensão corrigida (MPa)	Restabelecimento A2
Distâncias iniciais	17,230	13,6070	16,1360	–	–	–
Após corte	17,2610	13,5950	16,2030	0,00	0,00	0,0120
50	17,2573	13,6018	16,2139	0,05	0,02	0,0052
103	17,2780	13,6025	16,2166	0,10	0,04	0,0045
152	17,2582	13,6022	16,2220	0,15	0,06	0,0048
200	17,2654	13,6041	16,2250	0,20	0,08	0,0029
250	17,2695	13,6064	-16,2259	0,25	0,09	0,0006
303	17,2743	13,6139	-16,2279	0,30	0,11	-0,0069

Uma vez terminado o processo de tratamento de dados, resta quantificar a variação de valores entre os resultados dos ensaios realizados *in-situ* no CHL com os resultados obtidos por cálculo analítico (Quadro 6).

**Quadro 6** – *Quantificação da variação dos resultados pelos diferentes métodos.*

Ensaio	Tensão estimada por cálculo MPa	Tensão estimada pelo ensaio MPa	Varição (%)*	Observações
E1	0,107	0,087	+23	Valor aproximado à variância aceitável $\pm 24\%$
E2	0,110	0,113	-3	Valor próximo, dentro da variância aceitável $\pm 24\%$
E3	0,194	0,158	+23	Valor aproximado à variância aceitável $\pm 24\%$
E4	0,175	0,137	+28	Esta diferença pode ser associada a elevada percentagem de argamassa

Nota\* Os limites de variância estipulados pelas normas ASTM é de  $\pm 24\%$ .

Todos os valores relativos aos restantes ensaios como foi referido anteriormente estão disponíveis discriminadamente no anexo C.

## 5.4. Ensaio Duplo

A execução do ensaio duplo é iniciado após conclusão do ensaio simples. Antes de iniciar o ensaio foi realizada a preparação dos potenciômetros para o ensaio duplo, pois foram utilizados os mesmos potenciômetros do ensaio simples (após desmontagem destes do ensaio simples) com as diferenças que iria existir um quarto potenciômetro para o alinhamento horizontal. A preparação consistiu na desmontagem das extensões colocadas nos potenciômetros para o ensaio simples e montagem de umas outras extensões de maior comprimento (Figura 21), pois a distância entre os pontos de referência iriam ser superiores no ensaio duplo.



**Figura 21** – Potenciômetro com extensão utilizado para o ensaio duplo.

Optou-se por utilizar o macaco plano e o químico das áreas de contacto já inseridos no rasgo do ensaio simples.

O início do ensaio foi dado com a abertura de um segundo rasgo (Figura 22a) paralelo ao primeiro na marcação anteriormente definida no ponto 5.2.2. Posteriormente procedeu-se à limpeza do rasgo (Figura 22b), seguida da colocação do conjunto macaco plano-químico (Figura 22c) e calçando o mesmo em caso de necessidade. O passo seguinte foi a instrumentação do ensaio duplo segundo aa norma ASTM C 1997-91 [20] através da colocação dos 3 potenciómetros verticais e 1 na posição horizontal, nos respetivos varões e fixação dos mesmos com o aperto do sistema porca/contra-porca (Figura 22d). Com a utilização de uma segunda mangueira flexível de encaixe rápido, os macacos foram conectados ao sistema hidráulico permitindo assim incrementos de igual valor de pressão em ambos os macacos, sendo o sistema hidráulico ligado ao sistema de aquisição de dados através da ligação transdutor-sistema de aquisição de dados (Figura 22f).



**Figura 22** – Protocolo esquemático dos ensaios simples: a,b) abertura e limpeza do rasgo; c) abertura limpeza e aspeto do rasgo; d,e) colocação e ajuste dos potenciómetros; f) ligação de todo o sistema; g) aplicação dos ciclos carga/descarga; h) aspeto da monitorização obtida pelo software; i) aspeto final da janela de inspeção após ensaio.

Foram aplicados ciclos de carga/descarga de 0,1 MPa (Figura 22g). Durante os ciclos carga/descarga o provete delimitado pelos macacos planos estava a ser monitorizado (Figura

22h) ao nível das deformações através do mesmo sistema de aquisição, registo e controlo de dados utilizado no ensaio simples.

Os ensaios foram finalizados pela ausência de reação sentida na bomba hidráulica.

Finalizado o ensaio duplo foi necessário remover todo o sistema de ensaio. O equipamento de instrumentação foi facilmente desmontado e arrumado, ao contrário dos macacos planos inseridos nos rasgos, em alguns casos ofereceram alguma resistência no processo de remoção dos mesmos. Esta dificuldade pode ser explicada devido ao aumento de volume dos macacos, aumento este, resultante da injeção de óleo para o interior dos mesmos durante os ensaios simples e duplo. Nos ensaios que necessitaram da inclusão de calços para aconchegar os macacos aos rasgos, o processo de remoção tornou-se mais fácil pois uma vez retirados os calços, a “folga” criada pela ausência destes, permitia retirar os macacos com facilidade. A vista geral do ensaio duplo é ilustrada na Figura 23.



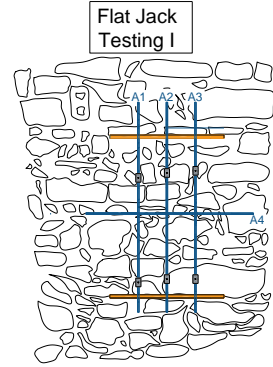
**Figura 23** – Perspetiva geral da utilização da técnica de macacos planos - ensaio duplo.

#### 5.4.1. Estimativa do módulo de elasticidade

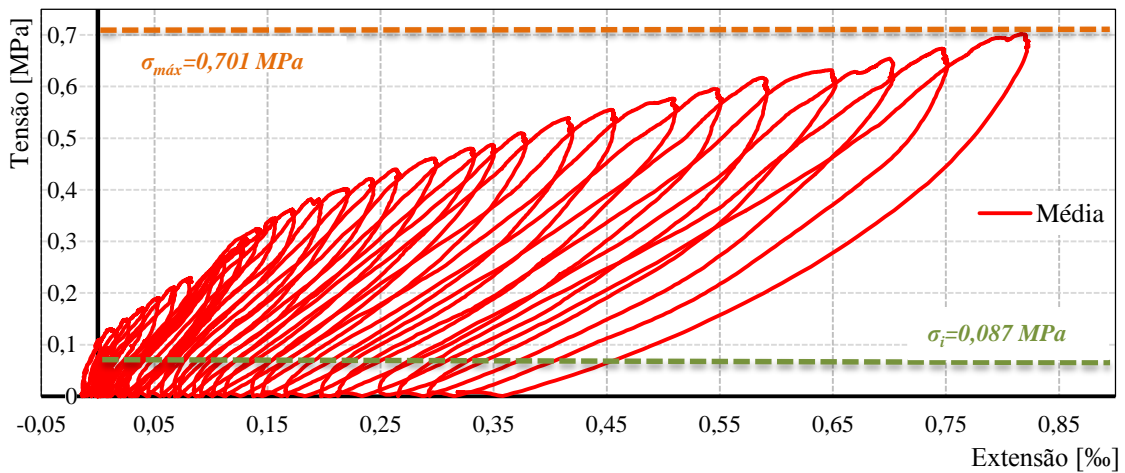
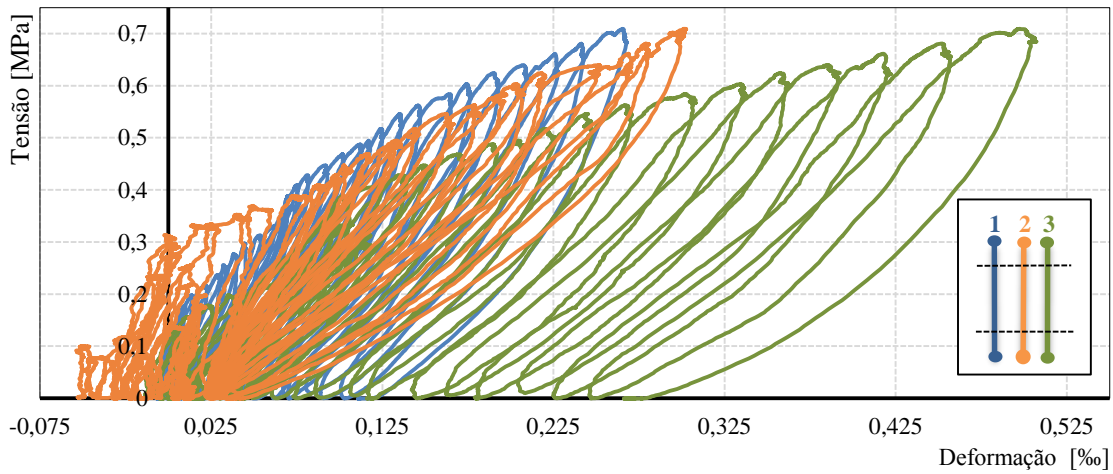
Finalizado o trabalho de campo referentes aos ensaios com macacos planos *in-situ*, procedeu-se à análise e tratamentos dos dados obtidos. O Quadro 7 diz respeito ao ensaio E1, podendo ser consultados todos os resultados relativos aos outros ensaios no anexo C, como já referido anteriormente. Pode ser consultado no capítulo 3.4 o procedimento e formulação teórica.

**Quadro 7 – Valores obtidos no ensaio duplo correspondente ao ensaio E1.**

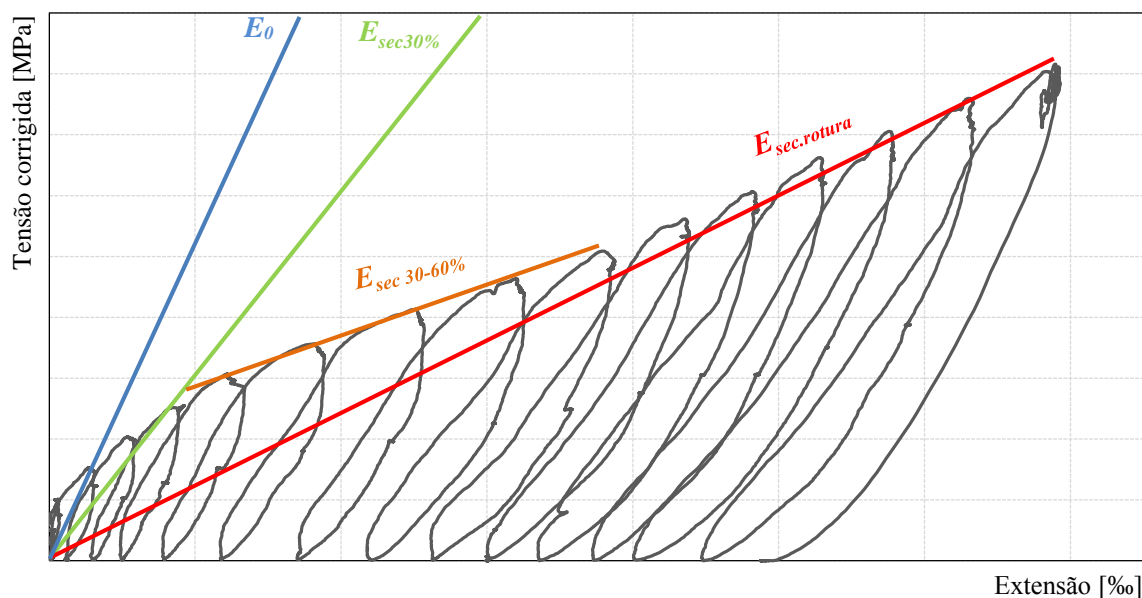
<p>ENSAIO E1 DUPLO EDIFÍCIO A - PERO ALVITO Rua Pero Alvito nº 12 - Centro Histórico de Leiria</p>		
--	--	---



MPSO3 Inferior	$K_a=0,55$ $K_m=0,64$	MPSO4 Superior	$K_a=0,588$ $K_m=0,66$	<p>Observações:</p> <p>1 – Não se obteve valores para o coeficiente de <i>Poisson</i>;</p> <p>2 – Não foi realizada a troca do papel químico utilizado no ensaio simples.</p>
Tensão instalada, $\sigma_i$ (MPa): 0,087				
Módulo de elasticidade, E (GPa): 1,225				
Tensão máxima, $\sigma_{máxima}$ (Mpa): 0,701				



A determinação dos módulos de elasticidade das alvenarias ensaiadas foi obtida através de análise gráfica estimando os mesmos através da curva tensão-extensão média obtida nos ensaios duplos. A Figura 24 ilustra os diversos módulos calculados, sendo estes dados através do declive das retas secantes correspondentes a cada percentagem de carga máxima.



**Figura 24** – Esquema de cálculo dos diferentes módulos de elasticidade (adap. [19]).

O módulo de elasticidade com mais interesse nesta investigação, foi o que correspondia à secante entre os 30-60% da tensão de rotura, pois esta zona da curva tensão-extensão tinha um comportamento próximo do linear e sem influência significativa do início do ensaio onde as curvas eram díspares, correspondendo aos primeiros ciclos de carga onde o conjunto macaco plano-calços metálicos se ajustavam à ranhura. O Quadro 8 expõe a estimativa dos diversos módulos de elasticidade a partir das curvas tensão-extensão.

**Quadro 8** – Valores dos diversos módulos de elasticidade obtidos nos ensaios.

Ensaio	$E_0$ (GPa)	$E_{sec30\%}$ (GPa)	$E_{sec30-60\%}$ (GPa)	$1000 \times \sigma_{última}$ (GPa)
E1	3,600	3,33	1,225	0,701
E2	6,198	5,35	0,590	0,677
E3	13,33	9,86	4,134	1,079
E4	3,010	1,01	0,350	0,721

No quadro Quadro 9 é apresentado todos os valores de tensão obtidos nos ensaios *in-situ*, assim como a relação entre a tensão máxima e tensão instalada.

**Quadro 9** – Valores de tensão obtidos nos diversos ensaios in-situ.

Ensaio	$\sigma_{\text{instalada}}$ (Mpa)	$\sigma_{\text{máxima}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{máx.}} / \sigma_i$
E1	0,087	0,701	8,06
E2	0,113	0,677	5,99
E3	0,158	1,079	6,829
E4	0,137	0,721	5,263

O Eurocódigo 6 [32] sugere para o cálculo simplificado do módulo de elasticidade a formulação:

$$E = 1000 f_k \quad [4]$$

em que  $f_k$  é valor característico da resistência à compressão da alvenaria.

Neste trabalho os valores de  $f_k$  iriam corresponder aos valores da tensão máxima apresentados no Quadro 9.

Segundo o Eurocódigo 8 [33] o valor correspondente a  $f_k$  (valor característico) deverá ser obtido multiplicando o valor médio por um fator 0,7. A norma também menciona que o valor nominal determinado para a resistência à compressão, pode ser considerado como valor de cálculo, no caso de estruturas antigas de alvenaria.

São ainda referenciados no quadro Quadro 10 outros critérios normativos para a tensão de rotura e módulo de elasticidade.

**Quadro 10** – Critérios normativos para a tensão de rotura e módulo de elasticidade [19].

	Tensão <i>in-situ</i>	Tensão de rotura	Módulo de elasticidade
ASTM STANDARD C 1197-91 [1991]	Variância na ordem dos 24%	-----	*Sobrestima o valor em 15%
RILEM, TC 76-LUM [1988]	-----	*Sobrestima o valor em 15%	*Sobrestima o valor em 10%
NOLAND <i>at al.</i> [1990]	**Variância na ordem dos 24%	-----	***Sobrestima o valor em 15 a 20 %

\* - É citado que nos registos dos alinhamentos centrais o efeito do confinamento lateral é negligenciável.

\*\* - O valor em ensaios de laboratório poderá ascender aos 20%.

\*\*\*- Refira-se que seria desejável conduzir 3 a 5 testes por zona de interesse.

## 5.5. Parâmetros do ensaio (Ka e Km)

### 5.5.1. Determinação do parâmetro Ka

A diferença entre a área de contato e a área do rasgo onde eram inseridos os macacos planos é representada pelo parâmetro  $K_a$ .

Este parâmetro foi abordado no capítulo III na explicação da técnica de macacos planos. Para a determinação da área de contacto foram recortados conjuntos químico e papel, de espessura suficiente a suportar os atritos aquando a realização dos ensaios. Estes conjuntos teriam a mesma configuração geométrica dos macacos planos (Figura 25).

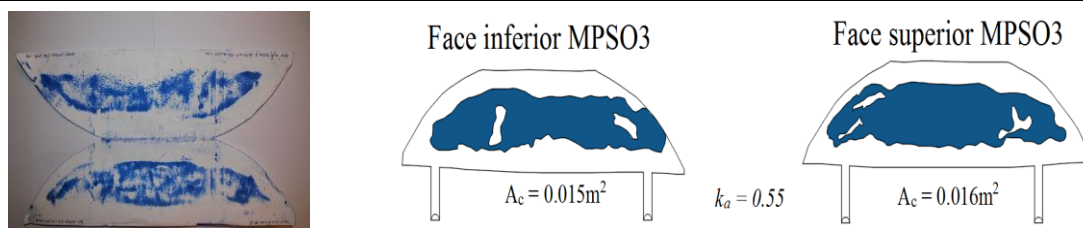


*Figura 25 – Conjuntos papel-químico utilizados nos ensaios in-situ.*

#### 5.5.1.1. Resultados do parâmetro Ka

A diferença entre a área de contato e a área do rasgo onde eram inseridos os macacos planos é estabelecida pelo parâmetro  $K_a$  como mencionado anteriormente.

Uma vez finalizados os ensaios, o papel/químico era fotografado e digitalizado. Com auxílio do *software* Autocad as áreas eram medidas, como ilustra a Figura 26 como exemplo. Todos os químicos foram identificados com o tipo de ensaio e local ensaiado.



*Figura 26 – Determinação das áreas de contato relativo ao ensaio simples E1.*

Todas as áreas de contato e respetivos  $k_a$  podem ser consultados no anexo C. O Quadro 11 apresenta os valores de  $K_a$  obtidos para os ensaios com macacos planos *in-situ*.

**Quadro 11** – Valores de  $K_a$  obtidos na campanha experimental in-situ.

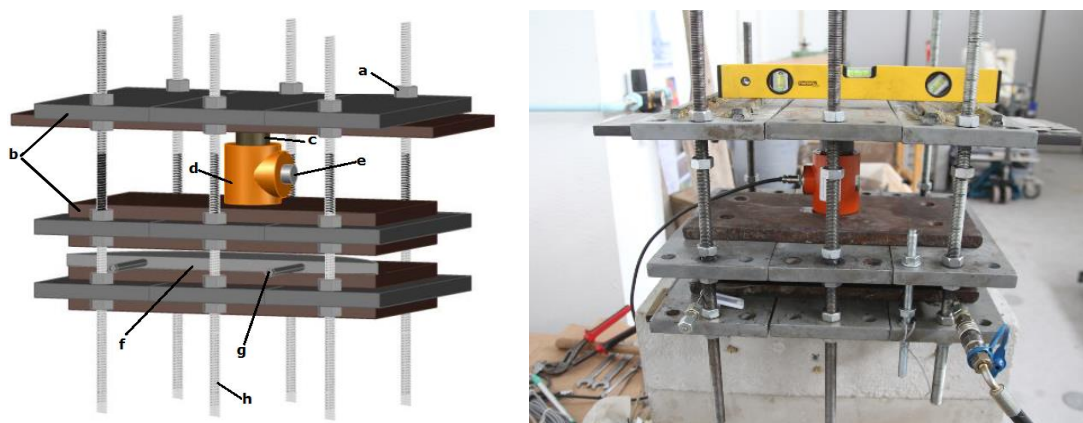
Referência Ensaio	Tipo de ensaio	Macaco Plano	Coeficientes de correção $K_a$	
			$K_a$	$K_a$ corrigido
E1	Simples	MPSO3Inf.	0,550	0,588
	Duplo	MPSO4Sup.	0,625	
E2	Simples	MPSO3Inf.	0,450	0,520
	Duplo	MPSO4Sup.	0,589	
E3	Simples	MPSO3Inf.	0,680	0,69
	Duplo	MPSO4Sup.	0,700	
E4	Simples	MPSO3Inf.	0,680	0,706
	Duplo	MPSO4Sup.	0,732	

### 5.5.2. Determinação do parâmetro $K_m$

O parâmetro  $K_m$  é calculado tendo em conta a rigidez do macaco plano e o atrito do sistema hidráulico. O sistema de calibração (Figura 27) foi desenvolvido no LEBA seguindo os pressupostos da norma ASTM C 1996-91 [23].

O equipamento utilizado foi:

- Chapas metálicas (Figura 27b), com espessura e rigidez adequadas à prensa do MP;
- Disco metálico (Figura 27c);
- Varões roscados e porcas (Figura 27a, h);
- Macacos planos a calibrar (Figura 27f);
- Sistema de pressurização (bomba hidráulica + transdutor de pressões);
- Célula de carga e ligação ao sistema de aquisição de dados (Figura 27d,e);
- Sistema de registo e aquisição de dados.



**Figura 27** – Sistema de simulação de carga num teste real (desenvolvido no LEBA).

O procedimento adotado para a calibração dos macacos planos, teve em conta os requisitos da norma ASTM 1196-91 [23], obedecendo à seguinte ordem:

- i) Montagem do sistema (chapas metálicas-varões-porcas) e colocação de uma célula de carga (200 kN da marca TML), ligada ao sistema de aquisição de dados (*data logger* da marca TML), permitindo obter o  $P_{\text{célula de carga}}$ ;
- ii) Colocou-se espaçadores entre as chapas que simulam o rasgo num teste real e procedeu-se ao aperto das porcas de modo a aplicar uma pré-carga suficiente para proporcionar o contato total entre as chapas de apoio e os espaçadores, o equivalente a 10 psi;
- iii) Introduziu-se o macaco plano a testar e através do sistema hidráulico aplicou-se uma pressão cíclica no macaco plano (0,05 MPa), cujo valor se determina à saída da bomba hidráulica ( $P_{\text{bomba\_hidraulica}}$ ) com a leitura no manómetro/transdutor de pressões acoplado à bomba. Este valor de pressão é determinado pelo *software* associado ao transdutor de pressões. A pressão registada é comparada com a pressão lida na célula de carga ( $P_{\text{célula\_de\_carga}}$ ), resultando o parâmetro  $K_m$ , calculado através da expressão:

$$k_m = \frac{P_{\text{célula\_de\_carga}}}{P_{\text{bomba\_hidráulica}}} \quad [5]$$

- iv) Para cada incremento de carga, tendo em conta a área do macaco calculou-se o valor de  $K_m$ .



**Figura 28** – Sistema de calibração desenvolvido no LEBA.

### 5.5.2.1. Resultados do parâmetro $K_m$

De modo genérico a determinação do parâmetro  $K_m$  foi responsável pelo início da campanha experimental, pois o começo dos ensaios *in-situ* só foram possíveis uma vez ter sido realizada a calibração do sistema de ensaio. O coeficiente (adimensional) que traduz a rigidez do macaco plano e o atrito do sistema hidráulico, foi abordado anteriormente no capítulo III e obteve-se os resultados presentes no Quadro 12 para o macaco MPSO3.

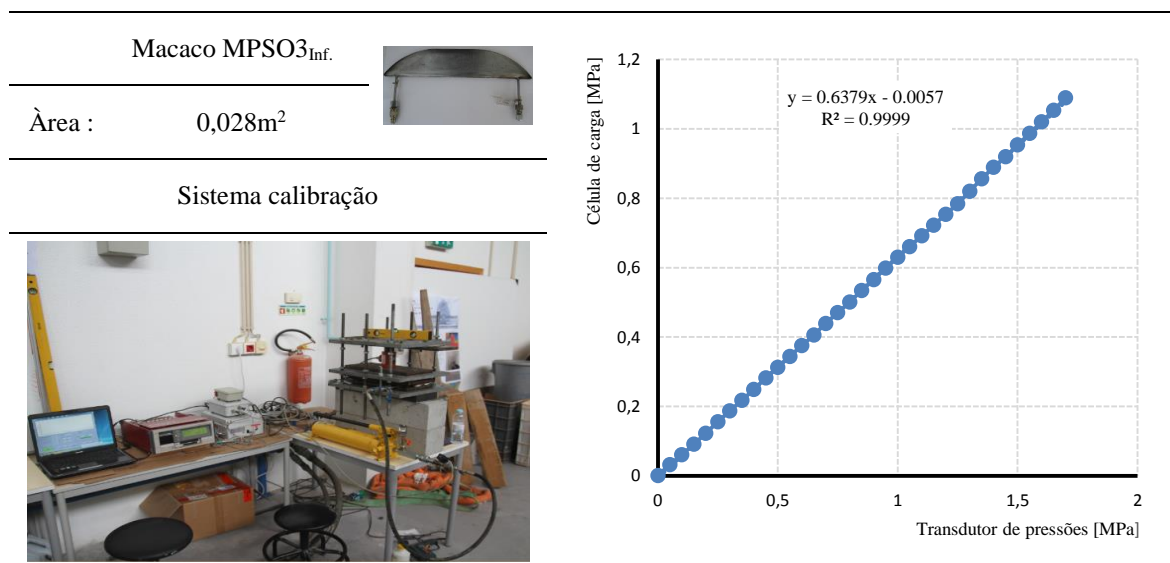
As calibrações dos macacos para os ensaios *in-situ* são diferenciados em relação à calibração dos macacos para os ensaios laboratoriais ao nível do equipamento utilizado, nomeadamente:

- Bomba hidráulica (com manómetro) – Enerpac;
- Macacos planos – MPSO3<sub>inf</sub> e MPSO4<sub>sup</sub>;
- Transdutor de pressão;
- Sistema de aquisição de dados.

Foi tomado a título de exemplo a calibração do MPSO3 presente no Quadro 12.

**Quadro 12** – Calibração macaco plano MPSO3 com transdutor de pressão.

Transdutor de pressões [MPa]	Célula de carga [MPa]	$K_m$ 's parciais	Transdutor de pressões [MPa]	Célula de carga [MPa]	$K_m$ 's parciais
0	0,0011	0	0,9	0,5654	0,628
0,05	0,0321	0,643	0,95	0,5986	0,630
0,1	0,0607	0,607	1,0	0,6296	0,630
0,15	0,0914	0,610	1,05	0,6607	0,629
0,2	0,1225	0,613	1,1	0,6914	0,629
0,25	0,1557	0,623	1,15	0,7225	0,628
0,3	0,1868	0,623	1,2	0,7843	0,628
0,35	0,2179	0,622	1,25	0,82	0,627
0,4	0,2486	0,621	1,3	0,8557	0,631
0,45	0,2821	0,627	1,35	0,8893	0,634
0,5	0,3129	0,626	1,4	0,92	0,635
0,55	0,3439	0,625	1,45	0,9536	0,634
0,6	0,3750	0,625	1,50	0,9868	0,636
0,65	0,4057	0,624	1,55	0,9868	0,637
0,7	0,4393	0,628	1,6	1,02	0,638
0,75	0,4700	0,627	1,65	1,0536	0,639
0,8	0,5011	0,626	1,7	1,0893	0,641
				$K_{m\text{médio}}$	0,64



O Quadro 13 indica todos os valores de  $K_m$  nos diversos processos de calibração.

**Quadro 13** – Valores obtidos no processo de calibração dos macacos planos utilizados *in-situ*.

Macaco Plano		MPSO3 <sub>Inf.</sub>	MPSO4 <sub>Sup.</sub>
$K_m$	1ª calibração	0,64	0,66
	2ª calibração	0,62	0,66
	3ª calibração	0,67	–
	Média	0,64	0,66

### 5.5.3. Síntese dos valores obtidos $k_a$ e $k_m$

O Quadro 14 apresenta um resumo dos valores de  $k_a$  e  $k_m$  correspondentes aos ensaios *in-situ*.

**Quadro 14** – Síntese dos valores para  $K_a$  e  $K_m$  correspondentes aos ensaios *in-situ*.

Referência Ensaio	Tipo de ensaio	Referência Macaco Plano	Coeficientes de correção		
			$K_a$	$K_a$ corrigido	$K_m$
E1	Simple	MPSO3 <sub>Inf.</sub>	0,550	0,588	0,64
	Duplo	MPSO4 <sub>Sup.</sub>	0,625		0,66
E2	Simple	MPSO3 <sub>Inf.</sub>	0,450	0,520	0,64
	Duplo	MPSO4 <sub>Sup.</sub>	0,589		0,66
E3	Simple	MPSO3 <sub>Inf.</sub>	0,680	0,690	0,64
	Duplo	MPSO4 <sub>Sup.</sub>	0,700		0,66
E4	Simple	MPSO3 <sub>Inf.</sub>	0,680	0,706	0,64
	Duplo	MPSO4 <sub>Sup.</sub>	0,732		0,66

## 5.6. Ensaio de arranque

O edifício submetido a ensaios de arranque, localiza-se no Centro Histórico de Leiria na rua D. Afonso Henriques, sendo constituído por alvenarias resistentes de pedra argamassada. A empresa *Hilti* recomenda que em caso de dúvida se efetuem testes às ancoragens em obra para verificar a sua adequação e capacidade de carga, devido à enorme heterogeneidade de materiais com diferentes resistências e características.

### 5.6.1. Procedimento e execução de ensaio

Uma vez escolhida a alvenaria a ensaiar, criou-se uma janela de inspeção, removendo para isso todo o material constituinte do reboco. Identificou-se os locais na janela de inspeção a ensaiar e logo de seguida iniciou-se o processo de perfuração com berbequim elétrico com broca de Ø12 mm. Foram realizados sete furos com profundidades diferentes de 25, 30, 35 e 40 cm (Figura 29a).

Após as perfurações procedeu-se à limpeza das mesmas utilizando uma bomba de limpeza e uma escova de aço Hit RB 9/16'' (Figura 29b).

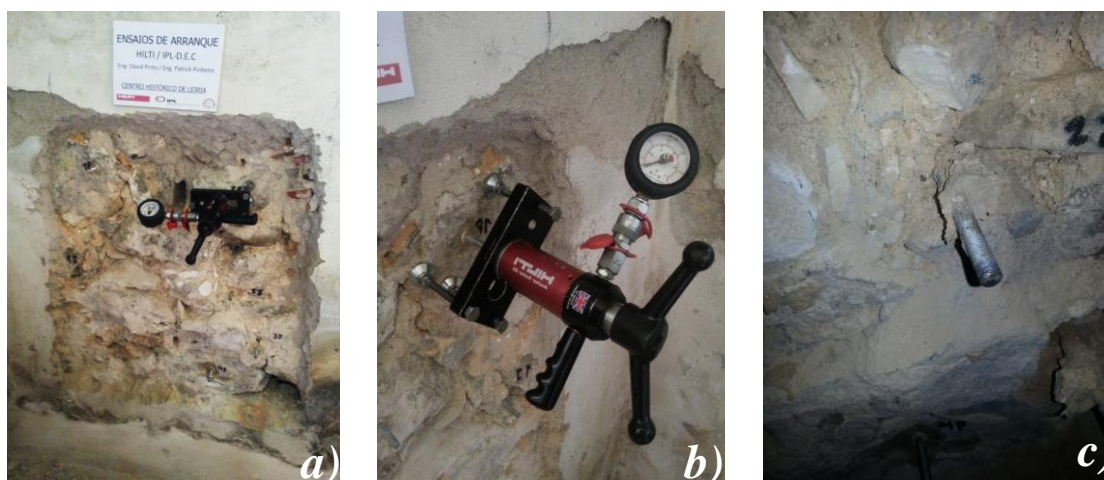
Uma vez finalizada a preparação dos furos, foi injetado o químico Hit-RE 500 utilizando um dispensador manual HDM 500 com cartucho e bico misturador Hit-RE-M (Figura 29c). O químico injetado foi aproximadamente 2/3 do comprimento do furo. Logo de seguida eram introduzidas as barras roscadas Hit C – M10. Foi cumprido todo este processo para cada barra introduzida, atendendo ao tempo de secagem do químico que era relativamente rápido.

Foram fixas duas barras roscadas para cada comprimento, 25, 30, 35 cm e uma barra de 40 cm, das quais quatro barras fixas em pedra e três fixas na junta de argamassa (Figura 29d). Cada barra foi identificada segundo os comprimentos de embutimento e se era fixa em pedra ou argamassa (Figura 29e).



**Figura 29** – Preparação dos ensaios de arranque: a) perfuração; b) limpeza dos furos; c) aplicação do químico; d) introdução das barras rosçadas; e) aspeto final da janela de inspeção antes de ensaio.

Os ensaios de arranque foram efetuados com uma máquina de ensaio da *Hilti*. O ensaio de arranque e o aspecto das barras rosçadas é ilustrado na Figura 30.



**Figura 30** – Ensaio de arranque: a,b) execução do ensaio; c) barra rosçada ensaiada.

Os resultados dos ensaios de arranque são apresentados no Quadro 15.

Salienta-se que os varões 2J e 4P não foram ensaiados, uma vez que os resultados obtidos nos outros varões indicaram que não haveria necessidade de ensaiar os mesmos.

**Quadro 15** – Valores obtidos dos ensaios de arranque em alvenaria de pedra do CHL.

Ensaio	Local	Embutimento [cm]	Resistência de arranque [kN]
1J	Junta	25	15
1P	Pedra	25	25
2P	Pedra	30	20
3J	Junta	35	6
3P*	Pedra	35	2

\*Nota: No ensaio 3P verificou-se que o comprimento de embutimento do varão era essencialmente envolvido em argamassa depois dos primeiros 10 cm de varão.

## Capítulo VI. Análise experimental em laboratório

Neste capítulo serão abordados todos os trabalhos de investigação executados em laboratório, nomeadamente, a construção dos muretes que iriam ser submetidos a ensaios, ensaios estes, ensaios de identificação dinâmica, ensaios de macacos planos (simples e duplos) e ensaios de compressão axial. No final do capítulo será exposta a caracterização mecânica dos materiais utilizados na construção dos muretes. Os muretes construídos e ensaiados foram dois, denominados como murete 1 e murete 2, em que cada alçado era diferenciado como A e B. O Quadro 16 apresenta a nomenclatura dos muretes e o número de ensaios efetuados. Os ensaios realizados em cada um dos alçados foram denominados como MLI, MLII, MLIII e MLIV.

**Quadro 16** – Referências e síntese dos ensaios realizados sobre os muretes.

Muretes ensaiados			Ensaio		
Referência		Identificação dinâmica	Flat Jack		Compressão Axial
Ensaio	Murete		Simples	Duplo	
MLI	Murete 1	Alçado A	1	1	1
MLII		Alçado B	1	1	
MLIII	Murete 2	Alçado A	1	1	1
MLIV		Alçado B	1	1	

### 6.1. Construção dos muretes em laboratório

Neste capítulo serão expostos todos os processos inerentes à caracterização e proveniência dos materiais empregues na construção dos muretes, assim como a tecnologia construtiva e preparação dos mesmos.

#### 6.1.1. Caracterização dos materiais

Foi feita uma caracterização dos materiais empregues na construção dos muretes, de modo a ficar a conhecer as especificações técnicas entre outras.

### 6.1.1.1. Características da cal viva em pó (cal virgem)

O óxido de cálcio em pó ou mais conhecido na linguagem corrente como cal viva em pó, é identificada com a fórmula química CaO, com um peso molecular de 56,0077 g/mol e apresenta um estado físico em pó fino. Este produto é resultante do processo de trituração e moagem da cal viva em pedra, obtendo assim a cal viva em pó. A sua composição química e análise granulométrica são expressas nos Quadro 17 e 18 respetivamente.

**Quadro 17** – Análise química quantitativa [34].

Parâmetro Analítico	Valor Obtido	Unidades	Método Analítico
CaO	>94	%	NP EN 459-2:2011
MgO	0,55	%	
SO <sub>3</sub>	<0,05	%	
CO <sub>2</sub>	2,5	%	

**Quadro 18** – Análise granulométrica e reatividade [34].

Granulometria	Reatividade			
0-0,2mm	T <sub>40</sub> =5min.	T <sub>50</sub> =7min.	T <sub>60</sub> =8min.	T <sub>máx.</sub> >75°C

Salienta-se o método de produção, pois este produto natural é obtido da calcinação da matéria-prima (carbonato de cálcio), em fornos especiais com temperaturas entre o 900 °C e 1100 °C (Figura 31), durante 5/6 dias consecutivos, obtendo-se desta forma a homogeneidade total do óxido de cálcio.



**Figura 31** – Processo de calcinação.

### 6.1.1.2. Características da água

A água utilizada no processo de amassadura da argamassa de assentamento da alvenaria, foi proveniente da rede pública de abastecimento do Instituto Politécnico de Leiria, através de ligação a uma boca de rega presente no LEBA, junto ao local dos trabalhos.

### 6.1.1.3. Características da areia de areiro

Foram realizados ensaios de análise granulométrica, para melhor conhecer as características da areia utilizada (areia média) na construção dos muretes, obtendo a curva granulométrica apresentada na Figura 32.

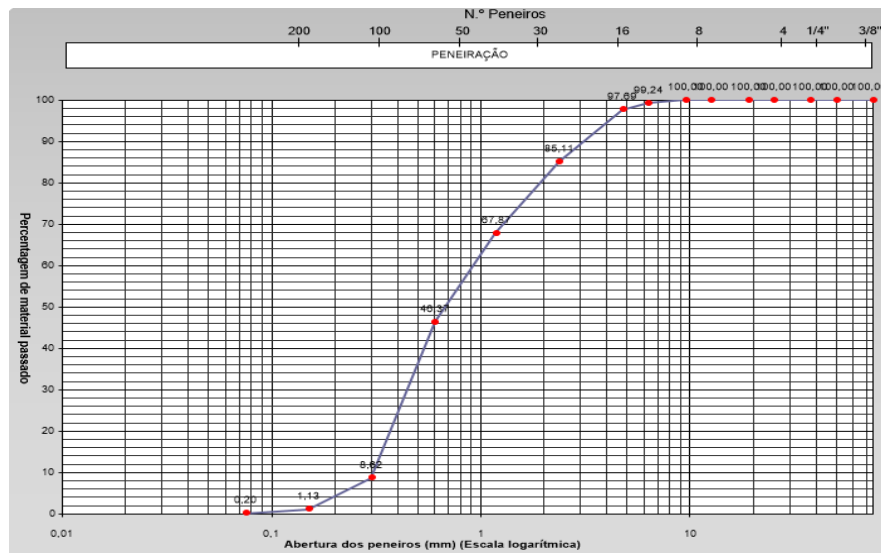


Figura 32 – Curva granulométrica.

### 6.1.1.4. Características do calcário do Centro Histórico de Leiria

Após inspeção em vários edifícios do Centro Histórico de Leiria, conclui-se que a pedra predominante nas construções antigas do CHL é calcária. Uma vez identificada a rocha predominante, recolheu-se amostras provenientes da demolição de alvenarias presentes no CHL, (assunto abordado no capítulo seguinte), amostras estas sujeitas a ensaios de caracterização mecânica em laboratório. Os ensaios serão abordados no capítulo 6.5.2.

## 6.1.2. Proveniência dos materiais empregues nos muretes

### 6.1.2.1. Origem da Pedra e método de obtenção (demolição)

A pedra utilizada nos diversos trabalhos experimentais, foi obtida de um edifício histórico de habitação do Centro Histórico de Leiria. Realizou-se a demolição parcial de alvenarias, com o intuito de recolher a pedra proveniente das demolições, de modo a poder caracterizar exatamente o tipo de pedra que se encontra no CHL. A identificação da parede em questão é ilustrada nas Figura 33a e 32b.



**Figura 33** – Identificação de uma das paredes demolidas: a) alçado frontal; b) alçado posterior.

Numa situação corrente de demolição deste tipo de alvenarias, quando se trata de uma demolição total, não é necessário qualquer tipo de cuidado peculiar. No caso em questão a demolição foi feita com especial cuidado uma vez que a amostra a recolher, neste caso pedra do tipo calcário, teria de permanecer o quanto possível intata, para posteriormente ser utilizada para a construção dos muretes em laboratório e para a extração de carotes, assuntos presentes mais à frente neste documento.

Assim, numa primeira fase foi retirado o reboco, de espessura média 2,5 cm (Figura 34a), com auxílio de uma picadeira como é ilustrado nas Figura 34b e 33c.



**Figura 34** – Primeira fase de demolição da parede: a) espessura do reboco; b) remoção do reboco do alçado posterior; c) remoção do reboco da seção transversal.

Numa segunda fase procedeu-se a remoção da argamassa envolvente da pedra com recurso a uma picadeira, de modo a poder derrubar a pedra com ligeiras pancadas sem danificar a mesma. O derrube da pedra foi efetuado com uma marreta (Figura 35a e Figura 35b). Salienta-se a especial atenção no decorrer da demolição, com a preocupação de recolher o máximo de informação, principalmente no método construtivo da alvenaria, informação que se revelou muito útil quando se realizou a construção dos muretes em laboratório.



**Figura 35** – Segunda fase de demolição da parede: a, b) demolição parcial da alvenaria de pedra; c) conjunto de amostras recolhidas após demolição.

Uma vez a alvenaria de pedra destruída (Figura 35c), procedeu-se à limpeza desta de modo a livrar a pedra de todas as impurezas e argamassa provenientes da alvenaria destruída. Após limpeza, o total de pedra proveniente das demolições foi transportada e armazenada em laboratório (Anexo D).

#### 6.1.2.2. Argamassa de assentamento

De forma a utilizar uma cal semelhante ao que se utilizava na construção de edifícios históricos optou-se por utilizar cal viva em pó e proceder à sua hidratação/extinção.

Os utensílios utilizados para a hidratação da cal foram:

- Cal viva em pó da marca Maxical [34] em sacos de 20 kg;
- Utilização de um recipiente de aproximadamente 50 cm de altura;
- Uso de uma pá de madeira longa para agitar a cal durante o processo de hidratação;
- Equipamento de proteção individual nomeadamente óculos, luvas e roupa de proteção.

As etapas para obter a cal em pasta, começaram por encher o recipiente com 20 cm de água, posteriormente adicionou-se a cal viva com o cuidado de esta adição ser lenta até encher o fundo do recipiente completando cerca de 15 cm de altura. Logo após a colocação da cal no recipiente iniciou-se o processo de mistura, sendo este contínuo até a mistura não apresentar sinal de efervescência e não se sentir na pá qualquer aglomerado no fundo do recipiente.

Para garantir uma ótima extinção teve-se o cuidado de manter sempre a cal abaixo do nível da água e o processo de mistura sem interrupções para evitar aglomeração do material, ou que o material queime (Figura 36a e Figura 36b). Salienta-se que quando a cal virgem (óxido de cálcio) é convertida em pasta de cal (hidróxido de cálcio) durante uma reação exotérmica com grande desprendimento de calor, calor este de fácil percepção durante a extinção quer pela temperatura sentida nas luvas de proteção, quer pela visualização do vapor libertado (Figura 36c e Figura 36d).

Todos os recipientes com cal em pasta foram cobertos com plásticos após a extinção, sendo estes utilizados uma semana após a sua extinção de modo a garantir o seu arrefecimento e que a cal continuasse a absorver a água de modo a melhorar a sua qualidade. O aspeto da pasta de cal obtida no final do processo é ilustrado na Figura 36.



**Figura 36** – Processo de hidratação da cal: a) mistura do material; b) fim da mistura do material; c) libertação de calor; d) aspeto final da cal em pasta.

### 6.1.3. Tecnologia construtiva

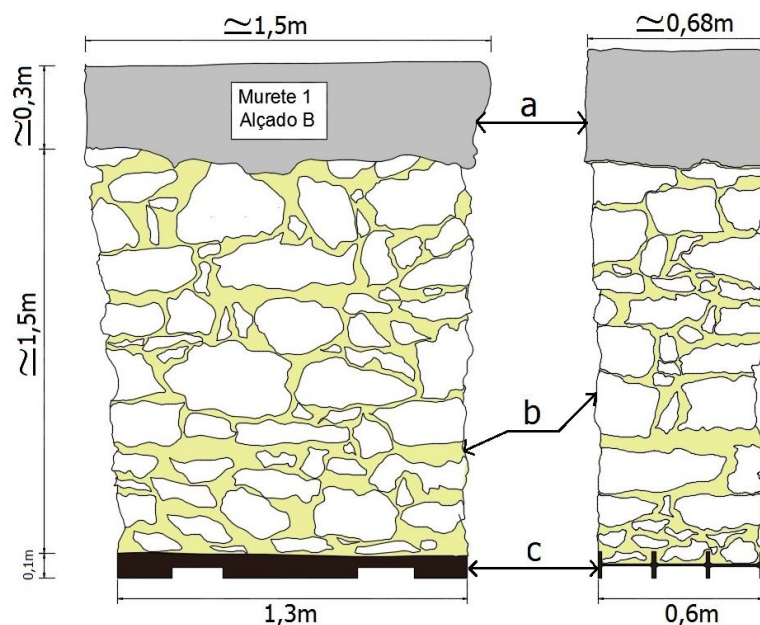
A performance estrutural de uma alvenaria pode ser percebida caso se disponha de fatores/dados tais como [35]:

- geometria;
- características de textura da alvenaria;
- paredes simples ou de folha múltipla;
- ligação entre folhas;

- juntas vazias ou preenchidas com argamassa;
- características físicas, químicas e mecânicas dos seus constituintes (blocos, calços, vazios e argamassa);
- as características da alvenaria como um material composto.

Assim, como já anteriormente referido procedeu-se a uma inspeção a um vasto número de edifícios do CHL de modo a saber e perceber os fatores/dados acima mencionados. Após esta inspeção e principalmente com a demolição da alvenaria referido em 6.1.2.1, conseguiu-se recolher dados suficientes de modo a proceder à construção dos muretes em laboratório, construção esta respeitando todos os dados recolhidos.

Foi definido a construção de duas paredes de alvenaria de pedra argamassada com dimensões  $[1,3 \times 1,5 \times 0,6\text{m}^3]$  – [comprimento x altura x largura], respetivamente, como ilustra a Figura 37.



**Figura 37** – Dimensões adotadas para os muretes construídos: a) lintel em betão armado ( $1,4 \times 0,64 \times 0,3\text{m}^3$ ); b) alvenaria ( $1,4 \times 0,64 \times 1,5\text{m}^3$ ); c) base metálica ( $1,3 \times 0,6 \times 0,1\text{m}$ ).

Relativamente à secção transversal vertical das paredes construídas, são classificadas segundo [4]:

- Secção transversal: dois panos com ligação;
- Aparelho: juntas desalinhasadas;
- Assentamento: aleatório;
- Espessura da junta: junta corrente com aproximadamente 3 cm.

A pedra utilizada como referido no capítulo 6.1.2.1 foi proveniente da demolição de alvenarias de pedra do CHL sendo classificada como:

- tipo de pedra: calcário;
- dimensão alçado (diagonal elemento): grande (segundo Pagaimo [4] > 25cm), pois apresenta uma dimensão média de 32 cm;
- estado de conservação: sã.

Também a argamassa utilizada foi alvo de classificação sendo esta caracterizada por:

- função da argamassa: assentamento;
- consistência: tenaz;
- tipo: cal hidráulica.

Ainda em relação à argamassa utilizada na ligação dos blocos, foi definido o traço 1:3 (uma medida de cal em pasta, três medidas de areia) e o processo de mistura foi mecânico, com recurso a uma betoneira elétrica, com a seguinte ordem de entrada dos materiais: água, cal em pasta e areia.

Um dos cuidados tidos em conta na construção das paredes, foi o facto de estas terem as dimensões que cumprissem os requisitos impostos pelas normas regulamentares, principalmente em altura, relativamente ao ensaio de macacos planos, assunto que será explicado de forma mais pormenorizada no capítulo 6.3. A construção dos muretes foi efetuada em três fases, intercaladas de uma semana, permitindo um tempo de secagem que garantisse a estabilidade das paredes.

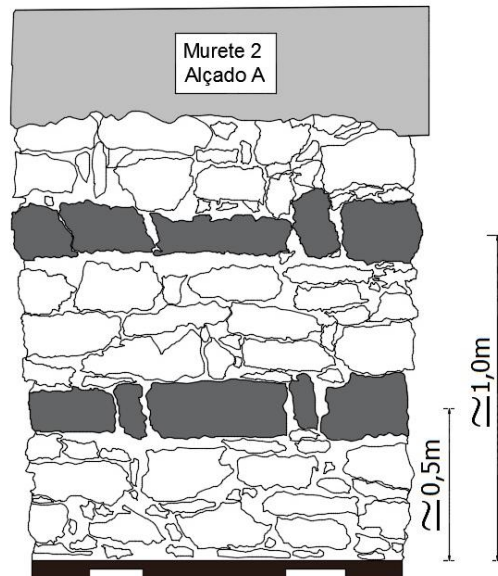
Na primeira fase de construção, foram elevados os panos de alvenaria até uma altura de 40 cm, como é demonstrado nas Figura 38a,b e c.



---

**Figura 38** – Primeira fase de construção: a e b) seção transversal; c) alçado frontal.

Para uma melhoria do travamento vertical da alvenaria, preparou-se pedras com dimensão superior à dimensão média da pedra de assentamento, denominados como perpianhos, com espessura próxima da secção transversal do murete em alguns casos.



**Figura 39** – Identificação das zonas e respectivas distâncias onde foram colocados os perpianhos.

Estes elementos foram colocados a 1/3 e 2/3 da altura dos muretes (0,5 m e a 1,0 m) acima das bases de apoio (Figura 39). Foram utilizados os perpianhos uma vez que aquando a demolição das paredes para a obtenção da pedra, verificou-se a presença destes elementos. Assim, passados dois dias da execução da primeira fase de construção, foram colocados os perpianhos (travadouros) a 1/3 da altura do murete correspondente a 0,5 m (Figura 40).



**Figura 40** – Colocação dos perpianhos: a) alçado frontal; b) seção transversal.

A segunda fase de construção dos muretes, foi executada passado sete dias e foi construída até atingir uma altura de 1,0 m da base (Figura 41a e Figura 41b) e colocação dos perpianhos a 2/3 da altura da parede, correspondendo a altura de 1,0 m já construído (Figura 41c e Figura 41d).



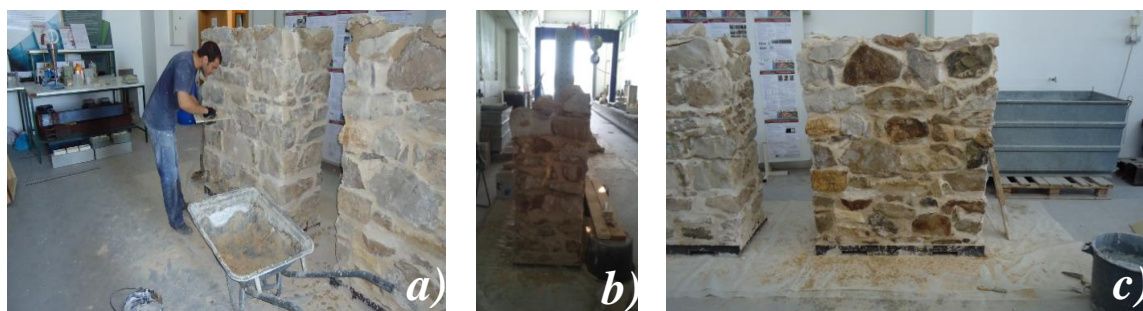
**Figura 41** – Segunda fase de construção: a) alçados frontais; b) seção transversal; c) alçado frontal-colocação perpianhos; d) seção transversal-colocação perpianhos.

A execução das alvenarias foi terminada após uma semana de cura atingindo uma altura de 1,5 m (Figura 42).



**Figura 42** – Fase final de construção: a) alçados frontais; b) seção transversal.

Terminadas a fases de execução das alvenarias de pedra, bastou fazer a retificação de algumas juntas, passando pelo preenchimento de alguns vazios deixados nas fases de construção e proceder à respetiva limpeza da pedra e juntas com água e esponja como é ilustrado na Figura 43.



**Figura 43** – Últimos preparos realizados sobre os muretes: a) retificação juntas – alçado frontal; b) retificação juntas – secção transversal; c) limpeza de uma das alvenarias.

#### 6.1.3.1. Base das paredes

Foram escolhidos como opção para a base das paredes o uso de perfis metálicos. O tipo de PM's escolhidos foram três IPE 200 devidamente soldados (Figura 44a) e rigidificados (Figura 44b) de modo assegurar a estabilidade destes no momento do ensaio à compressão das paredes. Para o transporte das paredes do local de armazenamento até ao pórtico utilizado para o ensaio, foram realizadas duas aberturas em todos os perfis de modo a que fosse permitida a entrada de cintas de 10 toneladas, garantindo que as paredes mais tarde fossem elevadas e transportadas por uma ponte rolante para junto do pórtico (Figura 44).



**Figura 44** – Preparação da base das paredes: a) três perfis metálicos IPE200 soldados; b) reforço dos perfis metálicos; c) sistema de transporte das alvenarias.

### 6.1.3.2. Distribuição das cargas no topo das alvenarias

Passados dois meses da construção dos muretes foram construídos lintéis em betão armado, que iriam funcionar como elemento de uniformização dos topos e também de distribuição das cargas aplicadas sobre os muretes. Os lintéis apresentam uma disposição construtiva idêntica às áreas dos topos dos muretes com uma altura aproximada de 30 cm.

Para a construção dos lintéis foi necessário estruturar uma cofragem em madeira respeitando as dimensões dos muretes Figura 45.



**Figura 45** – Execução das cofragens dos lintéis: a) alçados frontais; b) alçado transversal.

Antes da colocação da cofragem foi fixa uma tela asfáltica devidamente aquecida, de modo a ter um ajuste concordante com a definição geométrica das pedras salientes no topo dos muretes. A tela tinha como função, impermeabilizar os muretes de modo a que a água do betão a colocar no lintel não comprometesse os dois meses de cura já então atingidos. Uma vez finalizada a construção, os lintéis apresentavam uma superfície ligeiramente desnivelada e com irregularidades. Assim de forma a obter uma superfície nivelada e sem irregularidades, foi utilizado um ligante de epóxi em dois componentes para colagens e enchimentos do tipo Sika Icosit KC auto-nivelante. Deste modo garantiu-se o perfeito nivelamento do lintel, onde iria assentar uma viga metálica HEB 300 de distribuição de cargas nos ensaios a realizar.



**Figura 46** – Execução do lintel: a e b) colocação da armadura e tela asfáltica; c) aplicação do ligante epoxi.

## 6.1.4. Preparação dos muretes para os ensaios

### 6.1.4.1. Transporte

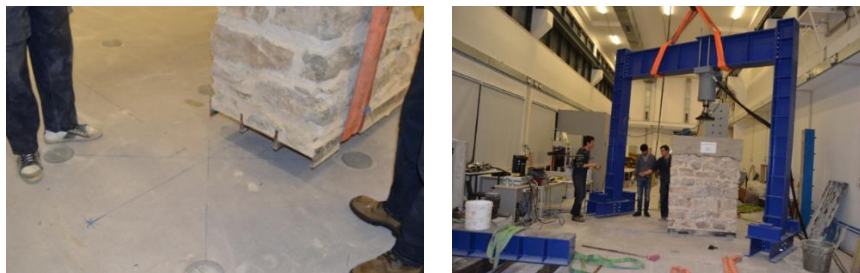
O deslocamento dos muretes do local de construção para o local de ensaio, foi garantido por um sistema de transporte de cargas (ponte rolante de 20 Ton.) e pelos elementos preparados para a construção dos muretes, nomeadamente as argolas metálicas inseridas no lintel e as furações feitas nos perfis metálicos constituintes da base, onde iriam passar as cintas de 10 Ton. O sistema de transporte revelou-se eficaz, uma vez que não se presenciou o aparecimento de qualquer tipo de fissuração nos muretes.



**Figura 47** – Sistema de transporte dos muretes.

### 6.1.4.2. Preparação do pórtico

Foi necessário movimentar o pórtico de reação através do uso de uma ponte rolante, devido à impossibilidade de colocar os muretes abaixo do mesmo. Assim, foram realizadas marcações (Figura 48a) na laje de pavimento, que garantissem que o sistema pórtico-atuador-murete estaria devidamente centrado. De seguida colocou-se o murete no local a ensaiar e movimentou-se o pórtico para as marcações efetuadas (Figura 48b).



**Figura 48** – Movimentação do pórtico e murete: a) marcações do local a colocar murete; b) movimentação do pórtico.

## 6.2. Ensaios de identificação dinâmica

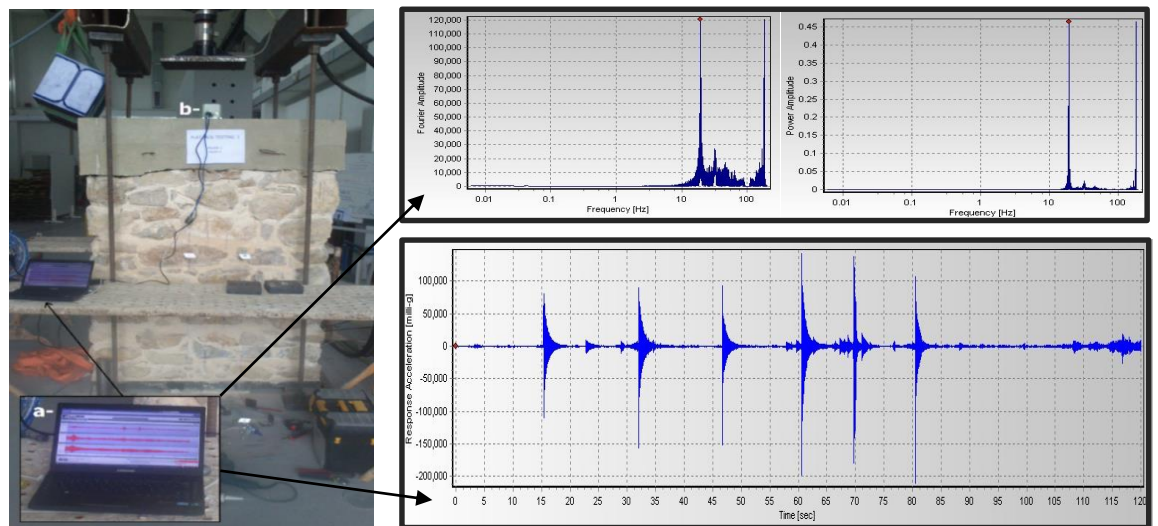
Antes de efetuar os ensaios com macacos planos e de compressão axial sobre os muretes, foram realizados ensaios de identificação dinâmica. Foi assumido para os muretes um desempenho em consola de um elemento com secção transversal constante, encastrado na base e com massa uniformemente distribuída em altura. Os módulos de elasticidade médios dos muretes podem ser estimados segundo a expressão [6]:

$$E = \frac{\omega^2}{1.875^4} \cdot \frac{mL^4}{I} \quad [6]$$

em que:

- E – módulo de elasticidade médio do murete;
- $\omega$  – frequência do murete [rad/s];
- m – massa do murete por unidade de comprimento;
- L – altura total do murete (base + murete + lintel);
- I – momento de Inércia da secção transversal.

Assim, através de um sismógrafo foram feitas leituras das frequências próprias na direcção vertical transversal (Figura 49). Das acelerações lidas no sismógrafo derivou-se a frequência de 19,5 Hz e 13 Hz na direcção transversal das paredes 1 e 2 obtendo um módulo de elasticidade de 1,02 GPa e 0,46 GPa respetivamente.



*Figura 49 – Leitura com sismógrafo de acelerações: a) computador portátil; b) sismógrafo.*

## 6.3. Ensaios com macacos planos

### 6.3.1. Equipamento empregue nos ensaios *em Laboratório*

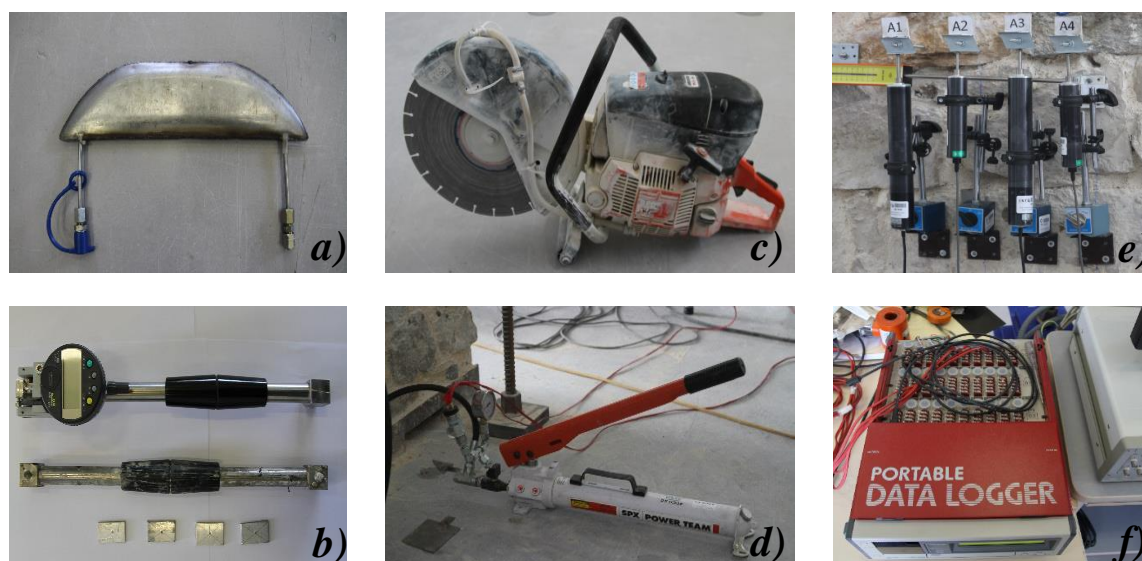
O equipamento utilizado para a realização dos ensaios com macacos planos em laboratório, difere relativamente ao equipamento utilizado nos ensaios *in-situ*, nomeadamente no tipo de bomba hidráulica, equipamento de registo/medição de distâncias e deslocamentos, como também no equipamento de aquisição de dados.

Os diversos equipamentos empregues são expostos na Figura 50. Foram utilizados macacos planos de configuração geométrica semioval com 100 mm de profundidade, 400 mm de comprimento e 3 mm de espessura (Figura 50a), denominados como MPSO1Inf. e MPSO2Sup. (em dia de ensaio o conjunto de macacos era reforçado com mais dois macacos de reserva como medida preventiva). Estes foram devidamente calibrados em laboratório (tópico 6.3.6.2). A máquina de corte para abertura dos rasgos foi um “moto-disco” a gasolina com disco adiamantado (Figura 50c). O sistema hidráulico era composto por uma bomba manual da marca Powerfix (Figura 50d), bomba esta preparada para ser ligada a dois macacos planos através de mangueiras flexíveis e também dois derivadores hidráulicos acoplados à mesma, que permitiam a ligação em paralelo de um manómetro (25 bar) e um transdutor de pressões da marca Druck com capacidade de 100 bar. O transdutor estava ligado a uma fonte de alimentação externa e também a um data logger para registo dos resultados.

O sistema hidráulico utilizado respondia ao critério de ser capaz de manter uma pressão constante num intervalo de tempo no mínimo de 5 minutos.

Relativamente ao ensaio simples as distâncias foram registadas com um alongâmetro.

Para o ensaio duplo o registo das deformações foi feito através de 4 defletómetros verticais e 1 horizontal devidamente conetados ao *data logger* usado no ensaio. O sistema de aquisição de dados utilizado foi um *data logger* (Figura 50f), onde estavam conetados todos os defletómetros (Figura 50e) e o transdutor de pressão. Para o registo de eventos foi utilizada uma máquina fotográfica. Foi necessário material diverso, material este exposto nos subtópicos de preparação e execução dos ensaios, 6.3.2, 6.3.3 e 6.3.4 respetivamente.



**Figura 50** – Equipamento empregue nos ensaios de macacos planos em laboratório: a) macaco plano MPSO1Inf.; b) alongâmetro; c) moto-disco; d) sistema hidráulico; e) LVDT's fixos com bases magnéticas (estrutura auxiliar com cantoneiras e pivots); f) data logger.

## 6.3.2. Trabalhos preparatórios

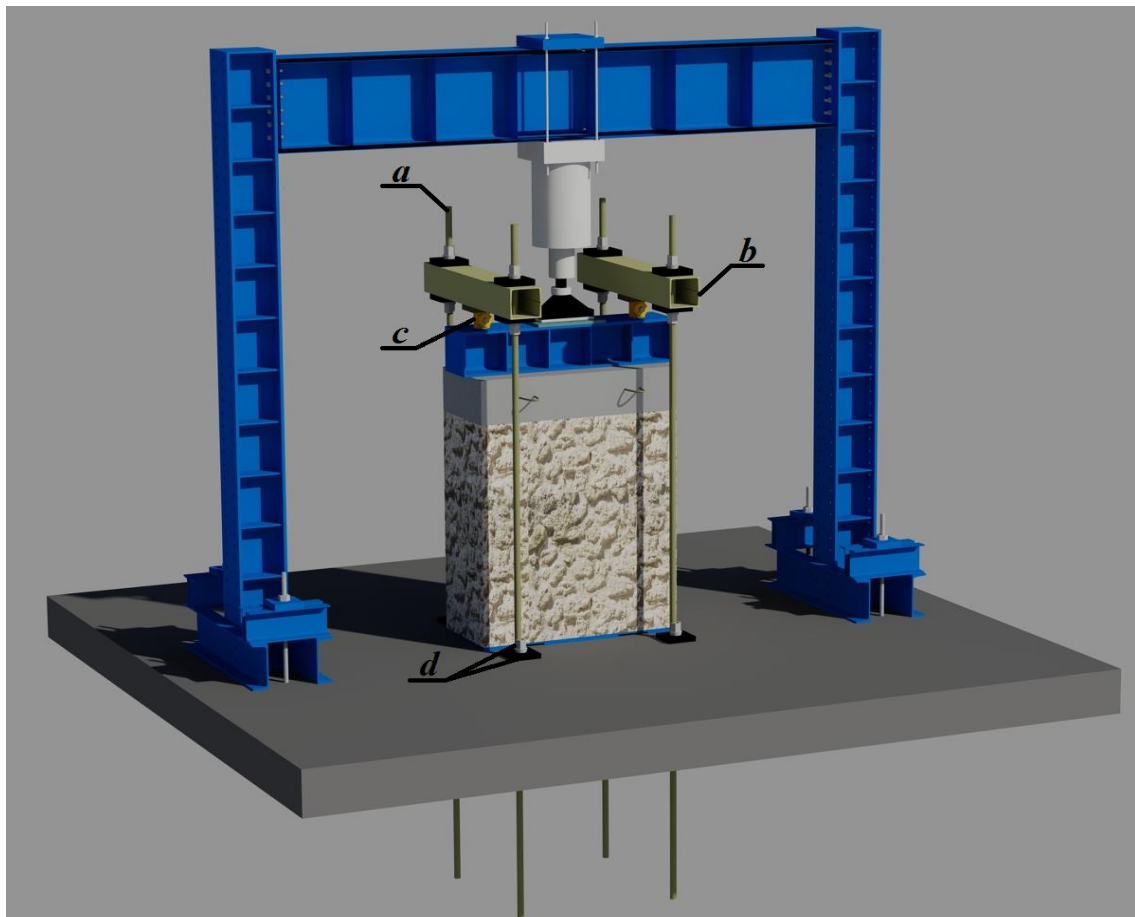
Antes de se dar início aos ensaios, foi necessário realizar um conjunto de trabalhos preparatórios que serão descritos nos tópicos que se seguem.

### 6.3.2.1. Aplicação da carga estimada no murete

Uma vez estimadas as cargas nos edifícios ensaiados no Centro Histórico de Leiria para a realização dos ensaios com macacos planos *in-situ*, foi estimada uma carga a aplicar nos muretes a ensaiar em laboratório para os ensaios com macacos planos. Esta carga tinha como objetivo simular as cargas existentes de um edifício corrente do CHL.

O valor de carga estimado foi aplicado com recurso a equipamento do LEBA (a descrição do equipamento em pormenor encontra-se em 6.4.2.2), nomeadamente um pórtico de reação com respetivo equipamento de aquisição de dados. Uma vez aplicada a carga no murete, foi montado um sistema composto por 4 varões de pré-esforço *Dywidag* com 26,5 mm de diâmetro, dispostos verticalmente em que as extremidades inferiores iriam ser fixas à laje de pavimento e as extremidades superiores iriam ser fixas a dois perfis metálicos tubulares. De modo a garantir uma uniformidade na distribuição das cargas verticais nos ensaios de compressão axial foi colocado no topo do lintel do murete uma viga metálica HEB300 reforçada com nervuras verticais. Entre a viga metálica de distribuição de cargas e os perfis

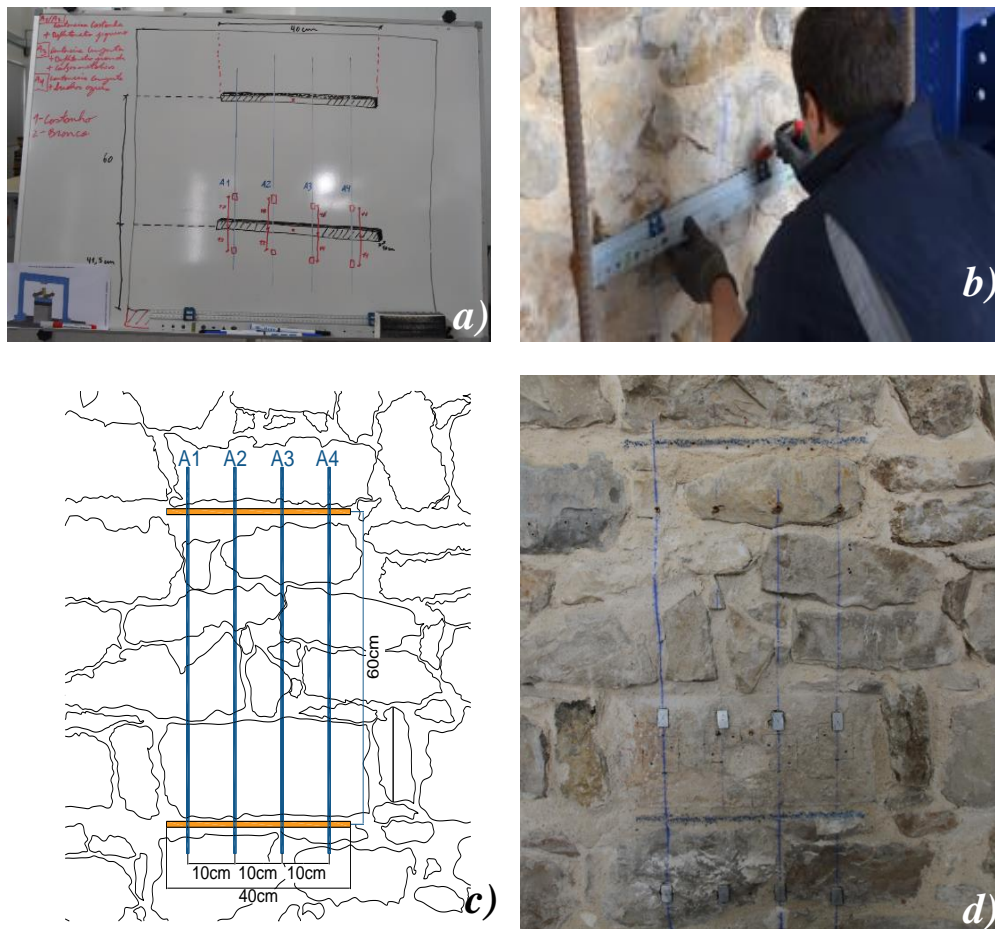
metálicos tubulares foram colocadas duas células de carga de 500 kN cada, da marca TML do tipo CLC-500. Finalizada a montagem do sistema e estando a carga estimada aplicada pelo atuador no murete, bastou proceder ao aperto das porcas de fixação *Dywidag*-perfis tubulares, aperto este finalizado uma vez atingido o valor de carga estimado nas células de carga, valor observado num data logger conetado às células. Todo o sistema de aplicação da carga pode ser consultado na Figura 51.



**Figura 51** – Sistema de aplicação da carga estimada: a) *Dywidag*; b) perfil metálico (secção tubular); c) célula de carga 500 kN; d) porcas e chapas metálicas de fixação do sistema.

#### 6.3.2.2. Definição da localização dos alinhamentos

Após consulta da norma ASTM C 1197-91a [20] foram definidas as distâncias para a marcação dos alinhamentos e rasgos (Figura 52) de forma a cumprir os pressupostos da mesma. Uma vez sinalizada a zona a realizar os rasgos foram marcados os alinhamentos batendo uma linha azul. Foram definidos quatro alinhamentos verticais identificados como A1, A2, A3, A4 e um alinhamento horizontal correspondendo a identificação A5.



**Figura 52** – Marcação dos alinhamentos e rasgos: a,b,c) definição das distâncias; d) aspecto do murete após marcação dos alinhamentos e rasgos.

Como esclarece a Figura 52, os critérios da norma ASTM C 1197-91 [20] foram cumpridos pois as distâncias entre rasgos tomam o valor de uma vez e meia o comprimento do macaco utilizado ( $1,5 \times 40 \text{ cm} = 60 \text{ cm}$ ).

### 6.3.2.3. Aplicação dos pontos de referência

Como pontos de referência, para medição com alongâmetro, relativamente ao ensaio simples, foram utilizadas chapas de alumínio devidamente preparadas para as leituras com alongâmetro. Assim, uma vez que o alongâmetro é constituído por dois elementos cónicos que servem de pontos de leitura, foi necessário achar o centro das chapas de alumínio e com um punção criar uma cavidade com as mesmas dimensões das extremidades cónicas do alongâmetro, para que as leituras fossem as mais precisas possíveis. Estas chapas metálicas foram fixas ao murete através de um mástique à base de silicone. Este sistema de pontos de referência revelou ser bastante eficaz uma vez que não se observou qualquer tipo de movimento ou que as mesmas se descolassem durante as leituras.

Uma vez definidos os alinhamentos, os pontos de referência inerentes ao ensaio duplo devem segundo a norma ter uma distância mínima vertical de 400 mm e o provete delimitado pelos mesmos pontos deve abranger pelo menos duas juntas de argamassa.

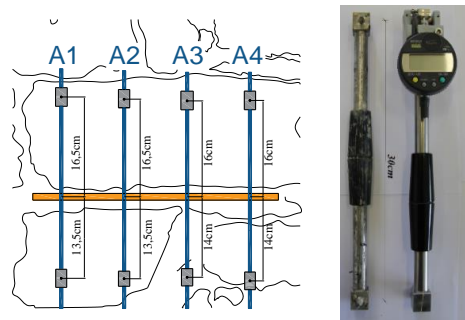
No ensaio duplo foi utilizado um conjunto de aparelhos de medição de deslocamentos (LVDT's), correspondendo cada LVDT a um alinhamento. Assim foi necessário utilizar equipamento/materiais que permitissem o suporte dos LVDT's e também um sistema de batente para a realização das leituras.

Para o suporte dos LVDT's foram fixas cantoneiras no murete através do uso de buchas metálicas e parafusos. Para os pontos de referência superiores foram aplicados pivots normalmente usados na aplicação dos tetos falsos constituídos por bucha metálica de latão, varão roscado M6 e o pivot onde iria embater os cursos dos LVDT's. Este sistema revelou eficácia pois a fixação do mesmo no murete era feito num único ponto que facilitava a fixação em locais muito irregulares. Outra vantagem deste material era a fácil aplicação e o conjunto varão roscado-pivot ser fixo com um sistema de porca-contra porca que garantia que os resultados não iriam ser comprometidos por deslocamento dos pontos de referência. Todas as furações para aplicação das cantoneiras e dos pivots foram executadas com um berbequim com broca apropriada.

### 6.3.3. Ensaio simples

Com a aplicação dos pontos de referência, iniciou-se o ensaio simples começando por registar as distâncias iniciais com alongâmetro.

Os pontos de referência inicialmente teriam uma distância na vertical de 30 cm (Figura 53) pois a bitola do alongâmetro usado no processo de colagem das miras tinha esta distância.



**Figura 53** – Distâncias definidas para as miras de referência para o ensaio MLI.

Uma vez definidos os pontos de referência, efetuou-se o registo das posições iniciais com alongâmetro (Figura 54a), antes de proceder à abertura do rasgo. O alongâmetro é um aparelho de medição que requer muita sensibilidade no seu uso, por isso efetuou-se três medições para cada alinhamento, registadas sempre pelo mesmo utilizador de modo a limitar o erros de medição.

Seguiu-se a abertura do rasgo, correspondente ao ensaio simples, cujo local foi previamente marcado e realizou-se a limpeza com jato de ar (Figura 54b e Figura 54c). Após a limpeza do rasgo foram registadas (3 leituras para cada alinhamento) as distâncias correspondentes à libertação de tensão proveniente da ausência de material no rasgo (Figura 54d).

O passo a seguir passou pela introdução no rasgo do conjunto macaco-químico, sendo em alguns casos necessário a utilização de chapas de enchimento (Figura 54e). Logo de seguida foi feita a ligação do sistema hidráulico ao macaco (Figura 54f), procedendo à purga do macaco (Figura 54g), pois o equipamento adotado em laboratório não era munido do sistema de encaixe rápido. Finalizada a purga do macaco, realizou-se o aperto dos componentes hidráulicos. Antes de proceder ao restabelecimento das distâncias iniciais, foi realizado um ajuste do macaco ao rasgo, ajuste correspondente a uma aplicação de pressão na bomba equivalente a 50% da tensão local estimada na parede, despressurizando o sistema logo de seguida até zero.

Para finalizar a ultima etapa do ensaio simples, foram adotados incrementos de pressão de 0,05 MPa (Figura 54h), incrementos impostos em intervalos de um minuto. Para cada incremento foram realizadas três leituras para cada alinhamento (Figura 54i). Os ciclos de carga tiveram fim, uma vez atingidas as distâncias iniciais, dando como encerrado o ensaio simples.

Nos ensaios simples com macacos planos realizados em laboratório, foram tomados como referência a teoria presente no capítulo 3.3.

Foram realizados quatro ensaios simples nos muretes em estudo, nomeadamente um ensaio em cada alçado. Todos os ensaios foram realizados sob as mesmas condições, nomeadamente o equipamento e o operador.

Todos os ensaios foram realizados a uma temperatura ambiente de 26°.



**Figura 54** – Protocolo utilizado no ensaio simples em laboratório: a) leitura das dist. 's iniciais; b,c) abertura e limpeza do rasgo; d) leitura das dist. 's após abertura do rasgo; e) introdução do conjunto macaco-químico no rasgo; f) ligação do sistema hidráulico; g) purga do macaco; h) incrementos de carga para reposição das distâncias iniciais; i) leitura das dist. 's após incrementos de carga.

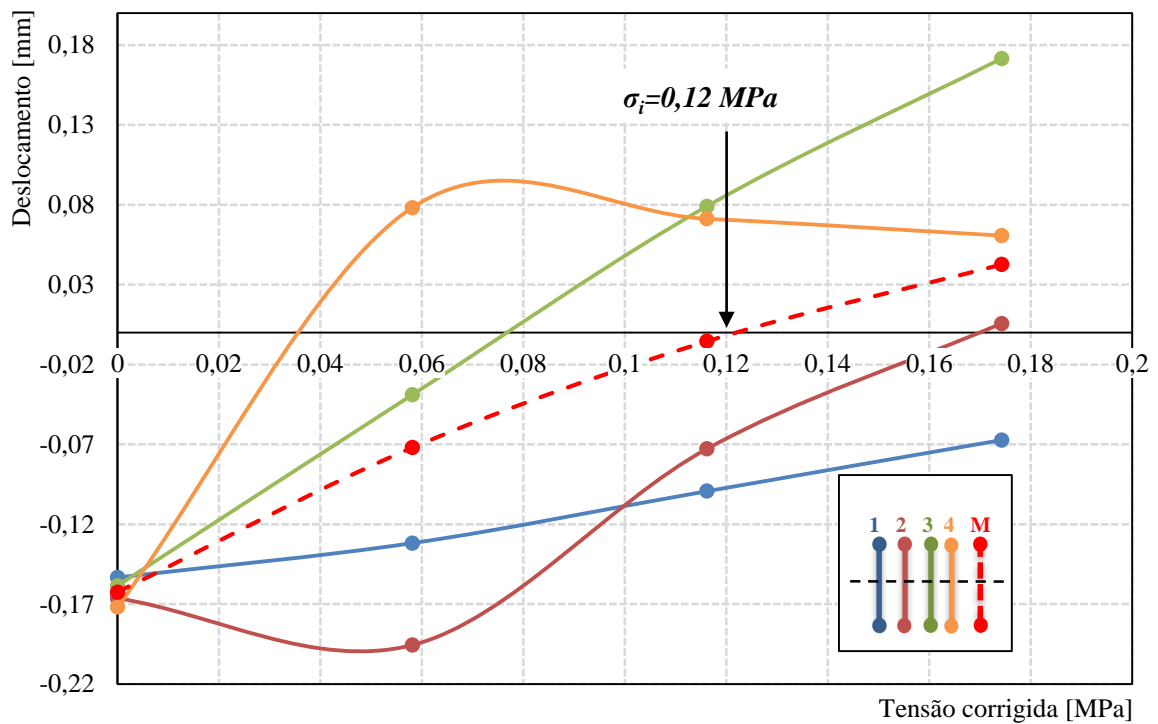
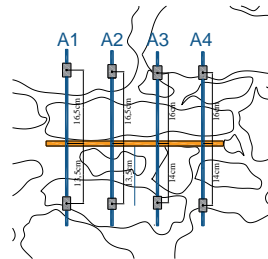
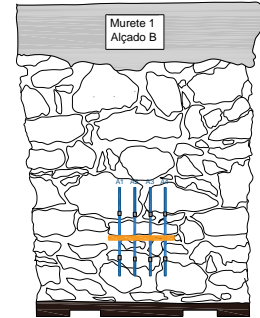
### 6.3.3.1. Estimativa das tensões instaladas

Finalizado o trabalho em laboratório, procedeu-se ao tratamento de dados provenientes dos ensaios simples para a estimativa de tensões instaladas. No Quadro 20 é apresentado o número de ensaios realizados, assim como o tipo macaco plano utilizado para cada ensaio efetuado.

No Quadro 19 são apresentados todos os resultados obtidos correspondentes ao ensaio de macacos planos MLI – Murete 1 – Alçado A. Os resultados obtidos relativamente aos outros ensaios realizados serão expostos no anexo E.

**Quadro 19 – Síntese dos resultados obtidos no ensaio simples MLII [adap.31].**

Flat Jack Testing MLII				
Murete 1 – Alçado B – Ensaio Simples				
Ensaio:	Simples			
Murete:	1			
Macaco Plano:	MPSO1Inf.			
Ka:	0,61			
Km:	0,69			
Tensão instalada, $\sigma_i$ (MPa): 0,12				
	A1	A2	A3	A4
Distâncias Iniciais [mm]	295,551	295,269	294,927	295,797
Observações:	1 – Foram realizadas três leituras para cada incremento de pressão;			



Pressão no macaco (Psi)	A1 (mm)	A2 (mm)	A3 (mm)	A4 (mm)	Tensão não corrigida (MPa)	Tensão corrigida (MPa)
0	295,398	295,103	294,769	295,626	0,000	0,000
20	295,419	295,074	294,888	295,876	0,138	0,058
40	295,452	295,196	295,006	295,869	0,276	0,116
60	295,484	295,269	295,099	295,858	0,414	0,174

**Quadro 20** – Número de ensaios realizados e tipo de macaco utilizado.

Ensaio Flat Jack	Muretes		Secção e nome do macaco*
	1	2	
Simples	2	2	MPSO1
Duplo	2	2	MPSO2

Nota\*: MPSO toma o significado de macaco plano semioval.

### 6.3.3.2. Estimativa das tensões instaladas por cálculo analítico

Para realizar a estimativa de tensões instaladas nos muretes, foi necessário ter em conta os valores associados aos elementos para ensaios e elementos a ensaiar. Os elementos considerados no trabalho experimental estão presentes no Quadro 21.

**Quadro 21** – Cargas consideradas para a estimativa de tensões instaladas.

Elementos	
Peso volúmico do murete	22,6 kN/m <sup>3</sup>
Peso do Lintel (betão armado)	1,4 m x 0,64 m x 0,3 m x 25 kN/m <sup>3</sup> = 6,72 kN
Peso da viga metálica HEB300 + nervuras verticais de reforço	1,60 kN + 0,69 kN = 2,3 kN
Carga aplicada sobre o murete (perfis tubulares)	60 kN*

Nota\* Valor estimado por cálculo considerando os PP. de um edifício corrente do CHL.

Considerando as dimensões do murete [1,4 x 1,5 x 0,64 m<sup>3</sup>] – [comp. x alt. x esp.] e a cota onde se localiza o rasgo [0,41 m] as cargas consideradas foram:

- Carga exercida pelo PP. do murete até ao rasgo:  $22,6 \times ((1,5-0,41) \times 0,64) / 1,4 = 11,26 \text{ kPa}$
- Viga metálica 2,95 kPa
- Lintel 7,5 kPa
- Carga aplicada sobre o murete 76,92 kPa

A carga total considerada nos ensaios na zona do rasgo para o ensaio simples é expressa pela soma das cargas dos elementos afetos ao murete correspondendo um valor de 0,1 MPa.

Uma vez terminado o processo de tratamento de dados, resta quantificar a variação de valores entre os resultados dos ensaios realizados *in-situ* no CHL, com os resultados obtidos por cálculo analítico (Quadro 22).

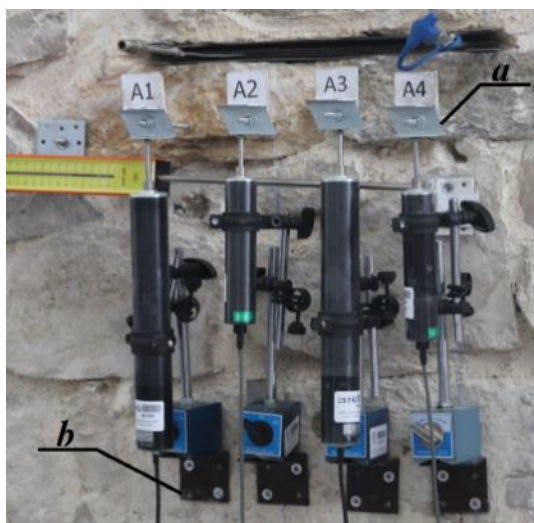
**Quadro 22** – *Quantificação da variação dos resultados pelos diferentes métodos.*

Ensaio	Tensão estimada por cálculo (MPa)	Tensão estimada pelos ensaios simples (MPa)	Variação (%)
Murete I	Alçado A	0,074	-16,7
	Alçado B	0,120	+35%
Murete II	Alçado A	0,084	+19%
	Alçado B	0,162	-38,3%

Nota: \*Foram consideradas as diferentes cotas dos rasgos de cada ensaio, obtendo o mesmo valor de tensão

### 6.3.4. Ensaio duplo

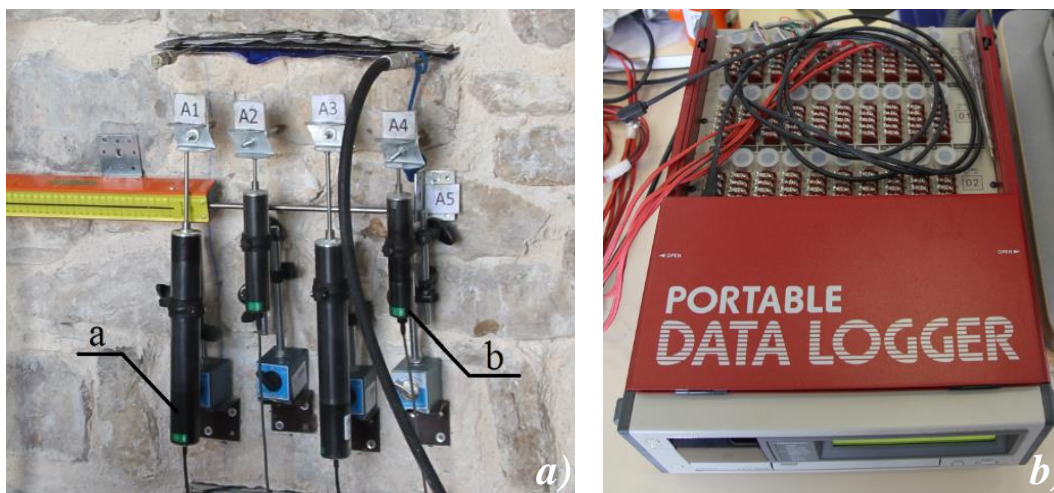
Com o término do ensaio simples iniciou-se o ensaio duplo. Começou-se por preparar o ensaio com a fixação de cantoneiras nos pontos de referência inferiores anteriormente definidos. Nos pontos de referência que delimitavam superiormente o provete (zona delimitada pelos rasgos) a ensaiar foram colocados os *pivot's* anteriormente abordados (Figura 55).



**Figura 55** – Sistema de suporte e batente para leituras com defletômetros: a) *pivot's*; b) cantoneiras.

Tal como nos ensaios com macacos planos *in-situ*, o macaco plano e os respectivos químicos utilizados no ensaio simples foram utilizados no ensaio duplo sem remoção dos mesmos. O passo a seguir foi a abertura do rasgo para o ensaio duplo (Figura 57a), paralelo ao primeiro realizado para o ensaio simples, cumprindo os pressupostos indicados pela norma como foi abordado anteriormente. Uma vez o corte realizado, foi limpo com jato de ar todos os detritos que se encontravam no interior do rasgo procedendo logo de seguida à colocação do conjunto macaco-químico no interior do rasgo (Figura 57b).

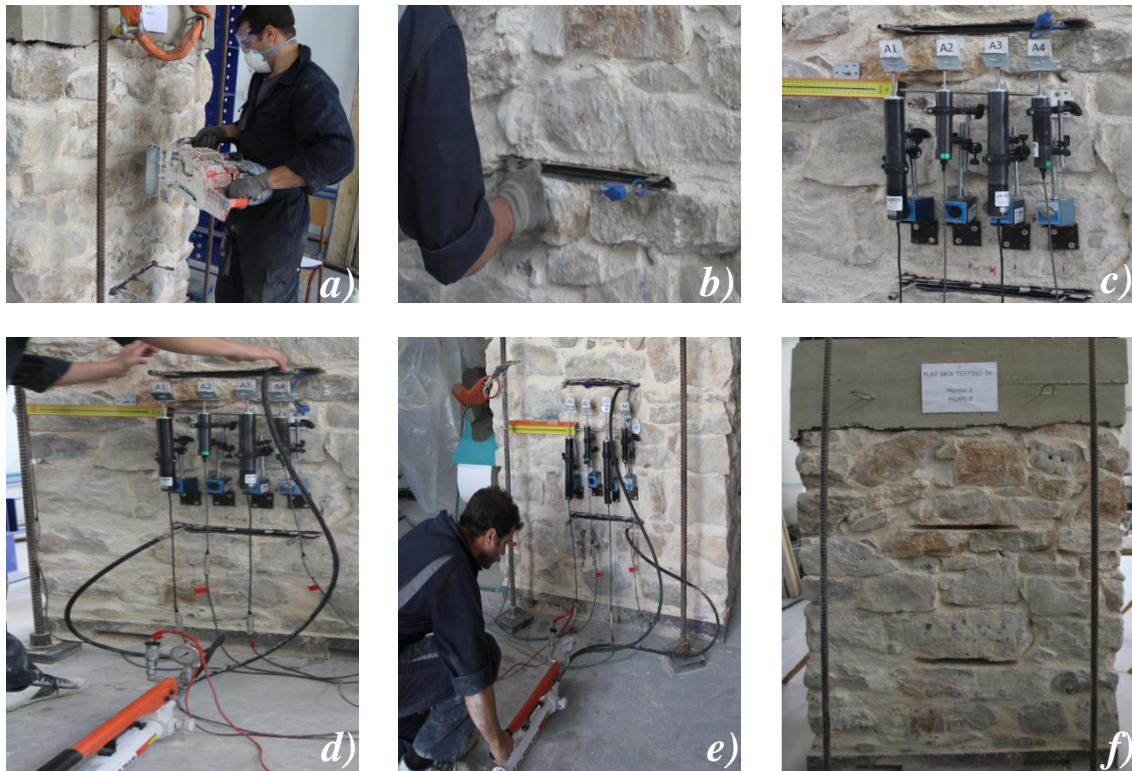
Foi necessário a inclusão de calços metálicos em alguns ensaios de modo a garantir o contato entre macaco e área de corte. Para começar o ensaio bastou proceder à instrumentação, passando pela instalação dos defletómetros (4 verticais e 1 horizontal) nas cantoneiras, que foi garantida através de bases magnéticas que proporcionaram a ligação cantoneira-defletómetro (Figura 57c). Os cursores dos defletómetros foram recolhidos e posteriormente libertados assim que estes estivessem em contato com os pivot's. Foi feita a ligação dos defletómetros ao sistema de aquisição de dados (data logger) e posterior verificação do seu correto funcionamento (Figura 56b). Foram utilizados defletómetros da marca TML, modelo CDP- 100 e CDP-100 Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Lda, com um curso de 50 e 100 mm e uma sensibilidade de  $50 \times 10^{-6}/\text{mm}$  e  $100 \times 10^{-6}/\text{mm}$  respetivamente (Figura 56a).



**Figura 56** – Instrumentação utilizada para o ensaio duplo (defletómetros e datalogger): a) LVT's com cursos 100 mm e 50 mm; b) Data logger.

Para finalizar a instrumentação foi conetado o sistema hidráulico ao macaco através de uma segunda mangueira, procedendo à purga e tal como no ensaio simples foi acoplado o transdutor de pressão do sistema hidráulico ao sistema de aquisição de dados (Figura 57d).

Foram realizados incrementos de pressão na ordem de 0,1 MPa, intervalados por pausas de aproximadamente um minuto (Figura 57e), garantindo uma estabilização do valor da pressão. Os ensaios duplos eram terminados uma vez sentida uma ausência de reação à aplicação de pressão na bomba hidráulica.



**Figura 57** – Metodologia adotada ensaio duplo em laboratório: a) abertura do rasgo; b) introdução do macaco plano; c) colocação dos LVDT's; d) ligação sistema hidráulico; e) ciclos carga-descarga; f) aspeto murete após ensaios de macacos planos.

A Figura 58 ilustra a vista geral do ensaio duplo realizado em laboratório.



**Figura 58** – Perspetiva geral da utilização da técnica de macacos planos - ensaio duplo.

Finalizado o ensaio duplo foi necessário remover todo o sistema de ensaio. Uma vez que se pretendia realizar ensaios de compressão nos muretes, foi necessário proceder ao enchimento com argamassa dos rasgos abertos para os ensaios com macacos planos, idêntica à utilizada na construção dos muretes (Figura 59).



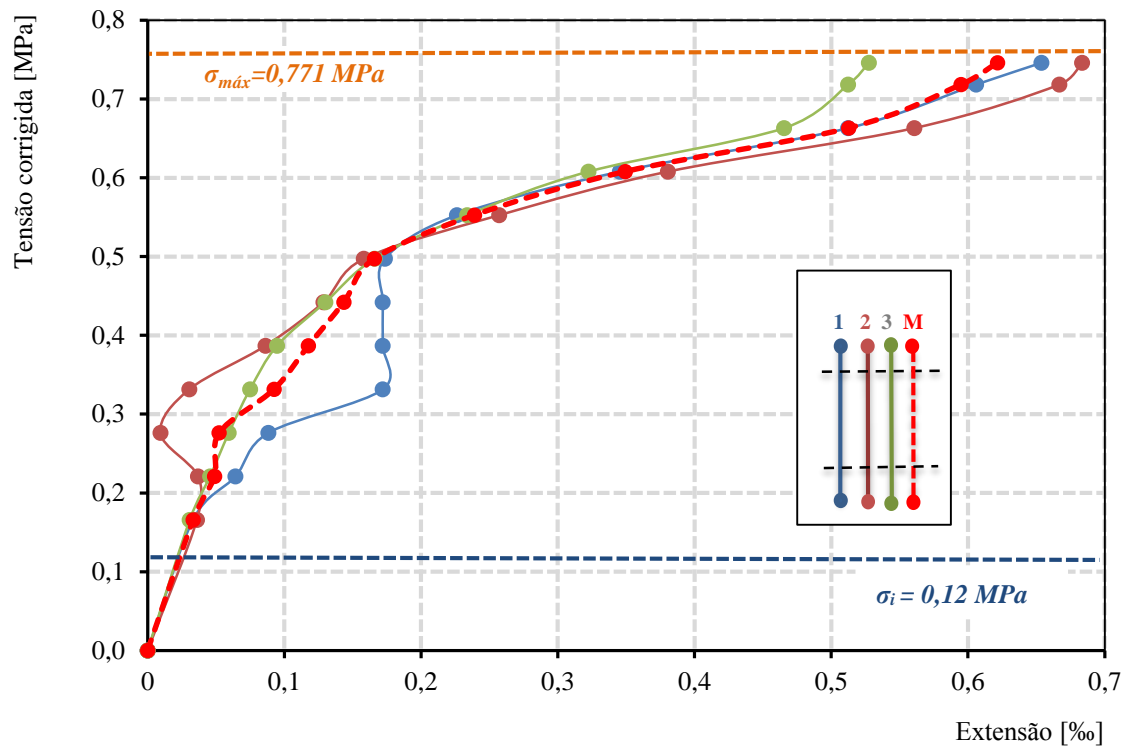
**Figura 59** – Preenchimento dos rasgos com argamassa.

### 6.3.5. Estimativa do módulo de elasticidade

Terminado o trabalho referente aos ensaios com macacos planos em laboratório, procedeu-se à análise e tratamentos dos dados obtidos. O Quadro 23 diz respeito ao ensaio MLII, podendo ser consultados todos os resultados relativos aos outros ensaios no anexo E.

**Quadro 23** – Valores obtidos correspondentes ao ensaio duplo MLII.

Flat Jack Testing MLII – Murete 1 – Alçado B			
Ensaio Duplo			
MPSO1	$K_a=0,61$	MPSO2	$K_a=0,627$
Inferior	$K_m=0,69$	Superior	$K_m=0,656$
Tensão instalada, $\sigma_i$ (MPa):		0,120	
Módulo de elasticidade, E (GPa):		2,57	
Tensão máxima, $\sigma_{m\acute{a}xima}$ (MPa):		0,771	
<p>Observações:</p> <p>1 – Para o alinhamento A4 não se obteve valores;</p> <p>2 – Valores incoerentes para o coeficiente de <i>Poisson</i> correspondente ao Alinhamento A5.</p> <p>3 – Não se procedeu à troca do papel químico entre o ensaio simples e duplo.</p>			



O Quadro 24 expõe a estimativa dos diversos módulos de elasticidade a partir das curvas tensão-extensão obtidas nos ensaios em laboratório.

**Quadro 24** – Valores dos diversos módulos de elasticidade obtidos nos ensaios em laboratório.

Ensaio	$E_0$ (GPa)	$E_{sec30\%}$ (GPa)	$E_{sec30-60\%}$ (GPa)	$1000 \times \sigma_{última}$ (GPa)
MLI	14,96	10,3	1,88	0,778
MLII	5,18	4,62	2,57	0,771
MLIII	----	----	----	----
MLIV	----	----	----	----

O Quadro 25 apresenta todos os valores das tensões obtidos nos ensaios de macacos planos em laboratório.

**Quadro 25** – Valores de tensão obtidos nos diversos ensaios em laboratório.

Ensaio	$\sigma_{instalada}$ (Mpa)	$\sigma_{máxima}$ (MPa)	$\sigma_{máx.} / \sigma_i$
MLI	0,074	0,778	10,51
MLII	0,120	0,771	6,425
MLIII	0,084	0,745	8,87
MLIV	0,166	----	----

## 6.3.6. Parâmetros do ensaio (Ka e Km)

### 6.3.6.1. Determinação do Parâmetro Ka

O método utilizado para a determinação do parâmetro Ka foi idêntica a apresentada em 5.5.1.

O Quadro 26 apresenta uma síntese dos valores de Ka para os ensaios com macacos planos em laboratório.

**Quadro 26** – Síntese dos valores de Ka obtidos para os ensaios em laboratório.

Referência Ensaio	Tipo de ensaio	Macaco Plano	Coeficientes de correção Ka	
			Ka	Ka corrigido
MLI	Simple	MPSO1Inf.	0,610	0,633
	Duplo	MPSO2Sup.	0,655	
MLII	Simple	MPSO1Inf.	0,610	0,627
	Duplo	MPSO2Sup.	0,643	
MLIII	Simple	MPSO1Inf.	0,59	0,630
	Duplo	MPSO2Sup.	0,661	
MLIV	Simple	MPSO1Inf.	0,57	0,576
	Duplo	MPSO2Sup.	0,581	

### 6.3.6.2. Parâmetro Km

O parâmetro Km para os ensaios com macacos planos em laboratório, foi determinado à semelhança da determinação para os ensaios *in-situ* (assunto abordado em 5.5.2), diferenciando-se no equipamento utilizado, nomeadamente no tipo de bomba hidráulica e no sistema de aquisição de dados.

A Figura 60 apresenta de forma geral o método e equipamento utilizado para a determinação do parâmetro Km para os ensaios realizados em laboratório.



**Figura 60** – Vista geral do método e equipamento para determinação do parâmetro Km para os macacos MPSO1 e MPSO2.

O método de calibração para os macacos utilizados em laboratório foi semelhante ao utilizado nas calibrações dos macacos utilizados nos ensaios *in-situ*, sendo diferenciados ao nível do equipamento utilizado nomeadamente:

- Bomba hidráulica (com manómetro)– Enerpac;
- Sistema de encaixe mangueiras;
- Macacos planos – MPSO1<sub>inf</sub> e MPSO2<sub>sup.</sub>;
- Transdutor de pressão;
- Sistema de aquisição de dados.

No Quadro 27 podem ser consultados os valores obtidos para os macacos MPSO1.

**Quadro 27 – Calibração macaco plano MPSO1.**

Transdutor de pressões [MPa]	Manómetro Bomba [MPa]	Célula carga [MPa]	Km's parciais c/ transdutor	Km's parciais c/ manómetro	T. de pressões [MPa]	M. Bomba [MPa]	Célula carga [MPa]	Km's parciais c/ transdutor	Km's parciais c/ manómetro	
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,004	0,95	0,661	0,695	0,658	
0,136	0,10	0,087	0,637	0,868	1,057	1,00	0,699	0,699	0,661	
0,199	0,15	0,127	0,639	0,848	1,110	1,05	0,737	0,702	0,664	
0,250	0,20	0,158	0,632	0,791	1,158	1,10	0,773	0,702	0,667	
0,299	0,25	0,189	0,634	0,757	1,205	1,15	0,804	0,699	0,667	
0,361	0,30	0,227	0,629	0,757	1,245	1,20	0,832	0,603	0,668	
0,423	0,35	0,268	0,633	0,765	1,301	1,25	0,873	0,698	0,671	
0,464	0,40	0,294	0,634	0,735	1,350	1,30	0,908	0,699	0,673	
0,511	0,45	0,325	0,636	0,722	1,399	1,35	0,946	0,701	0,677	
0,554	0,50	0,354	0,638	0,707	1,450	1,40	0,984	0,703	0,679	
0,605	0,55	0,387	0,640	0,703	1,513	1,45	1,025	0,707	0,677	
0,668	0,60	0,430	0,643	0,716	1,554	1,50	1,058	0,705	0,681	
0,718	0,65	0,463	0,645	0,715	1,604	1,55	1,096	0,707	0,684	
0,759	0,70	0,491	0,648	0,702	1,653	1,60	1,132	0,708	0,685	
0,803	0,75	0,523	0,651	0,697	1,699	1,65	1,168	0,708	0,687	
0,853	0,80	0,556	0,651	0,695	1,741	1,70	1,199	0,705	0,689	
0,918	0,85	0,601	0,655	0,707	1,793	1,75	1,237	0,707	0,690	
0,957	0,90	0,630	0,658	0,700	1,840	1,80	1,275	0,708	0,693	
								Média	0,721	0,659
								<i>Km<sub>médio</sub></i>	<i>0,69</i>	

Os resultados de todo o processo dos restantes Km's podem ser consultados no Anexo E. O Quadro 28 indica todos os valores de Km nos diversos processos de calibração.

**Quadro 28** – Síntese dos diversos valores obtidos no processo de calibração.

	Macaco Plano	MPSO1Inf.	MPSO2Sup.
K <sub>m</sub>	1ª calibração	0,689	0,638
	2ª calibração	0,690	0,663
	3ª calibração	0,691	0,668
	Média	0,690	0,656

### 6.3.7. Síntese dos valores obtidos ka e km

Apresenta-se de seguida no Quadro 29 um resumo dos valores dos parâmetros de ka e km correspondentes aos ensaios com macacos planos em laboratório.

**Quadro 29** – Síntese dos valores obtidos para ka e km.

Referência Ensaio	Tipo de ensaio	Referência Macaco Plano	Coeficientes de correção		
			Ka	Ka corrigido	Km
MLI	Simples	MPSO1Inf.	0,610	0,633	0,69
	Duplo	MPSO2Sup.	0,655		0,656
MLII	Simples	MPSO1Inf.	0,610	0,627	0,69
	Duplo	MPSO2Sup.	0,643		0,656
MLIII	Simples	MPSO1Inf.	0,590	0,630	0,69
	Duplo	MPSO2Sup.	0,661		0,656
MLIV	Simples	MPSO1Inf.	0,570	0,576	0,69
	Duplo	MPSO2Sup.	0,581		0,656

## 6.4. Ensaios de compressão axial

### 6.4.1. Introdução

Finalizadas as etapas de construção, preparação e ensaios com macacos planos nos diversos alçados dos muretes, realizou-se ensaios de compressão axial sobre cada um dos muretes, de modo a determinar as características mecânicas, ensaios estes, que deram por terminada a campanha experimental em laboratório. Neste capítulo serão abordadas as etapas de preparação do ensaio, o sistema de compressão axial, a respetiva instrumentação, programa de ensaio e descrição do comportamento dos muretes durante o ensaio. A identificação tomada para os ensaios de compressão axial é apresentada no Quadro 30.

**Quadro 30** – Identificação tomada para os ensaios de compressão axial.

Referência ensaio	Muretes	Alçados
ECI	1	Alçado A
		Alçado B
ECII	2	Alçado A
		Alçado B

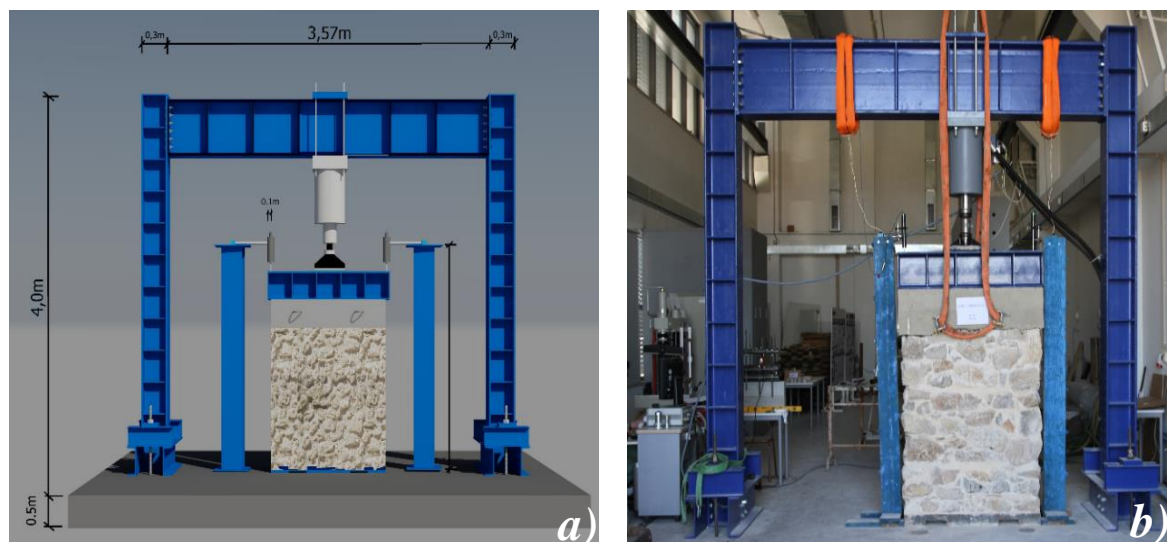
Os ensaios à compressão foram denominados como ensaios compressão I e II (ECI e ECII), sendo os muretes distinguidos como murete 1 e murete 2. Também se identificou os alçados de cada um dos muretes ensaiados tomando a designação de alçados A e B.

## 6.4.2. Sistema e instrumentação do ensaio de compressão axial

Todas as etapas de preparação, instrumentação e desenvolvimento do ensaio de compressão axial, foram realizadas no laboratório de estruturas e betão armado do IPL (LEBA), segundo a norma NP EN 1052-1:2002 [37].

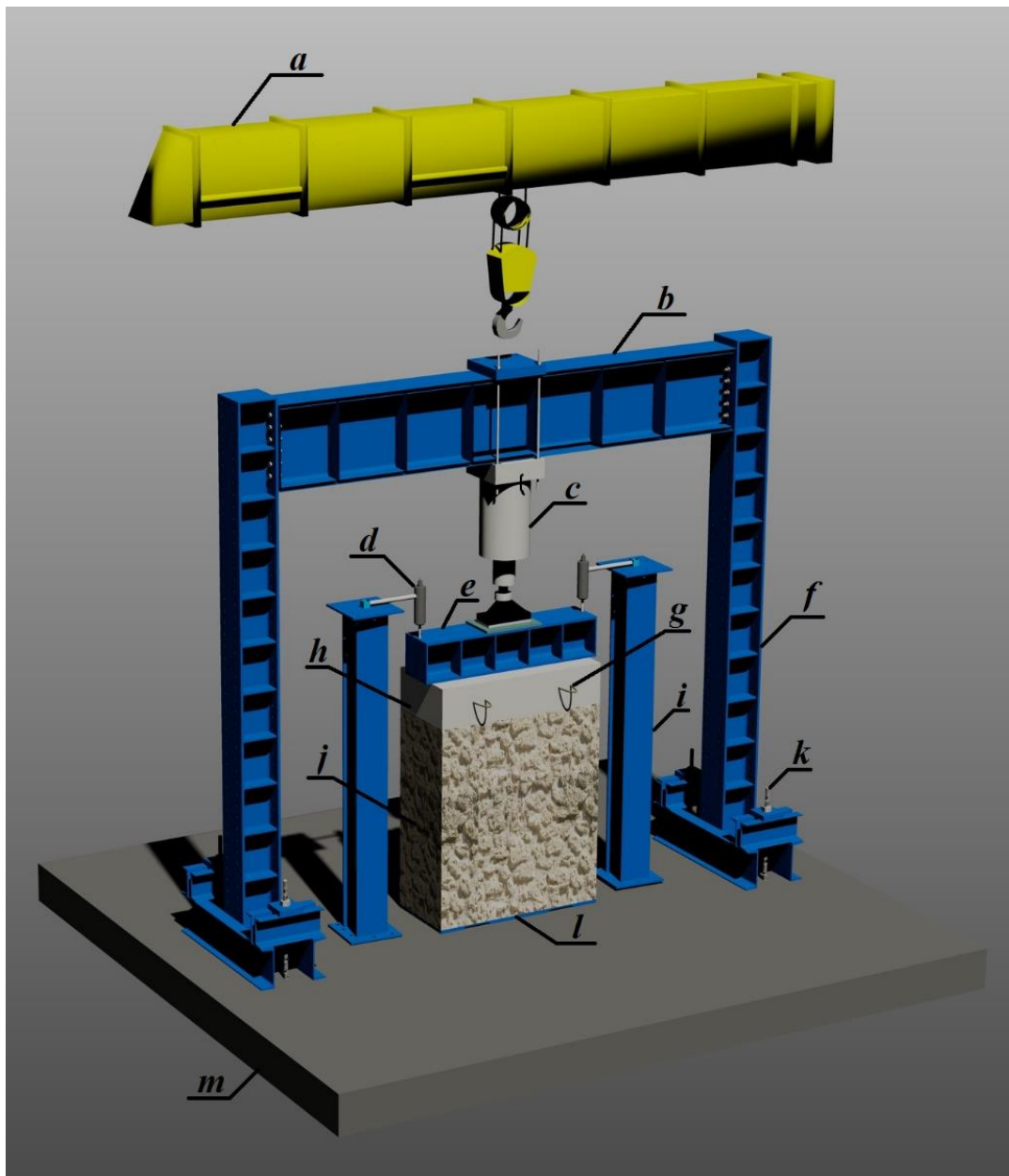
### 6.4.2.1. Setup do ensaio

Antes de iniciar qualquer tipo de preparação física do ensaio, foram registadas as distâncias dos elementos do pórtico (Figura 61a), para que fossem posicionados os muretes na zona pretendida de ensaio.



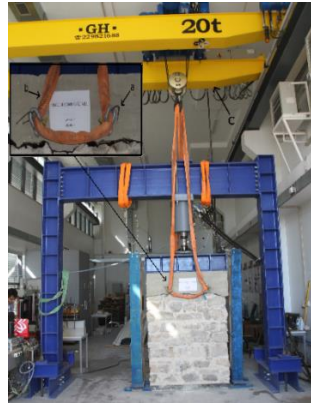
**Figura 61** – Aspecto do murete 1 (Alçado A) antes do ensaio de compressão axial I: a) registo de distâncias; b) vista frontal do sistema de ensaio.

O sistema de ensaio de compressão axial utilizado, era constituído por um pórtico metálico de carregamento, composto por dois pilares HEB300 ligados no topo a uma viga HEB600 por intermédio de vinte e quatro parafusos M24 (6 parafusos x 4 extremidades) e na base fixos à laje de pavimento do laboratório através de quatro varões de pré-esforço Dywidag com 26,5 mm de diâmetro. De modo a garantir uma uniformidade na distribuição das cargas verticais foi colocada no topo do lintel uma viga metálica HEB300 reforçada com nervuras verticais (Figura 62).



**Figura 62** – Sistema de ensaio de compressão axial: a) ponte rolante com guindaste; b) HEB600; c) cilindro hidráulico; d) defletómetros (LVDT) com base magnética; e) viga de carregamento (HEB300); f) HEB300; g) argolas metálicas; h) lintel; i) estrutura de suporte dos LVDT's; j) murete ( $130 \times 150 \times 60 \text{ cm}^3$ ); k) varões Dywidag  $\varnothing 26,5 \text{ mm}$ ; l) base de ensaio (3x IPE200); m) laje de pavimento.

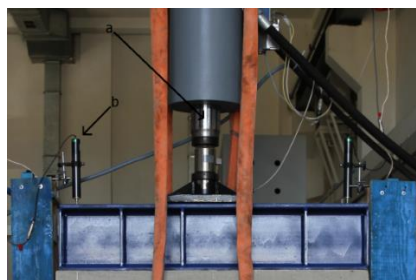
Foi necessário incluir na estrutura principal de ensaio, um sistema de segurança (Figura 63) que fosse “acionado” no momento de colapso dos muretes. O sistema é composto por quatro argolas metálicas colocadas no lintel aquando a construção do mesmo e uma ponte rolante de 20 Ton. A ligação entre o guindaste da ponte rolante e as argolas metálicas foi garantida pela utilização de cintas de 10 Ton. com liberdade suficiente que permitissem a deformação dos muretes sem restrições criadas pelas mesmas durante os ensaios.



**Figura 63** – Sistema de segurança utilizado no ensaio de compressão axial: a) argolas metálicas; b) cintas de 10Ton; c) ponte rolante 20Ton.

#### 6.4.2.2. Instrumentação e sistema de aquisição de dados

As medições dos deslocamentos verticais dos muretes foram realizadas mediante a colocação de dois transdutores de deslocamento (também conhecidos como defletómetros ou LVDT's) da marca TML (Figura 64) com um curso de 100 mm e sensibilidade de  $100 \times 10^{-6} / \text{mm}$ . Os LVDT's foram fixos através de bases magnéticas a uma estrutura auxiliar de madeira montada nas laterais dos muretes. O mecanismo de fixação dos LVDT's devido a sua liberdade de movimentos, permitia posicioná-los em qualquer ponto acima da viga de carregamento. Optou-se por coloca-los a aproximadamente a 10 cm das extremidades da viga de carregamento e nos pontos médios da mesma.



**Figura 64** – Equipamento de monitorização das cargas aplicadas sobre os muretes: a) actuador (controlo força e deslocamento); b) LVDT's (controlo deslocamento).

O atuador hidráulico (cilindro hidráulico) pertencente ao sistema de ensaio é da marca Servosis, modelo CH4-100/C300 com capacidade de 1000 kN e 300 mm de curso, estando incorporada uma célula de carga da marca Servosis, modelo PCI-200 com capacidade de 200 Ton. O atuador é acionado por um grupo hidráulico da marca MEB, tipo 225S-4 e permutador de ar de refrigeração da marca Sesino tipo Ap 580 EB (Figura 65) situado em compartimento próprio, sob o laboratório.



**Figura 65** – Grupo e cilindro hidráulico (atuador).

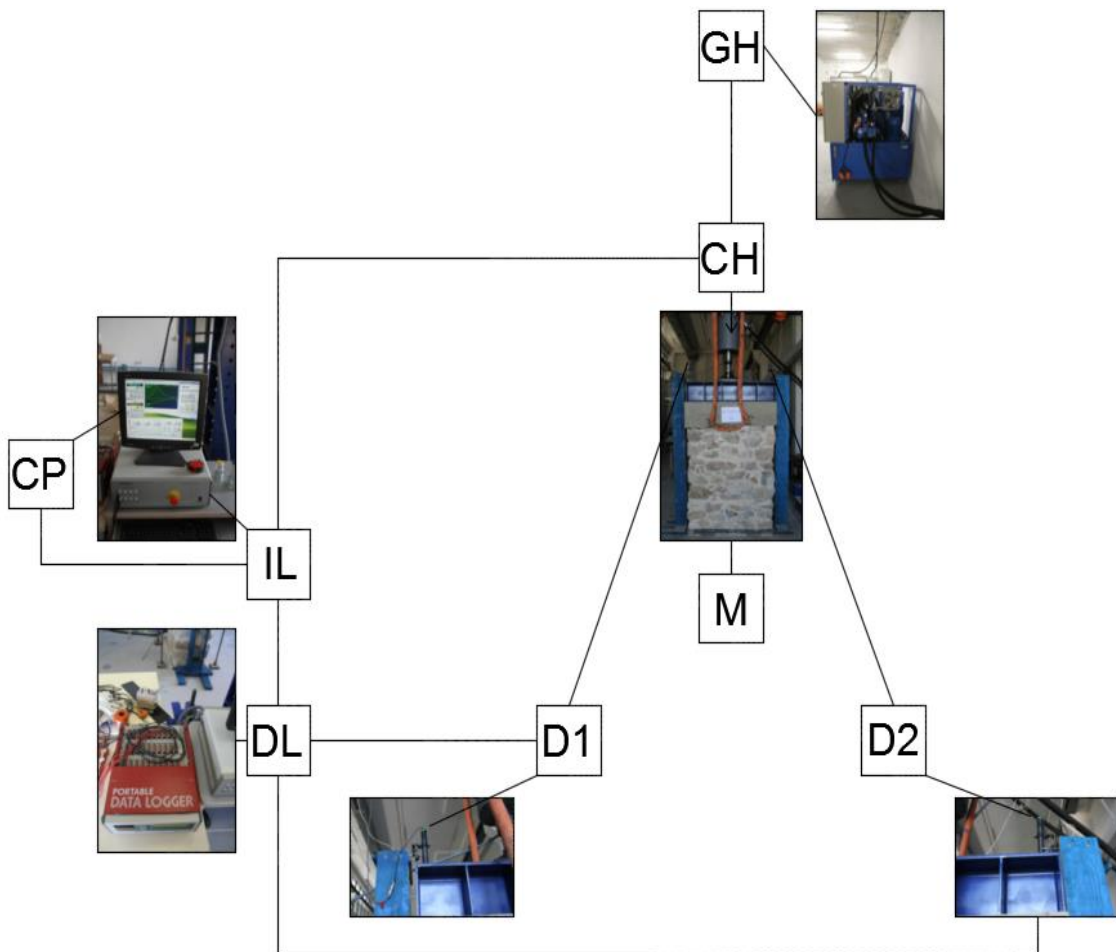
A monitorização das cargas aplicadas aos muretes, em todo o tempo de ensaio foi adquirida por um sistema de aquisição, registo e controlo de ensaios (Figura 66).

O sistema de aquisição e registo de dados utilizado nos ensaios de compressão axial era constituído por um *Data Logger* TML TDS-303 com 30 canais onde foram ligados dois defletómetros. O *Data Logger* e o mecanismo de aplicação da carga (atuador) era comandado por um controlador Servosis, conetado a uma interface de ligação que estabelecia a comunicação entre *Data Logger*, defletómetros, cilindro hidráulico e computador. A interface de ligação assegurou que toda a informação proveniente dos dispositivos de medição era centralizada e respetivamente enviada e armazenada em um computador pessoal através de um *software* específico do controlador. O *software* permitia observar a história de carga durante o ensaio. A Figura 66 ilustra o equipamento utilizado no momento de um dos ensaios à compressão.



*Figura 66 – Sistema de aquisição, registo e controlo dos ensaios.*

A representação esquemática do sistema de aquisição, registo e controlo de dados utilizado no trabalho experimental é apresentada na (Figura 67) e as siglas de identificação no Quadro 31.



*Figura 67 – Representação esquemática do sistema de aquisição de dados, controlo e instrumentação dos ensaios de compressão axial (adapt.[38]).*

**Quadro 31** – Siglas de identificação dos elementos do ensaio, ilustrados na Figura 67.

Sigla	Significado
CP	Computador pessoal com <i>software</i> Servosis PCD2K.
CH	Cilindro hidráulico da marca Servosis, Modelo CH4-100/C300 com capacidade de 1000KN e 300mm de curso, com célula de carga incorporada da marca Servosis, Modelo PCI-200 com capacidade 200Ton.
D1 e D2	Defletómetros da marca TML, modelo CDP- 100 Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd, com um curso de 100 mm e uma sensibilidade de $100 \times 10^{-6} / \text{mm}$ .
DL	Portable data logger da marca TML, tipo TDS-303 Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd, com 30 canais.
GH	Grupo hidráulico da marca MEB, tipo 225S-4 e permutador de ar de refrigeração da marca Sesino, tipo Ap 580 EB.
IL	Interface de ligação Servosis.
M	Murete.

#### 6.4.2.3. Programa de ensaio

Todos os parâmetros de definição dos ensaios foram aplicados segundo a norma NP EN 1052-1:2002 [37]. Assim, segundo este documento num ensaio de determinação da resistência à compressão a uma alvenaria, a aplicação da carga deve ter em conta diversos critérios tais como:

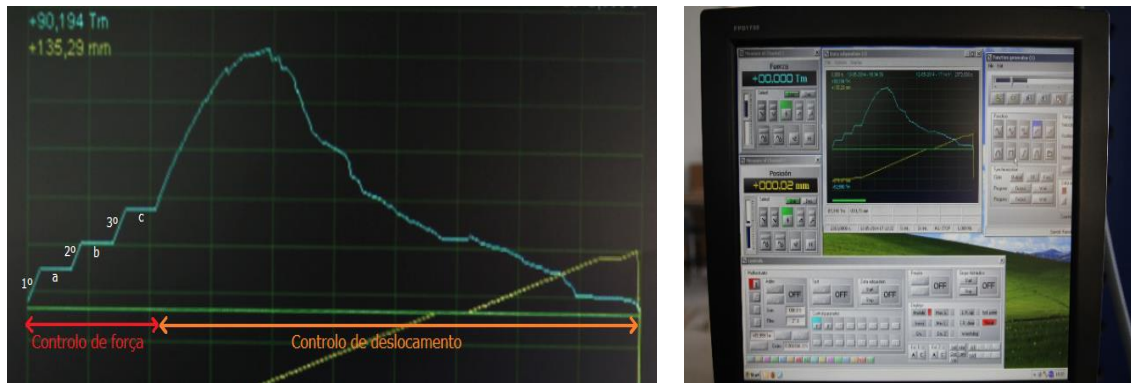
- aplicar a carga uniformemente no topo da alvenaria;
- aumentar a carga progressivamente de modo a que a rotura seja atingida entre 15 min. e 30 min. após início da aplicação da carga;
- o intervalo de tempo registado no ensaio do primeiro provete servirá para aferir a velocidade de ensaio.

Caso se pretenda determinar o módulo de elasticidade, a norma recomenda:

- os provetes de alvenaria devem conter dispositivos de medida;
- aplicar a força de compressão em, pelo menos, três etapas iguais;
- após cada etapa, a força de compressão deve ser mantida durante 2 min.  $\pm$  1 min. para medição da deformação;
- depois de efetuadas as medições da última etapa, aumentar a carga de compressão, a velocidade constante até à rotura.

Os critérios de aplicação de carga em controlo de força e controlo de deslocamento são apresentados na (Figura 68).

De forma a respeitar os requisitos da norma NP EN 1052-1:2002 [37] foi definido efetuar a aplicação da carga em controlo de força a uma velocidade de 2 kN/seg. em três patamares de carga de 100 kN cada. Os patamares de carga foram interrompidos por três pausas de aproximadamente de 2 minutos cada. Após a terceira pausa deu-se início à aplicação de carga em controlo de deslocamento a uma velocidade constante de 0,05 mm / seg. até à rotura. Optou-se por finalizar o ensaio quando os muretes atingiram o colapso.



**Figura 68** – Critérios adoptados para a aplicação de carga: a,b,c) primeira, segunda e terceira pausas de ensaio; 1º,2º e 3º) primeiro, segundo e terceiro patamares de carga.

#### 6.4.2.4. Preparação final do ensaio

Foram verificadas as ligações de todos os instrumentos de ensaio como todas as porcas do sistema de ensaio, nomeadamente ligação pilares-viga do pórtico e ligação pilares pórtico-laje pavimento (Figura 69a) de forma a não comprometer os resultados dos ensaios assim como assegurar a segurança no LEBA.

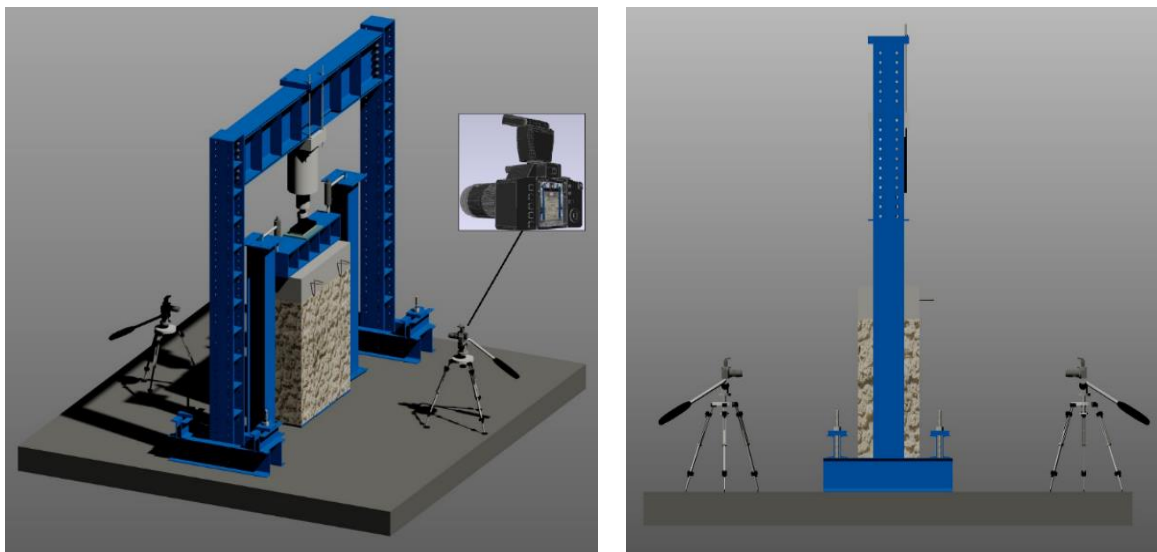


**Figura 69** – Preparação final do ensaio à compressão axial: a) aperto das porcas da ligação pórtico-laje pavimento; b) introdução dos parâmetros de ensaio.

Finalizada toda a preparação física do ensaio, procedeu-se a configuração do ensaio no *software* específico do controlador, definindo todos os parâmetros discutidos e calculados anteriormente, nomeadamente, a velocidade de ensaio e os patamares de carga em controlo de força e a velocidade de ensaio e tempo para o controlo deslocamento. Estes parâmetros dizem respeito a configuração do mecanismo de aplicação de carga (atuador).

#### *6.4.2.5. Registo de eventos dos ensaios de compressão*

Todos os acontecimentos dos ensaios à compressão foi documentada em vários suportes, por meio de marcação em papel (registo de eventos) (Anexo F) e de duas câmaras de filmar full hd da marca Canon posicionadas de forma a captar todos os acontecimentos em cada um dos alçados dos muretes (Figura 70). Foi utilizada uma máquina fotográfica para fazer registos fotográficos em perspetivas diferentes nomeadamente dos alçados transversais em diferentes momentos do ensaio.



*Figura 70 – Ilustração do posicionamento do equipamento de registo de eventos.*

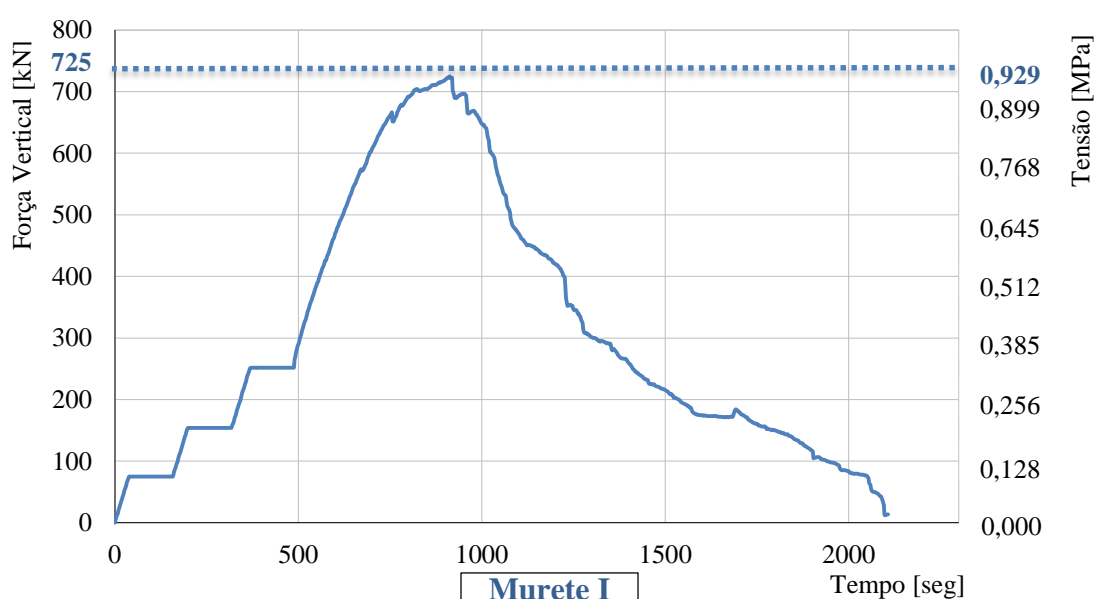
#### *6.4.2.6. Execução dos ensaios. Descrição do comportamento dos muretes durante o ensaio à compressão axial*

Uma vez cumpridos os trabalhos preparatórios finais e colocação do equipamento de registo de eventos iniciaram-se os ensaios experimentais.

O registo de eventos em papel, em formato digital por filme e fotográfico, foi essencial para uma pormenorizada descrição do comportamento dos muretes aos ensaios de compressão axial.

A descrição do comportamento de ensaio à compressão axial que se segue, diz respeito ao ensaio realizado sobre o murete 1. O registo de eventos dos ensaios pode ser consultado no Anexo F, assim como todos os resultados associados ao ensaio de compressão sobre o murete 2.

Inicialmente começou-se por cumprir os pressupostos impostos pela norma, nomeadamente os patamares de carga de 100 kN cada e as pausas intercalares de dois minutos entre os mesmos em controlo de força. Terminada a última pausa aos 490 segundos (8 minutos), o ensaio é retomado em controlo de deslocamento até ao colapso total do murete (Figura 71).



**Figura 71** – Diagrama história de carga do ensaio de compressão axial do murete 1.

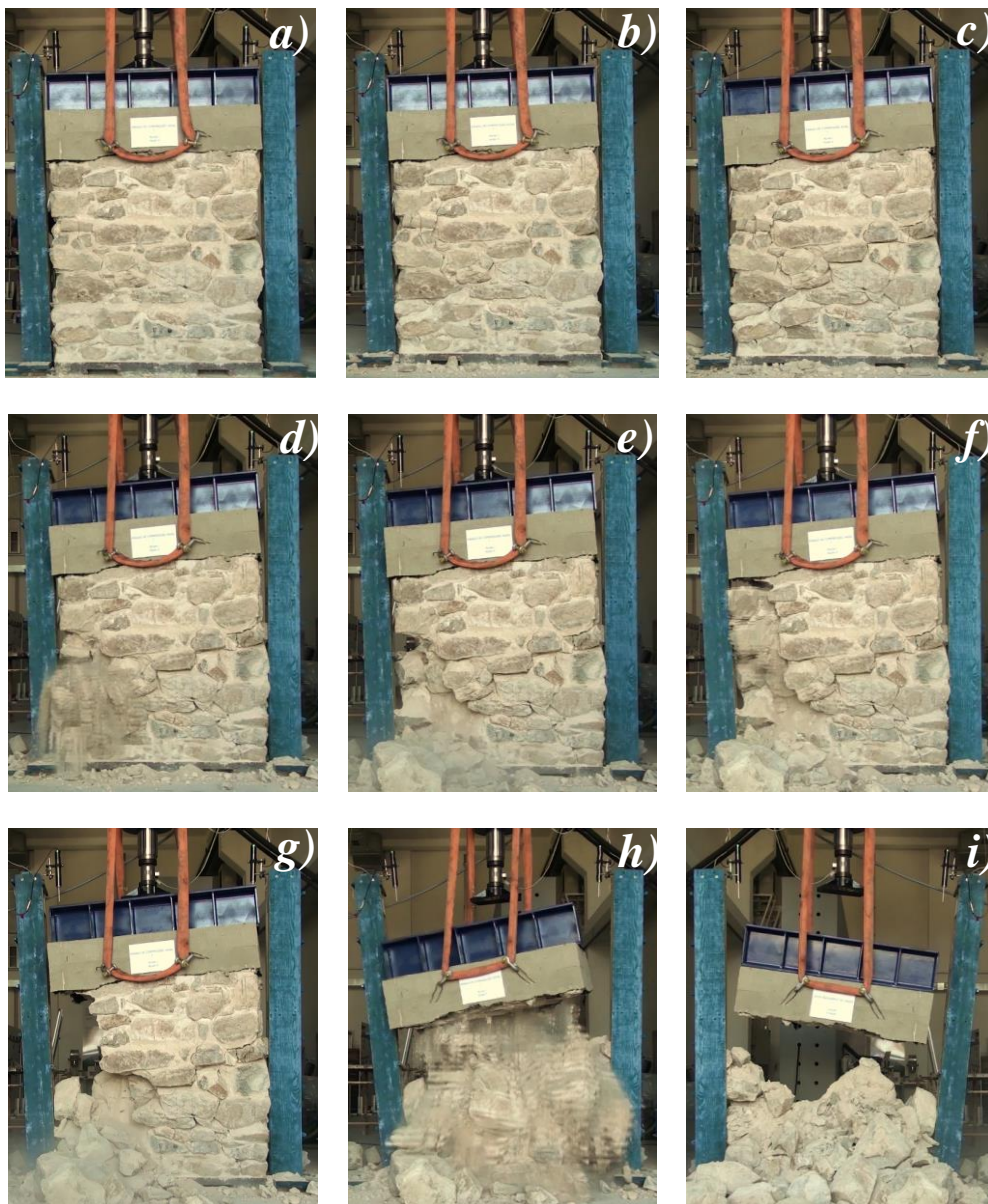
Na fase da aplicação de carga em controlo de força não se observou nenhum acontecimento digno de registo salvo a ocorrência de um desprendimento parcial de argamassa no terminar da terceira pausa de aplicação de carga (490 seg.).

Terminada a fase de ensaio em controlo de força, o ensaio foi retomado em controlo de deslocamento verificando-se a formação das primeiras micro-fissuras, dispersas na linha média do murete (Figura 72b – 618 seg.).

As fissuras registadas anteriormente iam aumentando de espessura, ocorrendo o aparecimento de novas, evidenciando-se sobretudo numa linha diagonal com começo no canto superior esquerdo do alçado A para o canto inferior direito do mesmo alçado (785 seg.).

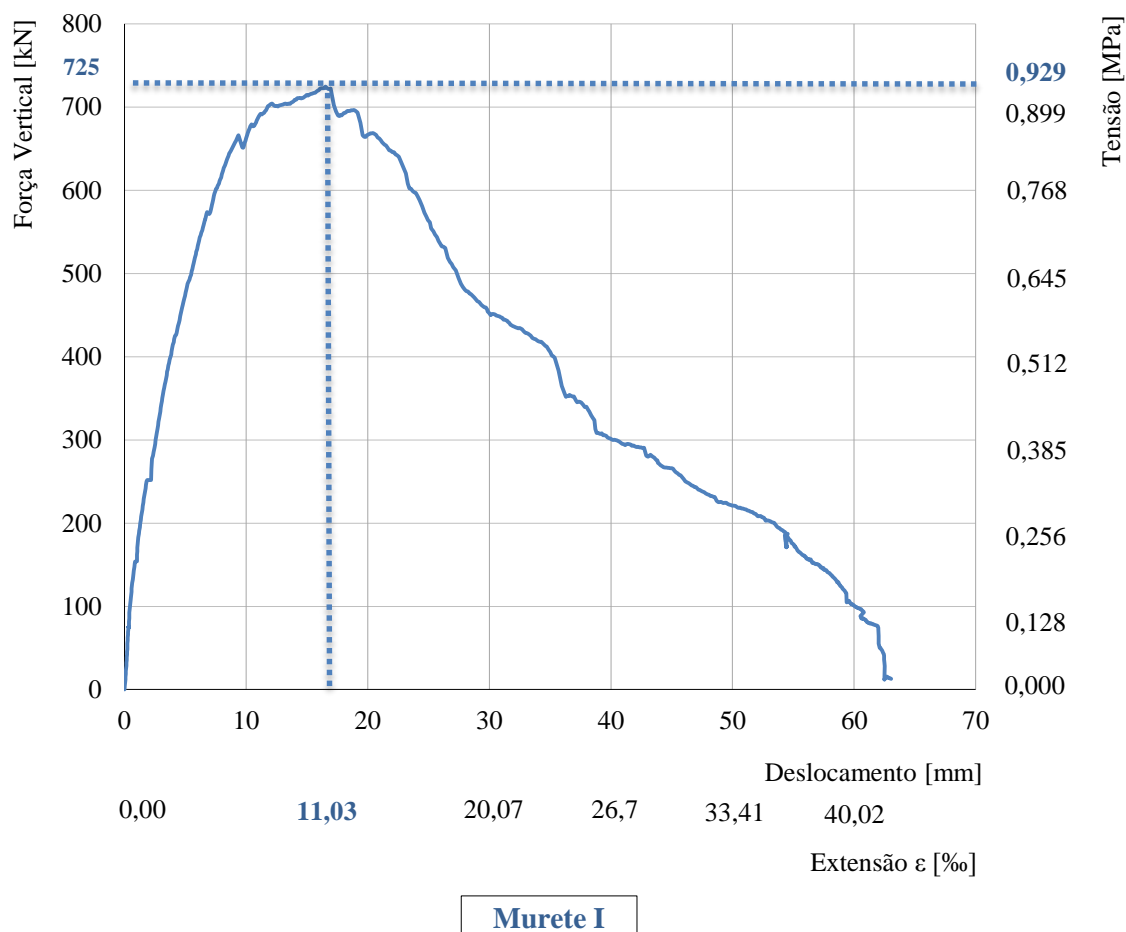
À medida que a carga ia aumentando começava-se a ouvir o “ranger” do murete, surgindo a desagregação de argamassa e pedras, de pequena e média dimensão (808 seg.).

Aproximadamente a meio do ensaio observou-se na zona inferior esquerda uma gradual expulsão de elementos do murete para fora do plano (Figura 72c – 1444 seg.). Aos 1708 seg. e 1755 seg. (Figura 72d,e,f,g) ocorreu o colapso parcial do murete nos cantos inferior e superior esquerdo respetivamente, o evento com relevância assinalável até o momento. O ensaio terminou aos (1998 seg.) aproximadamente 33 minutos, uma vez atingido o colapso total do murete, de forma “estrondosa” acionando o sistema de segurança implementado (Figura 72h e Figura 72i).



**Figura 72** – Comportamento do murete 1 (alçado A) em vários instantes do ensaio de compressão axial I: a)  $t=60s$ ; b)  $t=618s$ ; c)  $t=1444s$ ; d,e)  $t=1708s$ ; f,g)  $t=1755s$ ; h,i)  $t=1998s$ .

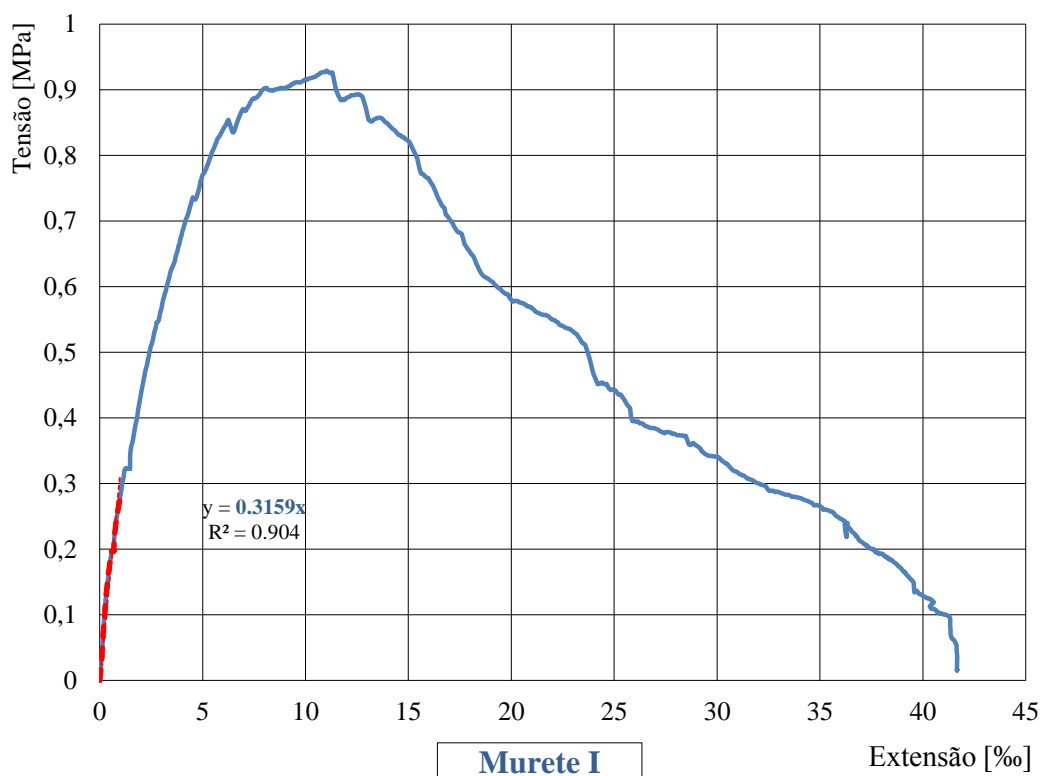
Registou-se para este ensaio (murete 1) uma força máxima aplicada de 725 kN (Figura 71), correspondendo uma tensão de 0,93 MPa atingindo a rotura aos 913 segundos (15 minutos). A rotura ocorrida foi do tipo frágil, irreversível assinalada a partir do momento de ocorrência da desagregação do interior do murete.



**Figura 73** – Diagrama força-deslocamento ensaio compressão axial.

Segundo a análise do diagrama da história de carga (Figura 73), percebe-se as diferentes fases do ensaio. Uma vez realizado o ensaio à compressão axial, o comportamento mecânico do murete durante o ensaio, é dado por um diagrama de história de carga, sendo este caracterizado pela força vertical [kN], deslocamento [mm] e tensão [MPa].

A Figura 74 mostra a determinação do módulo de elasticidade resultante dos parâmetros anteriormente analisados, obtendo-se para o murete I um módulo de elasticidade de 0,32 GPa.



**Figura 74** - Diagrama tensão/extensão para determinação do módulo de elasticidade.

No final do ensaio procedeu-se à remoção de todo o material que resultou do colapso dos muretes (Figura 75).



**Figura 75** – Murete após ensaio.

**Quadro 32** – Resumo dos valores obtidos nos de compressão axial em laboratório.

Ensaio	Dimensões murete [m <sup>3</sup> ]	Força Máxima [kN]	Deslocamento correspondente [mm]	Tensão máxima [MPa]
ECI	1,4 x 1,5 x 0,64	725	16,55	0,93
ECII		821	13,36	1,05
	Média	773	-	0,99

## 6.5. Caracterização mecânica dos materiais utilizados na construção dos muretes

A pedra predominante nas construções antigas do Centro Histórico de Leiria é calcária. Para realizar a caracterização mecânica deste tipo de calcário, foram selecionadas e identificadas amostras durante a construção dos muretes em laboratório, provenientes das paredes demolidas no CHL, assunto abordado em 6.1.2.1.

Estas amostras foram preparadas, resultando um conjunto de quatro lotes, dos quais três lotes de carotes cilíndricos e um lote de carotes cúbicos.

### 6.5.1. Preparação dos carotes

Os provetes foram preparados no laboratório do DEC do IPL (LEBA). Cada provete foi identificado com um número e foi associado a um determinado lote. A preparação dos provetes teve em conta essencialmente três etapas distintas, extração, serração e retificação.

A dimensão dos blocos de pedra fez com que se optasse por uma dimensão dos carotes que respeitasse a norma [39] ou seja, estes deveriam ser cubos com  $(70 \pm 5)$  mm ou  $(50 \pm 5)$  mm de aresta ou cilindros retos de base circular cujo diâmetro e altura fossem iguais a  $(70 \pm 5)$  mm ou  $(50 \pm 5)$  mm. Optou-se então fabricar provetes cilíndricos retos de base circular com 68 mm de diâmetro e provetes cúbicos com 50 mm de aresta.

#### 6.5.1.1. Extração dos provetes cilíndricos

A extração dos carotes foi realizada com auxílio de uma caroteadora a gasolina (Figura 76a) em que a sua utilização levantou dois problemas, a fixação dos blocos de pedra e conseguir uma altura de apoio suficiente de modo a que a caroteadora perfurasse o bloco na totalidade, garantindo a dimensão pretendida. Como solução optou-se por utilizar uma caixa de madeira com uma altura suficiente respeitando a altura dos blocos e uma vez o bloco de pedra dentro, era preenchida na totalidade com brita de modo a imobilizar o bloco de pedra durante a carotagem, como é demonstrado na Figura 76b. A Figura 76c ilustra o aspeto final de um bloco de pedra após carotagem.



**Figura 76** – Processo de carotagem: a) exemplo de carotagem de um bloco de pedra; b) sistema de imobilização do bloco de pedra utilizando uma caixa de madeira e agregados; c) amostra de um bloco caroteado e do respectivo carote extraído.

Foram extraídos vinte e seis carotes com o objetivo de constituir três lotes de provetes. Os restantes seis carotes ficariam como reserva, prevendo que no processo de serração e retificação alguns iriam ser parcialmente danificados devido à constituição da pedra calcária, algo que acabou por se verificar. Foi comprovada com sucesso a metodologia adotada para a extração dos carotes, pois os carotes obtidos tinham imperfeições mínimas.

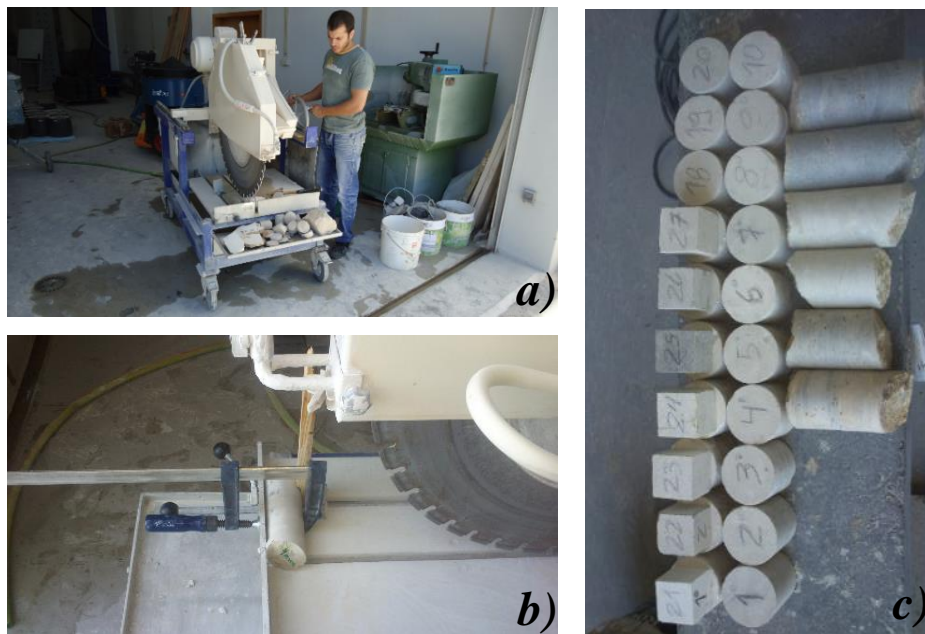
#### 6.5.1.2. Serração dos carotes cilíndricos e cúbicos

Antes de proceder a serração dos carotes cilíndricos fez-se a medição destes (Figura 77a), tendo em conta que a altura teria de ser igual ao diâmetro. A Figura 77b ilustra uma amostra de carotes medidos para serração.



**Figura 77** – Medição dos carotes: a) exemplo da medição de um carote com um paquímetro e fita métrica; b) amostra de carotes medidos.

Após a medição realizou-se a serração dos provetes cilíndricos (Figura 78a) e a serração de blocos de pedra para obter os provetes cúbicos. Salienta-se a dificuldade da fixação dos blocos de pedra à mesa da serra (Figura 78b) devido às irregularidades dos blocos. Em todas as serrações efetuadas teve-se o cuidado de estas serem feitas lentamente, de modo a que os blocos de pedra e os provetes não se desagregassem, algo que não foi conseguido em todos eles devido à sua constituição. A serração foi efetuada com uma máquina de serrar Diamant Boart TS900F. A amostra dos carotes após a sua serração é apresentada na Figura 78c.



**Figura 78** – Serração dos carotes: a) exemplo da serração de um provete; b) método adotado para a fixação dos carotes; c) amostra dos carotes após a serração e carotes de reserva.

### 6.5.1.3. Retificação dos carotes

O processo de retificação dos carotes revelou ser um trabalho relativamente simples, mas muito lento uma vez que para retificar cada carote foi necessário retirar os carotes várias vezes da retificadora, para confirmar a medida que estava definida para o desgaste. A retificação dos provetes cúbicos foi de maior dificuldade devido ao número de faces. Teve-se o cuidado de desgastar pouca quantidade de material em cada passagem da máquina, para não correr o risco de os provetes lascarem, algo que não foi conseguido em três provetes. Este último processo finalizou a preparação dos provetes, ficando estes aptos para os respetivos ensaios propostos. As retificações dos provetes cilíndricos e cúbicos são expostas nas Figura 79a e Figura 79b.



**Figura 79** – Retificação dos carotes: a) retificação dos carotes cilíndricos; b) retificação dos carotes cúbicos.

Foram preparados para os ensaios vinte provetes cilíndricos e sete provetes cúbicos. Os provetes foram identificados numericamente e foi atribuído quatro lotes distintos, três lotes para os provetes cilíndricos e um lote para os provetes cúbicos (Figura 80).



**Figura 80** – Total de carotes retificados.

## 6.5.2. Ensaios de caracterização mecânica em carotes de pedra calcária

Todos os ensaios realizados neste capítulo foram realizados no laboratório do DEC do IPL com os equipamentos que o mesmo dispõe para o efeito.

### 6.5.2.1. Ensaios de determinação do módulo de elasticidade

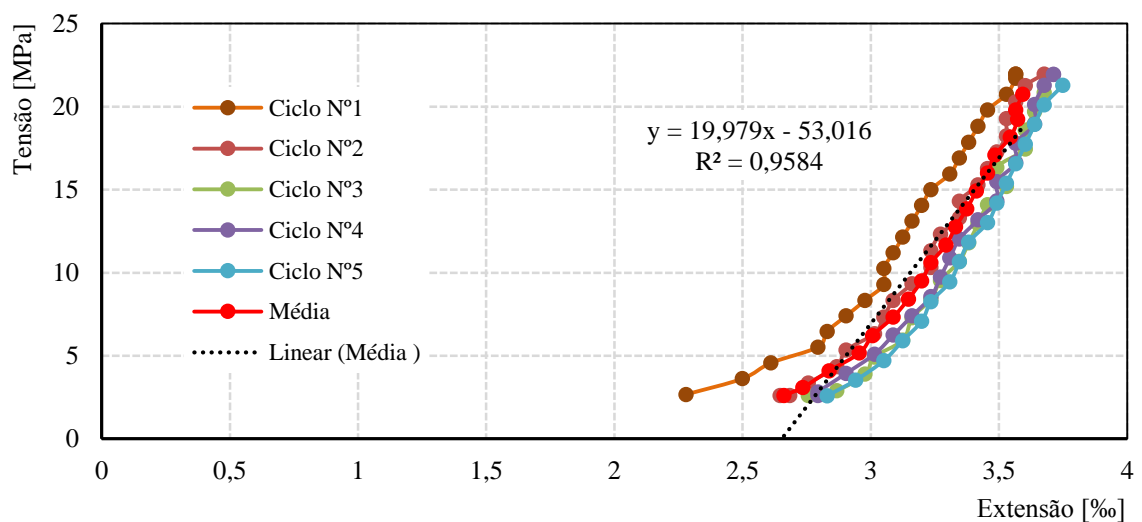
Os ensaios de determinação do módulo de elasticidade foram realizados com uma máquina de ensaio Form Test, tipo mega 2-3000-100D. O esquema de ensaio idealizado é apresentado na Figura 81 e era composto por uma esfera metálica de 4 cm de diâmetro, dois discos metálicos com aproximadamente o mesmo diâmetro dos provetes (que funcionam como batentes), chapas e maciços metálicos.



**Figura 81** – Sistema de ensaio utilizado para a determinação do módulo de elasticidade.

Para registo da força foi utilizado uma célula de carga 100 kN, da marca TML do tipo CLC-100 kN e para o registo dos deslocamentos dois defletómetros da marca TML, modelo CDP-50 Tokyo Sokki Kukyugo Co, com cursos de 50 mm e sensibilidade  $50 \times 10^{-6}/\text{mm}$ , fixos por duas bases magnéticas. Os defletómetros e a célula estavam conetados a um *data logger*, onde os dados eram centralizados e armazenados.

A Figura 82 ilustra o tipo de gráfico tensão/extensão correspondente ao ensaio realizado sobre o carote nº4 que se obteve nos ensaios de determinação do módulo de elasticidade. O valor obtido para o carote nº6 é exposto na Figura 82.



**Figura 82** – Resultado obtido na determinação módulo de elasticidade carote nº6.

O Quadro 33 apresenta o resumo dos valores obtidos do módulo de elasticidade para 1/3 da força máxima atingida nos ensaios de compressão. Os diagramas correspondentes aos outros ensaios podem ser consultados no anexo G.

**Quadro 33** – Valores obtidos nos ensaios de determinação do módulo de elasticidade.

Carotes	Lote	Carote N°	E [GPa]
CILINDRICOS	Lote I	2	23,72
		3	25,07
		4	21,26
		5	23,27
		6	19,98
		<b>Média</b>	
Desvio padrão ( $\Delta\sigma$ )		2,02	
Valor máximo ( $\sigma_{\text{máx}}$ )		25,07	
Valor mínimo ( $\sigma_{\text{mín}}$ )		19,98	

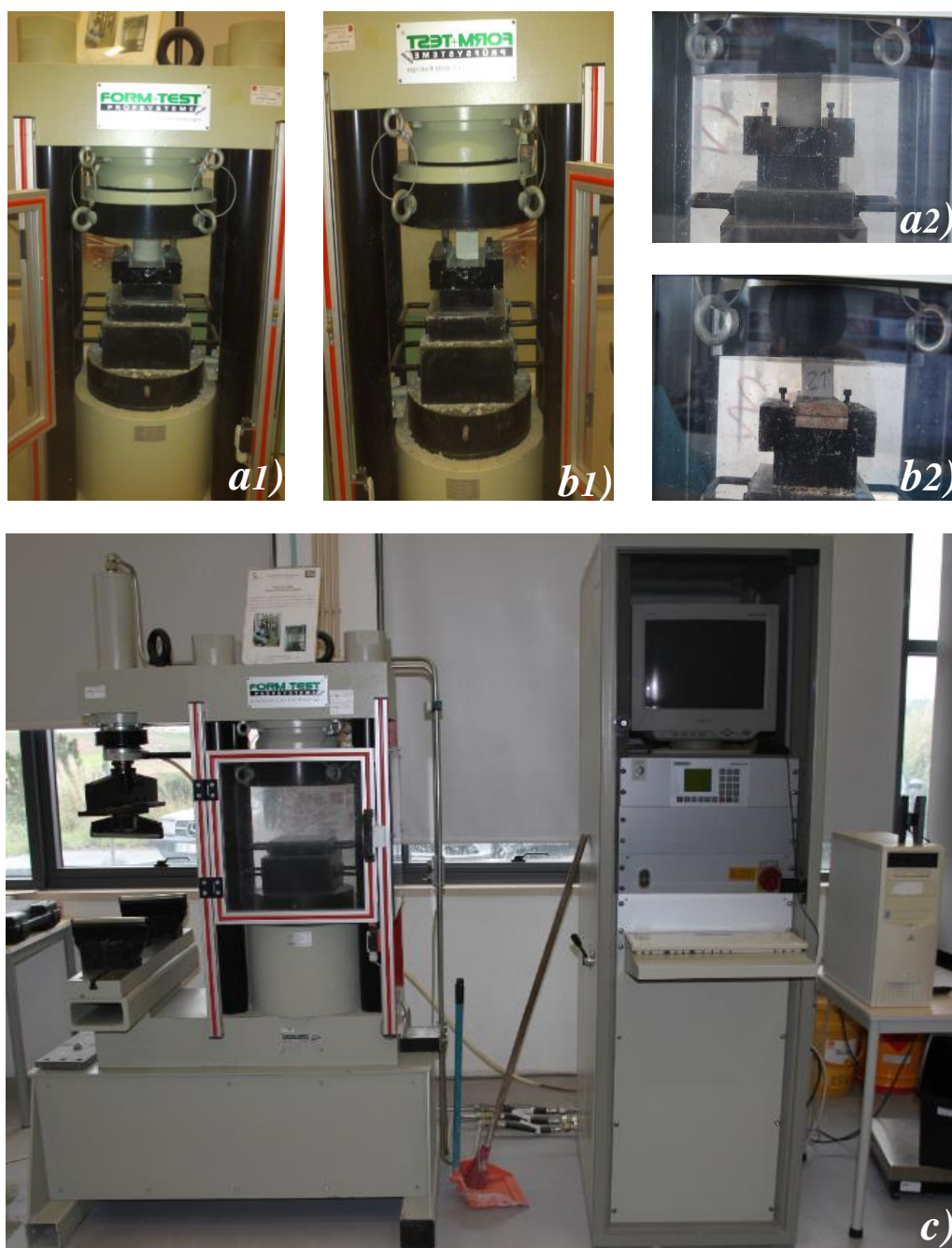
### 6.5.2.2. Ensaios de compressão

Uma vez finalizada a preparação das pedras, obteve-se os provetes, estes foram identificados numericamente e foi atribuído quatro lotes distintos, três lotes para os provetes cilíndricos e um lote para os provetes cúbicos (Figura 83), como mencionado no tópico 6.5.



**Figura 83** – Lotes de carotes a realizar o ensaio à compressão.

Para a determinação da resistência à compressão foi utilizada uma máquina de ensaio Form Test, tipo mega 2-3000-100D. O sistema de ensaio utilizado para os ensaios à compressão, quer para os carotes cilíndricos quer para os carotes cúbicos, foi o sistema demonstrado na Figura 84. Os ensaios de compressão foram todos efetuados respeitando os critérios impostos pelas normas [39, 40], nomeadamente a colocação dos provetes na máquina de ensaio (Figura 84), a velocidade de aplicação de carga e os tempos de ensaio.



**Figura 84** – Ensaio de compressão em carotes de pedra – a1 e a2) carotes cilíndricos; b1 e b2) carotes cúbicos; c) máquina de ensaio.

No Quadro 34 são expostos os resultados provenientes dos ensaios de compressão realizados sobre os carotes cilíndricos e cúbicos, onde foram obtidos valores médios para a resistência à compressão da pedra de 72,79 MPa e 58,7 MPa respectivamente.

Os carotes cilíndricos nº 14, 15, 17 e 18 e nº 21 cúbico não foram considerados uma vez que não cumpriram o tempo mínimo de ensaio recomendado. Alguns valores podem ser influenciados aquando a preparação dos carotes não se teve em atenção os planos de anisotropia.

**Quadro 34** – Valores de resistência obtidos nos ensaios à compressão para os diversos lotes de provetes.

Carotes/Ensaio	Nº	Velocidade [N/mm <sup>2</sup> /s]	Tempo [min:seg]	Força [kN]	Tensão [MPa]	
CILÍNDRICOS Diâmetro [6,8 cm]	Lote I	1	0,6	1:23	330,50	91,81
		2	0,6	2:05	264,70	73,53
		3	0,6	1:25	189,90	52,75
		4	0,6	1:03	194,00	53,89
		5	0,6	1:51	227,20	63,11
		6	0,6	1:29	191,10	53,08
	Lote II	7	0,6	1:23	170,30	47,31
		8	0,6	1:06	159,06	44,18
		9	0,6	2:10	301,20	83,67
		10	0,6	2:15	318,50	88,47
		11	0,6	2:38	332,70	92,42
		12	0,6	2:48	381,00	105,83
		13	1	1:22	312,00	86,67
		14	1	0,35	78,20	<del>21,72</del>
	Lote III	15	1	0:12	26,20	<del>7,28</del>
		16	1	1:07	247,90	68,86
		17	1	1:53	439,90	<del>122,19</del>
		18	0,6	0:17	64,10	<del>17,81</del>
		19	0,6	2:17	309,10	85,86
		20	0,6	2:01	263,30	73,14
<b>Média</b>					<b>72,79</b>	
Desvio padrão ( $\Delta\sigma$ )					18,78	
Valor máximo ( $\sigma_{\text{máx}}$ )					105,83	
Valor mínimo ( $\sigma_{\text{mín}}$ )					44,18	
CÚBICOS Aresta [5 cm]	Lote IV	21	0,6	0:57	96,3	<del>38,52</del>
		22	0,6	1:23	131,2	52,48
		23	0,6	2:09	200,4	<del>80,16</del>
		24	0,6	1:23	135,9	54,36
		25	0,6	1:44	166,1	66,44
		26	0,6	1:12	118,3	47,32
		27	0,6	1:51	178,9	71,52
<b>Média</b>					<b>58,42</b>	
Desvio padrão ( $\Delta\sigma$ )					11,67	
Valor máximo ( $\sigma_{\text{máx}}$ )					71,52	
Valor mínimo ( $\sigma_{\text{mín}}$ )					47,32	

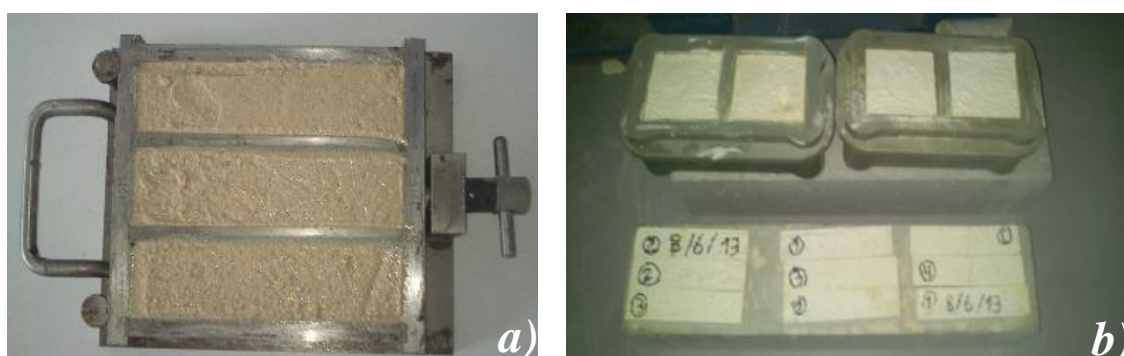
O aspeto dos carotes após a realização dos ensaios é demonstrado na Figura 85.



*Figura 85 – Aspeto dos carotes de pedra submetidos aos ensaios de compressão.*

### 6.5.3. Ensaio realizados aos provetes de argamassa de assentamento

Com o objetivo de caracterizar a argamassa de assentamento utilizada na construção dos muretes, foram retiradas amostras de argamassa aquando a construção das alvenarias nas diversas fases de construção. Com as amostras retiradas foram realizados moldes prismáticos com as dimensões normalizadas de  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ , para a obtenção de provetes de argamassa como é demonstrado na Figura 86a, para posterior ensaio à compressão e flexão. Foram realizados também os ensaios da mesa de espalhamento e de consistência (Anexo H). Preparou-se 15 provetes com argamassa dos quais 10 foram submetidos aos ensaios. No processo de descofragem cinco dos provetes ficaram impróprios para ensaio devido a desagregamento parcial de material.



*Figura 86 – Provetes de argamassa de assentamento: a) moldes primáticos; b) provetes obtidos com argamassa das diversas amassaduras.*

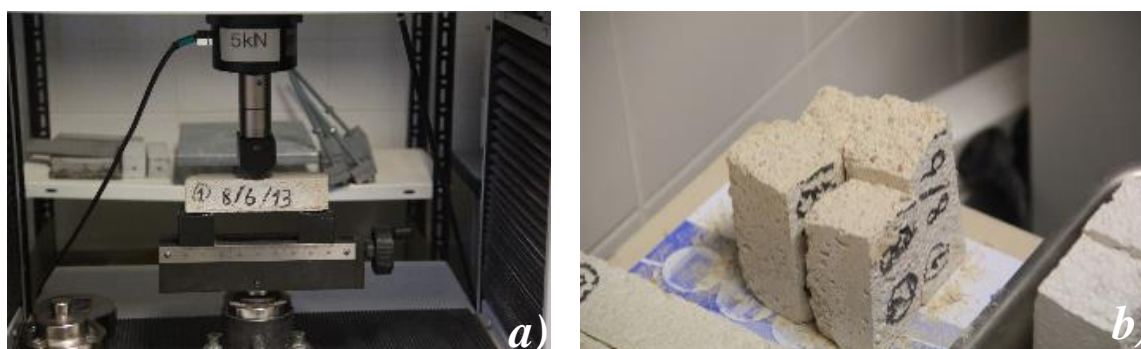
### 6.5.3.1. Ensaio de flexão e compressão aos provetes da argamassa de construção dos muretes

Uma vez atingido o período estabelecido de cura, período que se teve em conta o facto de a cal utilizada ser cal apagada, deu-se início aos ensaios de compressão e flexão. Estes ensaios foram realizados numa máquina universal de ensaios da marca Shimadzu, modelo AG-IC 100 kN com uma célula de carga de 5 kN (Figura 87). Os ensaios de flexão e compressão aos provetes de argamassa respeitaram os critérios impostos pela norma EN 1015-11:1999 [41].



**Figura 87** – Máquina universal de ensaios de flexão e compressão.

Os ensaios de flexão foram realizados com um tipo de carregamento de compressão simples, a uma velocidade de ensaio de 10 kN/s. Na Figura 88 é ilustrado o ensaio de resistência à flexão, assim como os meios-provetes provenientes do mesmo.



**Figura 88** – Ensaio de resistência à flexão: a) momento de aplicação da carga; b) meios-prismas resultantes do ensaio.

Os valores da força de rotura foram registados automaticamente pela máquina de ensaio e podem ser consultados no Quadro 35.

**Quadro 35 – Valores da tensão de rotura em flexão.**

Proveniência dos provetes	Provetes	Tensão de rotura em flexão [MPa]
1ª Fase de construção	1	0,29
	2	0,31
	3	0,38
2ª Fase de construção	4	0,28
	5	0,28
3ª Fase de construção	6	0,45
	7	0,45
	8	0,39
	9	0,44
	10	0,44
<b>Média</b>		<b>0,37</b>
Desvio padrão ( $\Delta\sigma$ )		0,07
Valor máximo ( $\sigma_{\text{máx}}$ )		0,45
Valor mínimo ( $\sigma_{\text{min}}$ )		0,28

A resistência à tração por flexão,  $f$ , obtida pela máquina de ensaio teve como base de cálculo a expressão:

$$f = 1,5 \frac{F \times l}{bd^2} \quad [7]$$

onde:

- $f$  – resistência à flexão [MPa];
- $F$  – força de rotura à flexão [N];
- $l$  – distância entre apoios [mm];
- $b$  – largura do prisma [mm];
- $d$  – espessura do prisma [mm].

Utilizando os meios-prismas provenientes dos ensaios de flexão, realizaram-se os ensaios de compressão (Figura 89) a uma velocidade de ensaio 50 N/s.



**Figura 89** – Ensaio de resistência à compressão: a) momento de aplicação da carga; b) momento da rotura do provete.

Assim como nos ensaios de resistência à flexão os valores de rotura foram obtidos automaticamente pela máquina de ensaio, tendo em conta a formulação de cálculo:

$$f = \frac{F}{A} \quad [8]$$

correspondendo:

- $f$  – resistência à compressão [MPa];
- $F$  – força de rotura à compressão [N];
- $A$  – área de aplicação da carga [mm<sup>2</sup>].

Os resultados da tensão de rotura à compressão de cada provete são apresentados no Quadro 36.

**Quadro 36** – Valores da tensão de rotura em compressão.

Proveniência dos provetes	Provetes	Tensão de rotura em compressão [MPa]
1ª Fase de construção	1	0,59
	2	0,60
	3	0,62
2ª Fase de construção	4	0,51
	5	0,48
3ª Fase de construção	6	0,95
	7	1,10
	8	1,18
	9	0,89
	10	1,08
	<b>Média</b>	<b>0,8</b>
	Desvio padrão ( $\Delta\sigma$ )	0,27
	Valor máximo ( $\sigma_{\text{máx}}$ )	1,18
	Valor mínimo ( $\sigma_{\text{mín}}$ )	0,48



## Capítulo VII. Apresentação e discussão de resultados

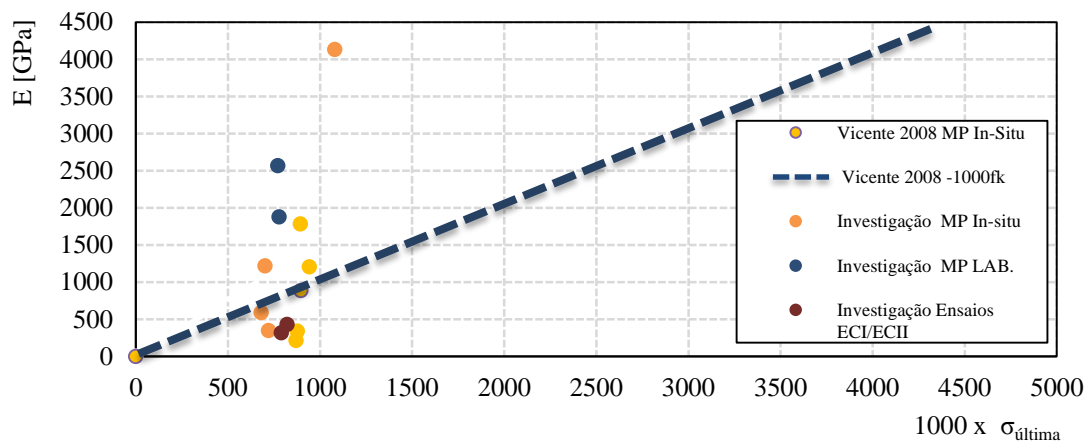
O presente capítulo apresenta os resultados determinados nos diversos ensaios realizados na dissertação, assim como os resultados obtidos por outros autores. Os resultados apresentados no Quadro 37 são tomados como comparação relativamente aos resultados obtidos na investigação, de forma a obter uma ordem de grandeza para o valor de tensão média de compressão e módulo de elasticidade. Salienta-se que a comparação entre os valores deve ser feita não esquecendo de vários fatores que podem condicionar as discrepâncias entre os mesmos, nomeadamente o tipo de edifício ensaiado ou o tipo de ensaio.

**Quadro 37 – Valores da tensão de rotura e módulo de elasticidade de diversos autores ([19, 42]).**

Autores		Tensão de rotura, $\sigma_{rot}$ (MPa)	Módulo de elasticidade, E (GPa)	Tipo de pedra
Ensaio Dissertação	MP in situ	0,7-1,0	0,35-1,2	Calcário
	MP lab.	0,77 (valor médio)	2,23 (valor médio)	Calcário
	EC lab.	0,99 (valor médio)	0,36 (valor médio)	Calcário
	EID lab	-----	0,46-1,02	
Vicente [2008]		*0,76 (valor médio)	*1,713 (valor médio)	Calcário
Pagaimo [2004]		0,7 (valor característico)	0,32 (valor médio adotado)	Calcário
Pinho [2003]		0,438 (ensaio laboratório)	-----	Calcário
Roque [2002]		0,49 (valor característico)	1,0	Xisto
Catania [2000]		2,37 (valor médio)	3,767 (valor médio)	-----
Costa et al [2009]		0,4-0,7	1,0	Granito
Tomazevic [1999]		0,3-0,9	0,2-1,0	Calcário
Binda et al. [2003]		0,6-1,0	0,9	-----
OPCM 3274 [2003]		1,1-2,0	1,020-1,980	-----

Notas: \* - Valor médio dos ensaios que atingiram a rotura aplicando uma redução de 15%.

\*\* - Valor de médio de E de todos os ensaios aplicando uma redução de 15%.

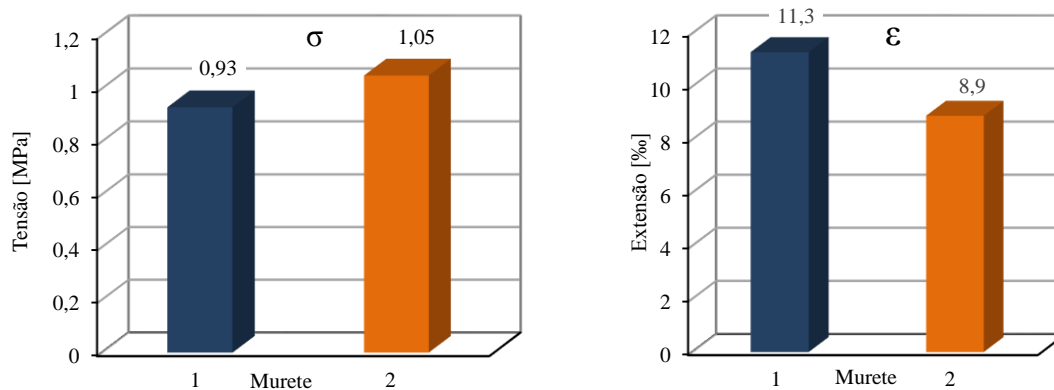


**Figura 90** – Comparação dos valores obtidos na investigação com os valores obtidos por Vicente 2008

Segundo análise do Quadro 37 e Figura 90, pode-se concluir que os valores obtidos na investigação das paredes de alvenaria de pedra argamassa da pesente dissertação, comparando com outros autores, relativamente à resistência à compressão os valores são da mesma ordem de grandeza, existindo uma maior discrepância quanto aos valores dos diversos módulos de elasticidade.

Como pode ser consultado no Quadro 10 do capítulo 5.4.1 os critérios normativos indicam que os valores dos ensaios em laboratório podem ascender os 20 %, sendo assim aceitável a discrepância entre os valores obtidos em laboratório e *in-situ*.

Analisando a Figura 91 pode-se constatar que os valores obtidos nos ensaios à compressão axial sobre os muretes são próximos, validando a campanha experimental, pois o método de construção e os materiais constituintes foram semelhantes.



**Figura 91** – Diagramas comparativos dos ensaios de compressão axial: a) tensões máximas; b) extensões na força máxima.

Os valores obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais empregues na construção dos muretes em laboratório presentes no Quadro 38, explicam a influência quanto à rotura por compressão que a argamassa possui relativamente à pedra.

**Quadro 38** – Síntese dos valores obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais empregues na construção dos muretes.

	Nº provetes ensaiados	Compressão		Flexão	
		$\sigma$ rotura [MPa]	Emédio [GPa]	$\sigma$ rotura [MPa]	
Pedra	Cilíndricos	20	72,79	22,26	----
	Cúbicos	7	58,7	-----	----
Argamassa	10	0,8	-----	0,37	



## Capítulo VIII. Conclusões

---

### 8.1 Síntese final

No âmbito do presente trabalho foi possível:

- Caracterizar quanto à tipologia e métodos construtivos três paredes de alvenaria diferentes que se encontram com frequência na Zona do Centro Histórico da Cidade de Leiria (CHL), paredes estas que são representativas dos diferentes edifícios existentes na zona de estudo;
- Obter parâmetros caracterizadores do comportamento estrutural dessas paredes de alvenaria de pedra, importantes para suportar futuras intervenções no CHL;
- Realizar 8 ensaios com macacos planos *in-situ* (4 simples + 4 duplos) e 8 em provetes construídos em laboratório (4 simples + 4 duplos);
- Construir dois provetes em laboratório (designados no presente trabalho como muretes), à escala real, com materiais obtidos no próprio CHL, sendo representativos da tipologia e métodos construtivos das paredes originais de onde foram extraídos os materiais;
- Efetuar dois ensaios de carga de compressão uniaxial e dois ensaios de identificação dinâmica nos dois muretes construídos e representativos de um dos tipos de alvenaria do CHL;
- Caracterizar a resistência à compressão dos materiais (pedra e argamassa) utilizados para a construção dos muretes.

### 8.2 Conclusões e considerações finais

O trabalho de investigação desenvolvido sugere parâmetros de apoio à realização de projetos de reabilitação de edifícios históricos, nomeadamente nos edifícios do Centro Histórico de Leiria.

A técnica de ensaio com macacos planos utilizada, quer *in-situ* quer em ambiente laboratorial, revelou ser uma técnica credível, reforçando a credibilidade observada em outros trabalhos de investigação anteriormente desenvolvidos, recomendando assim a sua

utilização. A sua utilização permitiu obter valores de referência para alguns parâmetros caracterizadores do comportamento mecânico das alvenarias presentes no Centro Histórico de Leiria, nomeadamente:

- módulo de elasticidade médio, tendo-se obtido valores compreendidos entre 0,35 GPa e 2,23 GPa;
- tensão média de resistência à compressão, tendo-se neste parâmetro observado valores compreendidos entre 0,7 MPa e 1,0 MPa.

Foram relacionadas as tensões instaladas obtidas nos diversos ensaios simples, com as tensões de resistência à compressão determinadas nos ensaios duplos, concluindo-se que as alvenarias ensaiadas são “competentes” face às ações verticais que lhe estão impostas, uma vez que quase todas apresentam um coeficiente de segurança de 7,5.

Os ensaios de carga de compressão uniaxial nos dois muretes construídos e representativos de um dos tipos de alvenaria do CHL permitiram perceber o comportamento destas alvenarias e obter um diagrama de comportamento até à rotura, importante para a modelação numérica deste tipo de estruturas. Nestes ensaios obteve-se como tensão média de resistência à compressão o valor 0,99 MPa e um módulo de elasticidade médio de 0,36 GPa.

Observou-se que variáveis como a tipologia, heterogeneidade, idade, qualidade dos materiais utilizados, bem como o método construtivo adotado, nomeadamente o emparelhamento das pedras, está diretamente relacionado com a resistência final de uma estrutura de alvenaria de pedra.

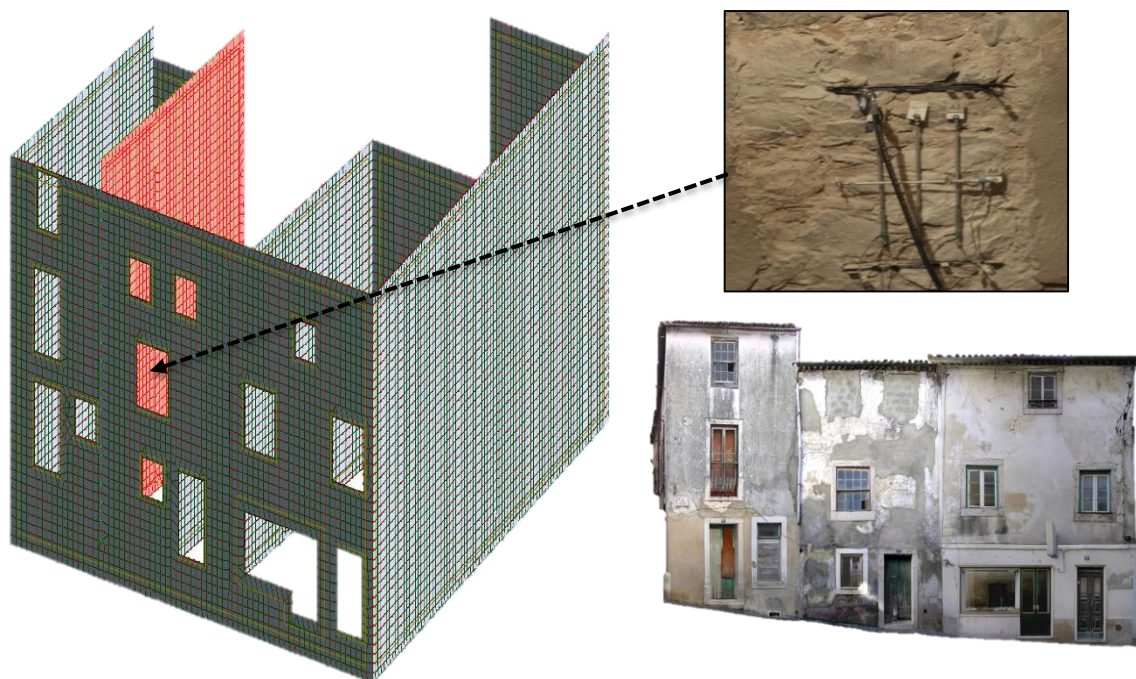
Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos elementos constituintes dos muretes (Quadro 38 do capítulo VII), permitem observar a importância da discrepância entre a resistência da pedra e da argamassa, com o conseqüente impacto na resistência do conjunto, o que acentua a necessidade da realização de ensaios experimentais para avaliação do comportamento estrutural deste tipo de alvenarias.

Através da análise dos resultados obtidos na campanha experimental conclui-se que as paredes de alvenaria de pedra calcária demonstram uma capacidade de carga para ações verticais bastante aceitáveis, sendo possível a aplicação de técnicas de reabilitação/preservação e eventual reforço a ações horizontais pouco intrusivas.

### 8.3 Desenvolvimentos futuros

Sugere-se como complemento/continuidade deste trabalho a realização de ensaios com macacos planos em outros edifícios do Centro Histórico de Leiria, aumentando assim o número da amostra de edifícios estudados e consequentemente a base de dados disponível e o seu grau de confiança.

Com este conhecimento deve ser efetuada a modelação numérica do CHL visando a caracterização do seu comportamento, incluindo a avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico.



*Figura 92 – Modelação numérica de um dos edifícios ensaiados – Edifício D. Afonso Henriques.*



## Bibliografia

---

- [1] Lourenço, P., “*Relatório 99 – DEC/E-7*”, *Engenharia Civil*, 1999, Universidade do Minho.
- [2] Roque, J., “*Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria*”, *Engenharia Civil*, UM, 2002.
- [3] Binda, L., “*The Rehabilitation and Reuse of Historic Masonry Buildings in Italy and Europe*”, Paper Reference: T133-4, *Studies on the Mechanical Behavior of Masonry and Masonry Structures – Selected papers 1975-2000 – Vol. I*, pp. 205-213.
- [4] Pagaimo, F., “*Caracterização morfológica e mecânica de alvenarias antigas: Caso de estudo da vila histórica de Tentúgal*”, Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2004.
- [5] Palma, A., “*Principais métodos de diagnóstico de anomalias de paredes de edifícios antigos. Exemplos de aplicação*”, Tese de mestrado, *Engenharia Civil*, UNL, Lisboa, 2010.
- [6] Appleton, J., “*Reabilitação de Edifícios Antigos – Patologias e Tecnologias de Intervenção*”, Edições Orion, 2ª Edição, Novembro de 2011.
- [7] Mota, K., “*Caracterização e tipificação in situ de paredes de alvenaria de pedra*”, Tese de Mestrado, *Engenharia Civil*, FEUP, Porto, 2009.
- [8] Oliveira, B., “*Análise numérica da representatividade de ensaios com macacos planos em paredes de alvenaria de pedra*”, Tese de mestrado, *Engenharia Civil*, FEUP, Porto, 2010.
- [9] Guimarães, J., “*Técnicas tradicionais de construção, anomalias e técnicas de intervenção em fachadas e coberturas de edifícios antigos*”, Tese de Mestrado, *Engenharia Civil*, Vila Real, 2009.
- [10] 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 Regione Toscana e il Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano, 1998.
- [11] GNDT (Grupo Nazionale per la Difesa dai Terramoti), “*Danno sísmico e vulnerabilità delle chiese dell’Umbria*”, CD-Rom, Itália, (s.d).

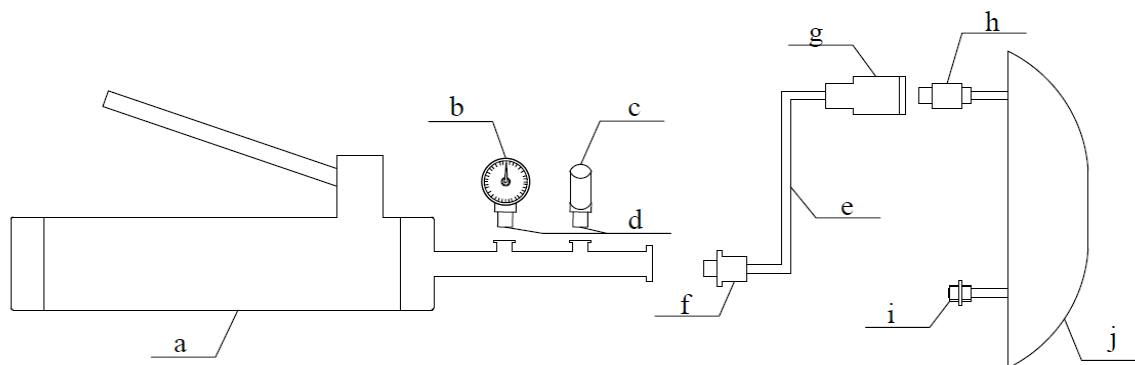
- [12] Binda, A.S., C. Tiraboschi, “ *Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries* ” , Construction and building Materials 14, Department of structural Engineering (D.I.S), Politécnico de Milan, Milan 2000.
- [13] Guimarães, M., “ *Caracterização de paredes de alvenaria de pedra por técnica sónica* “ , Tese de mestrado, Engenharia Civil, FEUP, 2009.
- [14] Miranda, L., “ *Ensaaios acústicos e de macacos planos em alvenarias resistentes* ” , Tese de doutoramento, Engenharia Civil, FEUP, 2011.
- [15] Arêde, A. e Costa, A., “ *Inspeção e diagnóstico estrutural de construções históricas* ” , a intervenção no património.
- [16] Rufo, R., “ *Ensaaios de caracterização mecânica das alvenarias de adobe: Flat-Jack Testing* ” , Tese de mestrado, Engenharia Civil, UA, 2010.
- [17] Binda, L. e Tiraboschi, C., “ *Flat-Jack Test: A slightly destructive technique for the diagnosis of brick and stone masonry structures* ” . Dept. of Structural Engineering Politecnico of Milano, 1999.
- [18] Gregorczyk, P.e.L., P., “ *A review on Flat-Jack Testing* ” , Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2000.
- [19] Vicente, R., “ *Estratégias e metodologisa para intervenções de reabilitação urbana Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra* ” , Tese de doutoramento, Engenharia Civil, UA, 2008.
- [20] ASTM, b., “ *In-situ measurement of masonry deformability properties using flat-jack Method* ” , ASTM Standard C 1197-91b, 1991.
- [21] RILEM LUM.D.3, “ *In-situ strength/elasticity tests on masonry based on the flat jack* ” , 1990b, 1990.
- [22] RILEM, LUM.D.2, “ *In-situ stress tests on masonry based on the flat jack* ” , 1990a, 1990.
- [23] ASTM (1991a), “ *In-situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flat-jack Measurements* ” , ASTM Standard C 1196-91a.
- [24] Mattoso, J., “ *A cidade de Leiria na história medieval de Portugal* ” ,1985.
- [25] Pousão-Smith, S., “ *Rodrigues Lobo, os Vila Real e a estratégia da dissimulação* ” , 2 Volumes, Lisboa, 2008.
- [26] Dinis, C., “ *A reabilitação do Bairro Histórico de Leiria* ” , relatório de estágio, Universidade do Minho, Câmara Municipal de Leiria, 1999.
- [27] Medeiros, C.A., “ *Introdução à Geografia de Portugal* ” , Imprensa Universitária (58), Editorial Estampa, Lisboa, 1987.

- [28] Gonçalves, P., "*A evolução Holocénica do Rio Lis e da Laguna da Pederneira*". Dissertação apresentada ao Departamento de Ciências da Terra para obtenção do grau de Mestre em Geociências Ramo de Ambiente e Ordenamento do Território. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2007.
- [29] Dinis, C., "*Qual é a relação das pessoas com o Centro Histórico*", Departamento de Planeamento e urbanismo, Divisão da habitação e Reabilitação Urbana, C.M.L.
- [30] J.S.B, F., "*Tabelas Técnicas*", 2003.
- [31] Xavier, R., "*Ensaio de caracterização de alvenarias de adobe*", Tese de mestrado, Engenharia Civil, UA, 2011.
- [32] Instituto Português da Qualidade (IPQ), "*Projecto de estruturas de alvenaria – Parte 1-1: Regras gerais para edifícios*", NP EN 1996-1-1:2000, Novembro, 2000.
- [33] CEN, "*Design provisions for earthquake resistance of structures – Part 1-4: Strengthening and repair of buildings*", EN 1998-1-4:1995.
- [34] Maxical, "*Ficha Técnica do produto*", Maxical, Maxieira, website:<http://www.maxical.pt>.
- [35] Carvalho, F.D.S., "*Avaliação numérica da relação entre as propriedades mecânicas da alvenaria de pedra e as dos seus constituintes, para ações verticais*", FEUP, Porto, Julho 2011, 99p.
- [36] Varum, H. et al., "*Caracterização do comportamento estrutural de Paredes de alvenaria de adobe*", Revista da Associação Portuguesa de análise experimental de tensões, Vol. 15 pág. 23-32, Engenharia Civil, 2008.
- [37] Instituto Português da Qualidade (IPQ), "*Método de ensaio para alvenaria – Parte 1: Determinação da resistência à compressão*", NP EN 1052-1:2002, Setembro, 2002.
- [38] Pinho, F., "*Paredes de Alvenaria ordinária – Estudo Experimental com modelos simples e reforçados*", Tese de doutoramento, Engenharia Civil, UNL, Lisboa, 2007.
- [39] IPQ, "*Métodos de ensaio para pedra natural. – Determinação da resistência à compressão uniaxial*", NP EN 1926:2008, Setembro, 2008.
- [40] IPQ, "*Métodos de ensaio de blocos para a Alvenaria – Parte 1: Determinação da resistência à compressão*", NP EN 772 – 1: 2002, Julho, 2002.
- [41] CEN, "*Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*", EN 1015-11:1999, Julho, 1999.
- [42] CEN, "*Methods of test for mortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*", EN 1015-3:1999, September, 1999.
- [43] Andrade, H., "*Caracterização de edifícios antigos. Edifícios "Gaioleiros"*", Tese de mestrado, Engenharia Civil, UNL, Lisboa, 2011, 126p.

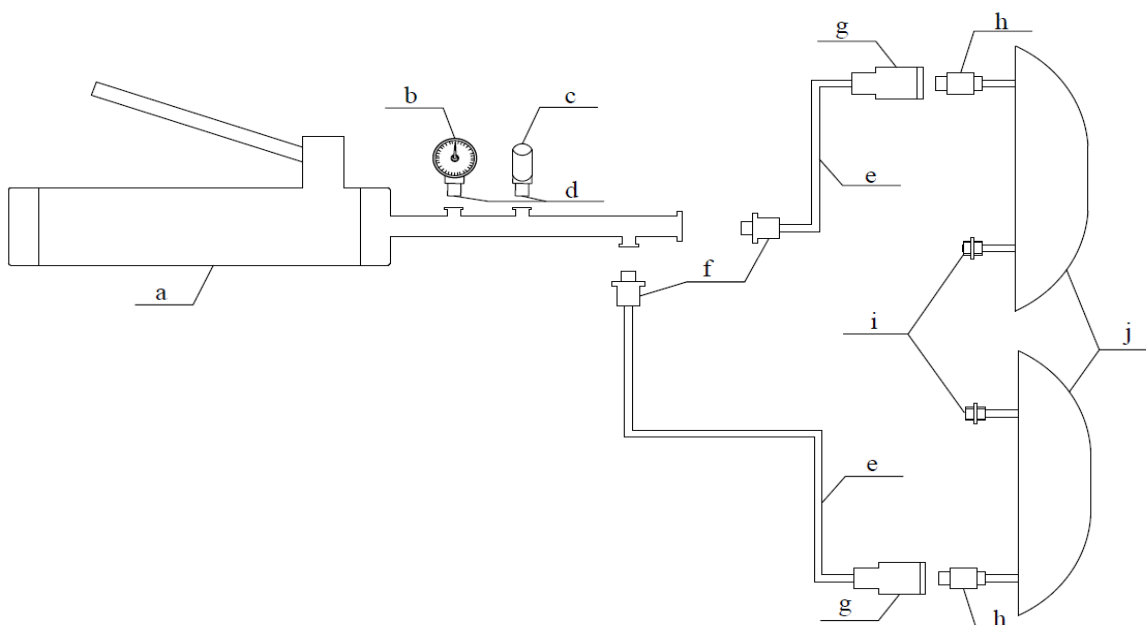
- [44] Instituto Português da Qualidade (IPQ), “Projecto de estruturas de alvenaria – Parte 1-1: Regras gerais para edifícios”, NP EN 1996-1-1:2000, Novembro, 2000.

## Anexo A. Representação esquemática do sistema de ensaio da técnica de MP's

Ensaio simples



Ensaio duplo



**Figura A.1** – Representação esquemática do sistema de ensaio de macacos planos: a) bomba hidráulica manual; b) manômetro hidráulico; c) transdutor de pressão; d) acoplamento roscado; e) tubagem flexível; f) acoplamento de engate rápido (tubagem-bomba); g) acoplamento de engate rápido (tubagem-macaco plano); h) acoplamento; i) terminal rosca macho.



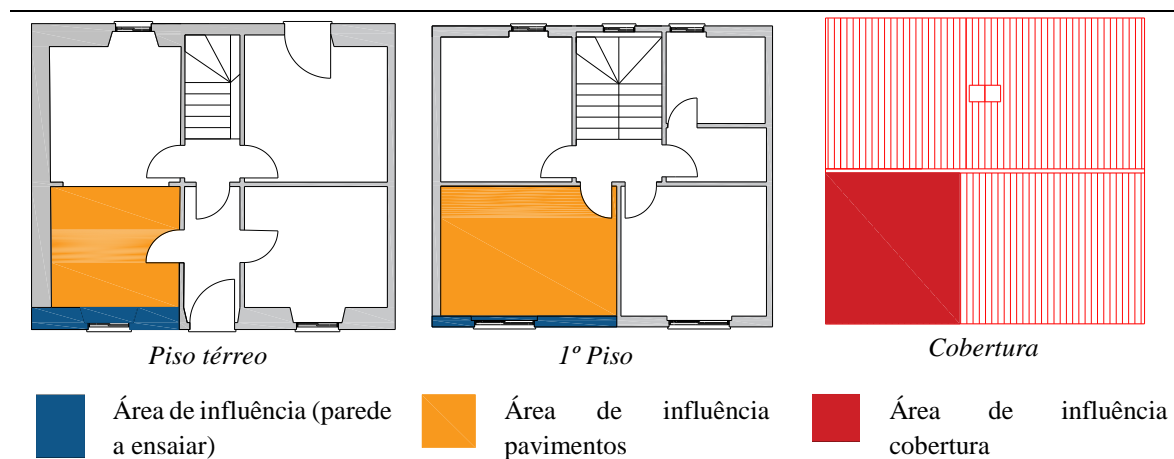
## Anexo B. Caracterização dos edifícios. Estimativas de carga

Em complemento do descrito no capítulo 4.3.3.1, apresentam-se de seguida as estimativas de cargas para os edifícios A,B e C relativamente aos ensaios E2, E3 e E4.

### B.1. Ensaio E2 (Edifício A – Pero Alvito)

A estimativa de tensão calculada, foi em relação à parede de fachada onde iria ser efetuado o ensaio E2 e calculou-se à cota onde se iria realizar o rasgo do ensaio simples. Realça-se que em termos de estimativa de carga para a janela de inspeção E2 em relação à janela E1 a principal diferença, é a altura do rasgo, pois o edifício é o mesmo, alterando somente a localização da janela.

A Figura B.1 ilustra as áreas de influência consideradas para o cálculo analítico.



**Figura B.1** – Plantas do Edifício Pero Alvito com respetivas áreas de influência – Ensaio E2.

Foram admitidas ações permanentes correspondentes ao peso próprio das paredes, às áreas de influência dos pavimentos e cobertura. Não foram consideradas sobrecargas adicionais.

**Quadro B.1** – Valores considerados para a estimativa de cargas do edifício A.

Pisos	Espessura alvenarias [m]	Pé-direito pisos [m]
Piso Térreo	0,57	3,0
1º Piso	0,32	3,12

As ações permanentes e sobrecargas foram considerados valores segundo consulta das tabelas técnicas [30].

Pesos próprio:

- Paredes de alvenaria de pedra calcária:  $\gamma = 22,6 \text{ kN/m}^3$
- Cobertura constituída por telha marselha (com  $33^\circ$  de inclinação) suportada por ripas e varas de madeira  $= 0,7 \text{ kN/m}^2$
- Pavimento com elementos estruturais do tipo solho sobre vigas de madeira e forro de madeira rincoado  $= 0,6 \text{ kN/m}^2$

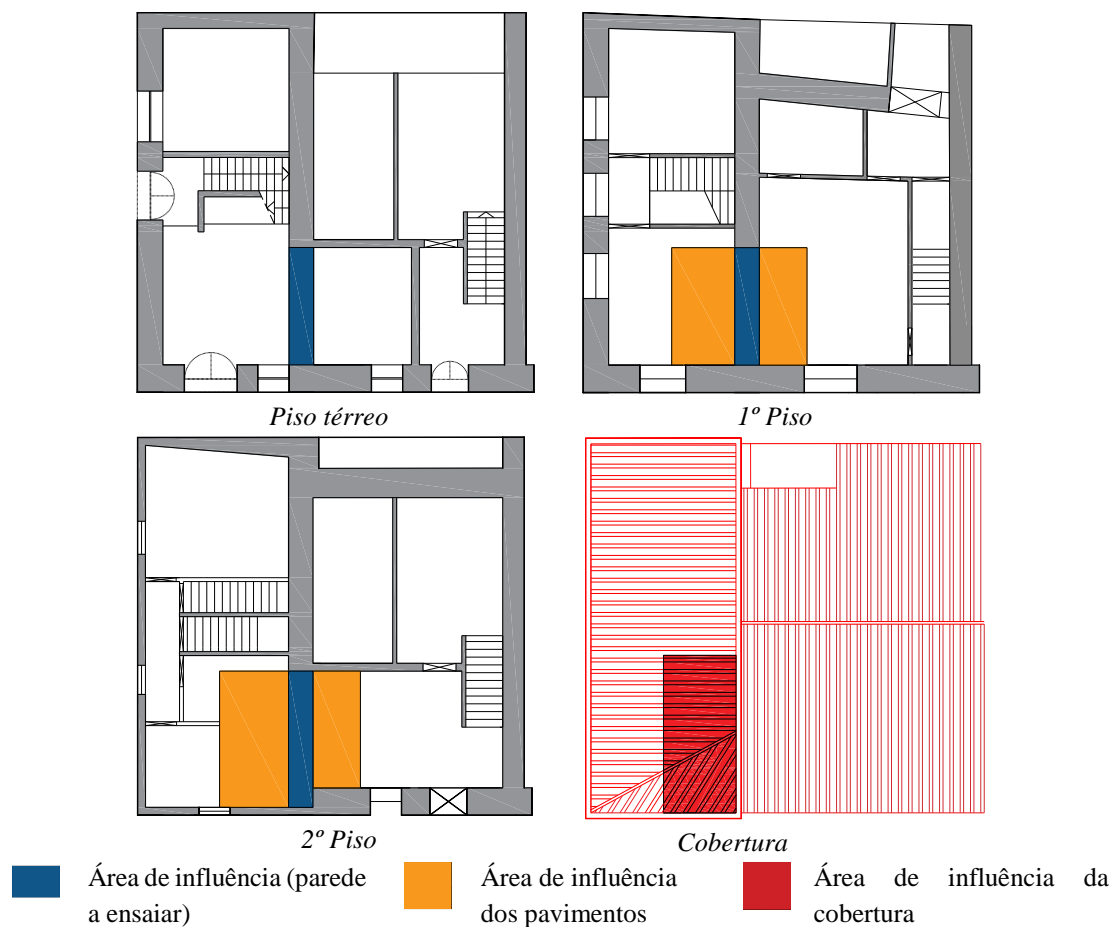
A tensão estimada foi calculada segundo:

- $pp_{\text{cobertura}} = (0,7/\cos(33^\circ)) \times 3,5 = 2,92 \text{ kN/m}$ ;
- $pp_{\text{pavimentos}} = 0,6 \times 2 \times 3,5 = 4,2 \text{ kN/m}$ ;
- $pp_{\text{paredes}} = 22,6 \times [0,57 \times (3-0,46 \text{ (cota do rasgo)}) + 0,32 \times 3,12] = 55,3 \text{ kN/m}$ ;
- $pp_{\text{TOTAL}} = 62,42 \text{ kN/m}$ ;

$$\sigma_{\text{ESTIMADA}} = pp_{\text{TOTAL}}/\text{espessura} = 62,42/0,57 = 109,51 \text{ kN/m}^2 = 0,11 \text{ MPa}.$$

## B.2. Ensaio E3 (Edifício B – D. Afonso Henriques)

A estimativa de tensão calculada, foi em relação a uma parede meeira onde descarregam elementos estruturais dos dois edifícios delimitados por esta mesma parede, onde iria ser efetuado o ensaio e calculou-se à cota onde se iria realizar o rasgo para a realização do ensaio simples correspondendo à janela de inspeção E3.



**Figura B.2** – Plantas do Edifício D. Afonso Henriques com respetivas áreas de influência.

Foram admitidas ações permanentes correspondentes ao peso próprio das paredes, às áreas de influência dos pavimentos e cobertura. Não foram consideradas sobrecargas adicionais.

**Quadro B.2** – Valores considerados para a estimativa de cargas do edifício B.

Pisos	Espessura alvenarias [m]	Pé-direito pisos [m]
Piso Térreo	0,73	3,0
1º Piso	0,6	2,6
2º Piso	0,6	2,6
Cobertura	0,6	1,38

As ações permanentes e sobrecargas foram considerados valores segundo consulta das tabelas técnicas [30].

Pesos próprio:

- Paredes de alvenaria de pedra calcária:  $\gamma = 22,6 \text{ kN/m}^3$
- Cobertura constituída por telha canudo (com  $17,23^\circ$  de inclinação) suportada por ripas e varas de madeira =  $1,45 \text{ kN/m}^2$
- Pavimento com elementos estruturais do tipo solho sobre vigas de madeira e forro de madeira rincoado =  $0,6 \text{ kN/m}^2$

A tensão estimada foi calculada segundo:

- $pp_{\text{cobertura}} = (1,45/\cos(17,23^\circ)) \times 2,1 = 3,2 \text{ kN/m}$ ;
- $pp_{\text{pavimentos}} = 0,6 \times 3 \times 4,6 = 8,28 \text{ kN/m}$ ;
- $pp_{\text{paredes}} = 22,6 \times [0,73 \times (3 - 0,51(\text{cota do rasgo})) + 0,6 \times 2,6 + 0,6 \times 2,6 + 0,6 \times 1,38] = 130,3 \text{ kN/m}$ ;
- $pp_{\text{TOTAL}} = 141,78 \text{ kN/m}$ ;
- $\sigma_{\text{ESTIMADA}} = pp_{\text{TOTAL}}/\text{espessura} = 141,78/0,73 = 194,2 \text{ kN/m}^2 = 0,194 \text{ MPa}$ .

### B.3. Estimativa de tensão instalada – Edifício C – Largo da Sé

A estimativa de tensão calculada, foi em relação a uma parede de fachada, onde iria ser efetuado o ensaio e calculou-se à cota onde se pretendia realizar o rasgo para a realização do ensaio simples.



**Figura B.3** – Plantas do Edifício Largo da Sé com respetivas áreas de influência.

Foram admitidas ações permanentes correspondentes ao peso próprio das paredes, às áreas de influência dos pavimentos e cobertura. Não foram consideradas sobrecargas adicionais. Salienta-se que os elementos estruturais do pavimento do piso 1 descarregavam na alvenaria a ensaiar o mesmo não acontecendo aos elementos estruturais dos pavimentos dos restantes pisos.

**Quadro B.3** – Valores considerados para a estimativa de cargas do edifício B.

Pisos	Espessura alvenarias [m]	Pé-direito pisos [m]
Piso Térreo	0,6	2,50
1º Piso	0,6	2,63
2º Piso	0,6	2,63

As ações permanentes e sobrecargas foram considerados valores segundo consulta das tabelas técnicas [30].

Pesos próprio:

- Paredes de alvenaria de pedra calcária:  $\gamma = 22,6 \text{ kN/m}^3$
- Cobertura constituída por telha canudo (com  $20^\circ$  de inclinação) suportada por ripas e varas de madeira  $= 1,45 \text{ kN/m}^2$
- Pavimento com elementos estruturais do tipo solho sobre vigas de madeira e forro de madeira rincoado  $= 0,6 \text{ kN/m}^2$

A tensão estimada foi calculada segundo:


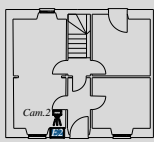

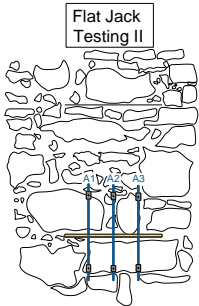

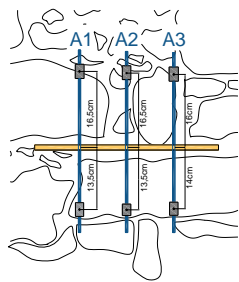
- $pp_{\text{cobertura}} = (1,45/\cos(20^\circ)) \times 3,9 = 6,02 \text{ kN/m}$ ;
- $pp_{\text{pavimentos}} = 0,6 \times 3,2 = 1,92 \text{ kN/m}$ ;
- $pp_{\text{paredes}} = 22,6 \times [0,6 \times (2,5 - 0,59(\text{cota do rasgo})) + 0,6 \times 2,63 + 0,6 \times 2,63] = 97,23 \text{ kN/m}$ ;
- $pp_{\text{TOTAL}} = 105,17 \text{ kN/m}$ ;
- $\sigma_{\text{ESTIMADA}} = pp_{\text{TOTAL}}/\text{espessura} = 105,17/0,6 = 175,28 \text{ kN/m}^2 = 0,175 \text{ MPa}$ .

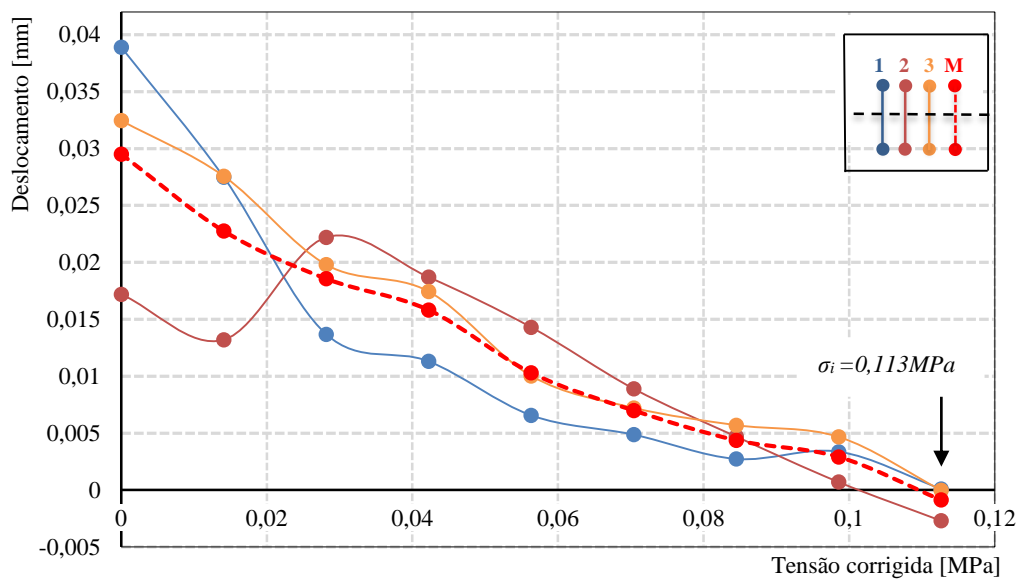
# Anexo C. Campanha de ensaios. Ensaios com macacos planos in-situ

## C.1. Ensaio Simples

### C.1.1. Ensaio E2 – Edifício Pero Alvito

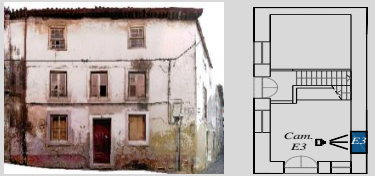
*Quadro C.1 – Síntese dos resultados obtidos no ensaio simples E2.*

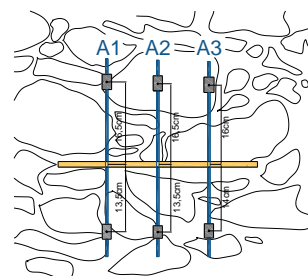
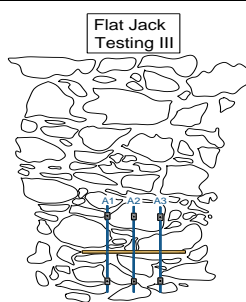
ENSAIO E2 SIMPLES EDIFÍCIO A – PERO ALVITO Rua Pero Alvito nº 12 – Centro Histórico de Leiria			
			
Macaco Plano	$K_m=0,64$	Observações: 1 – Existência de um orifício na janela de inspeção, originado pela ausência de madeira deteriorada.	
MPSO3Inf.	$K_a=0,45$		
Tensão instalada, $\sigma_i$ (MPa):		0,113	



## C.1.2. Ensaio E3 – Edifício D. Afonso Henriques

*Quadro C.2 – Síntese dos resultados obtidos no ensaio simples E3.*

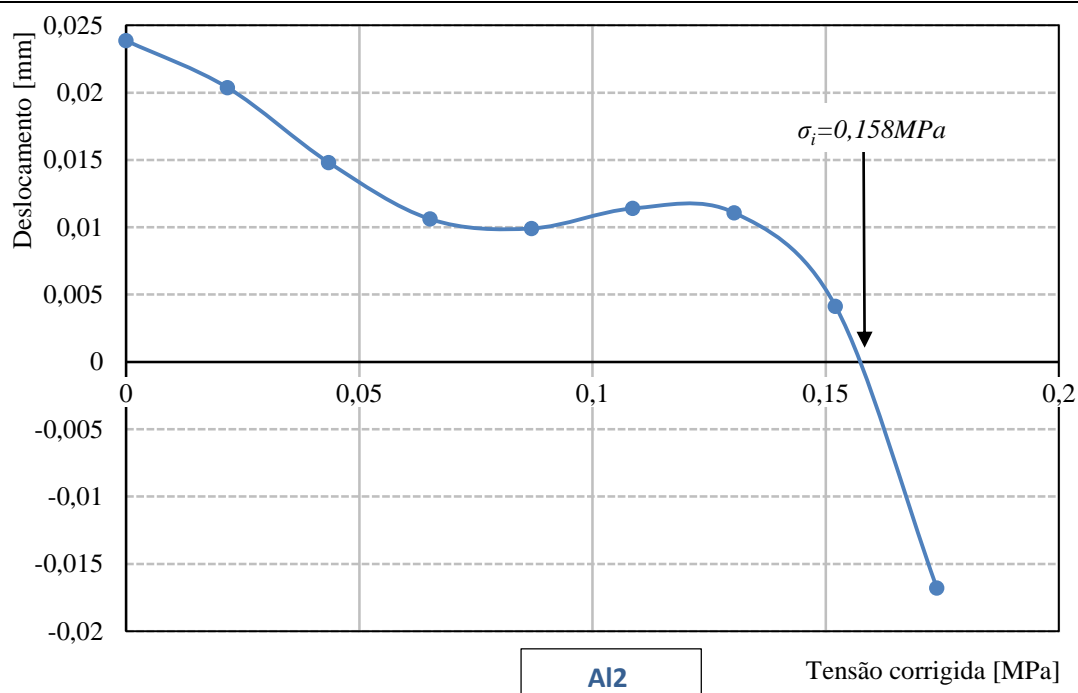
<p><b>ENSAIO E3 SIMPLES</b>  <b>EDIFÍCIO B – D. Afonso Henriques</b>          Rua D. Afonso Henriques nº 31 – Centro Histórico de Leiria</p>	
--	---



Macaco Plano	$K_m=0,64$
MPSO3Inf.	$K_a=0,68$
Tensão instalada, $\sigma_i$ (MPa): 0,158	

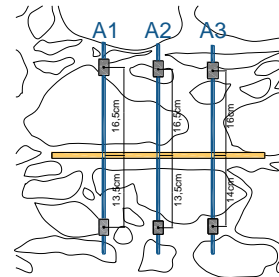
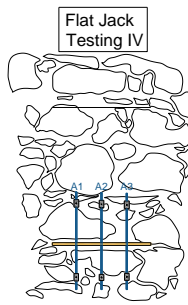
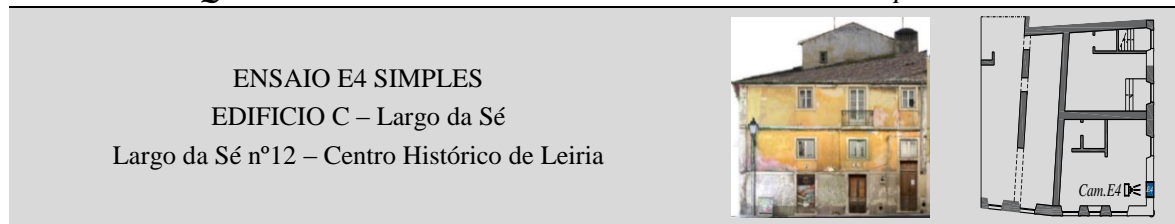
Observações:

- 1 – Só se obteve registos para o AL2;
- 2 – A alvenaria era constituída por uma elevada percentagem de pedra.

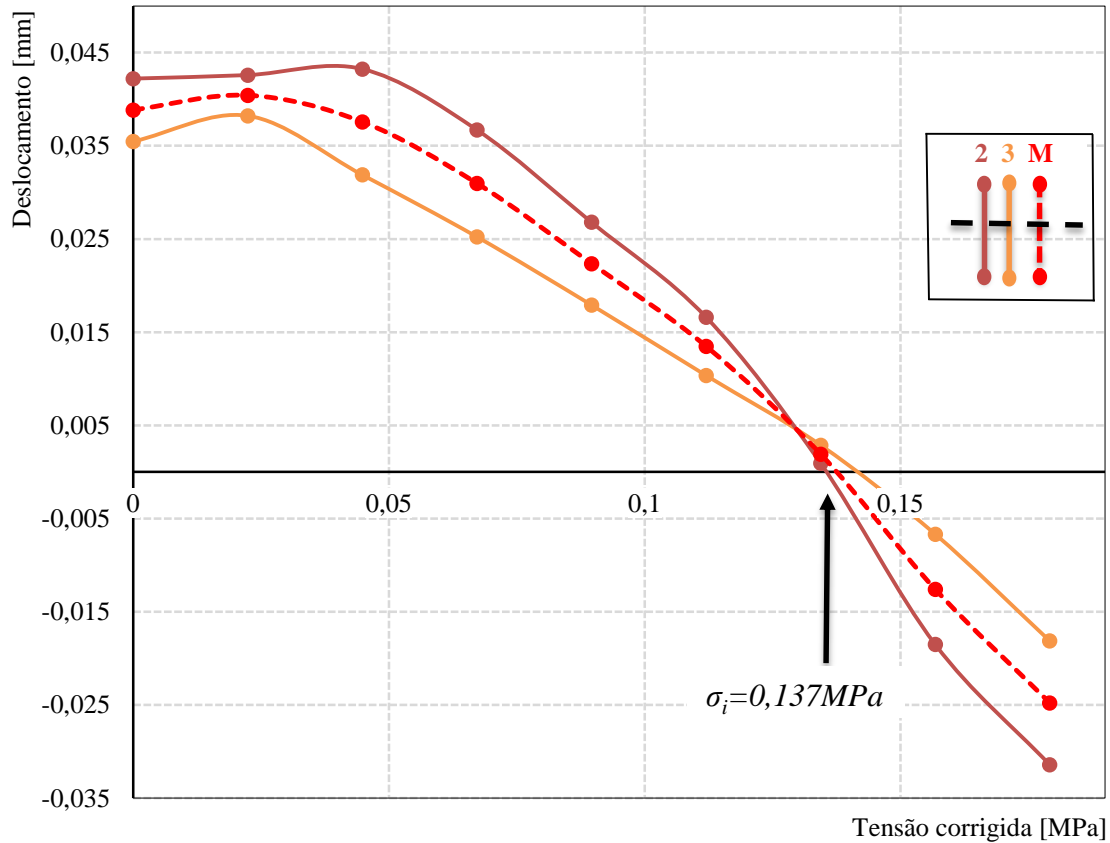


### C.1.3. Ensaio E4 – Largo da Sé

**Quadro C.3 – Síntese dos resultados obtidos no ensaio simples E4.**




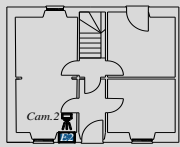


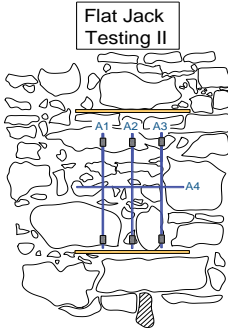
Macaco Plano	$K_m=0,64$	<p>Observações:</p> <p>1 – Registo incoerente relativo ao AL1 devido a deslocamento do ponto de referência;</p> <p>2 – A alvenaria apresentava juntas de argamassa de espessura considerável.</p>
MPSO3Inf.	$K_a=0,68$	
Tensão instalada, $\sigma_i$ (MPa):		0,137

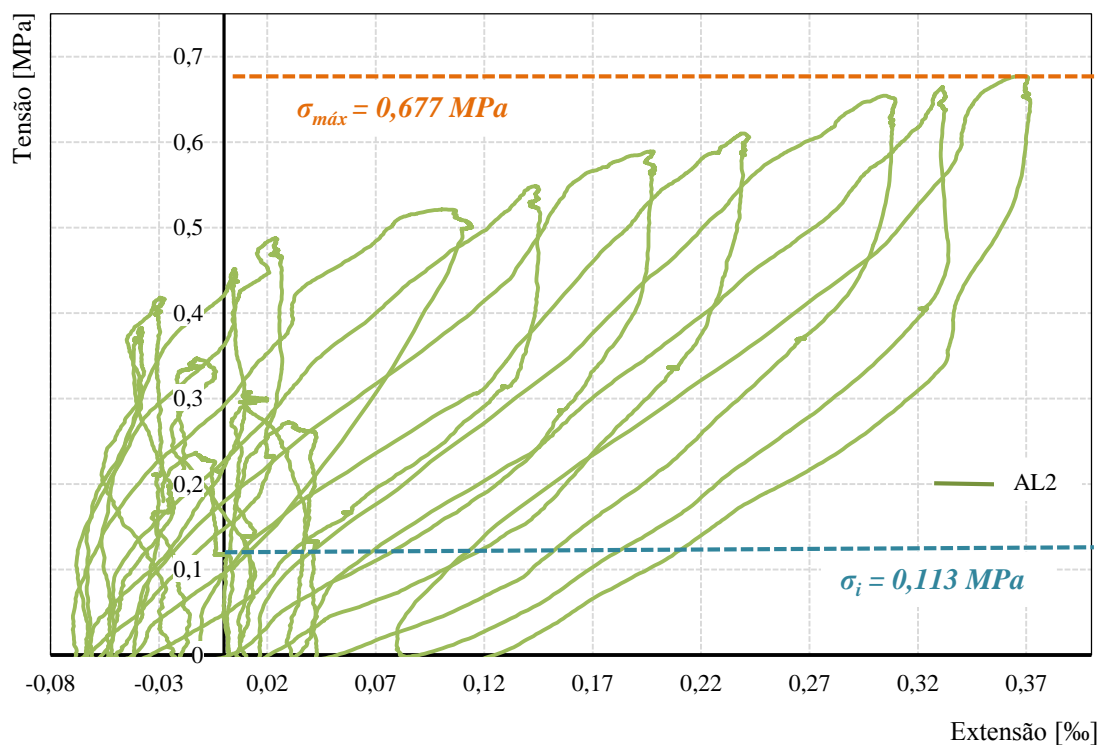


## C.2. Ensaio Duplo

### C.2.1. Ensaio E2 – Edifício Pero Alvito

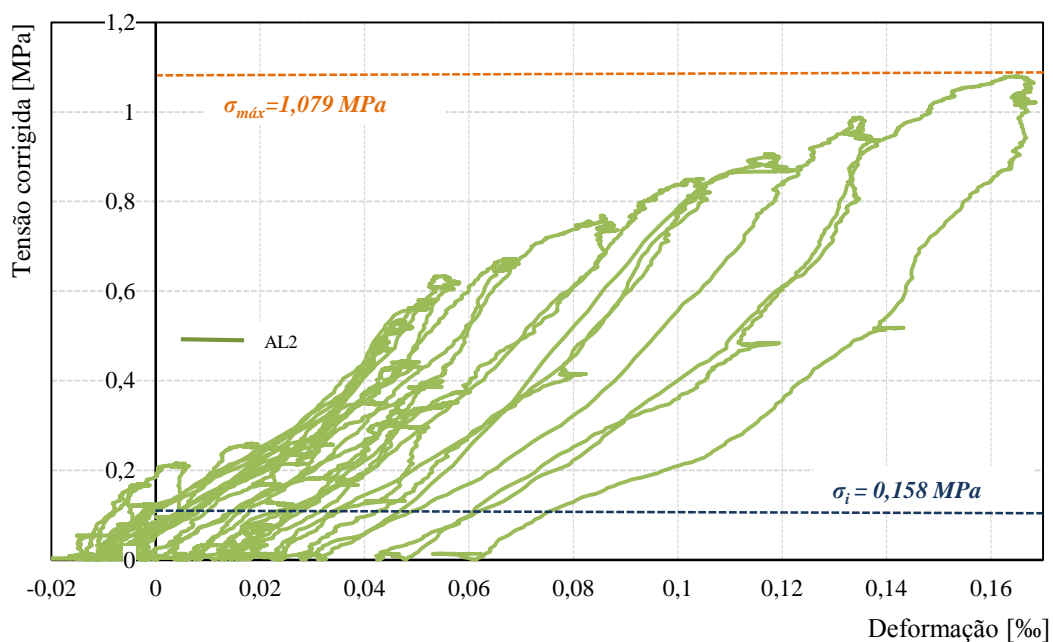
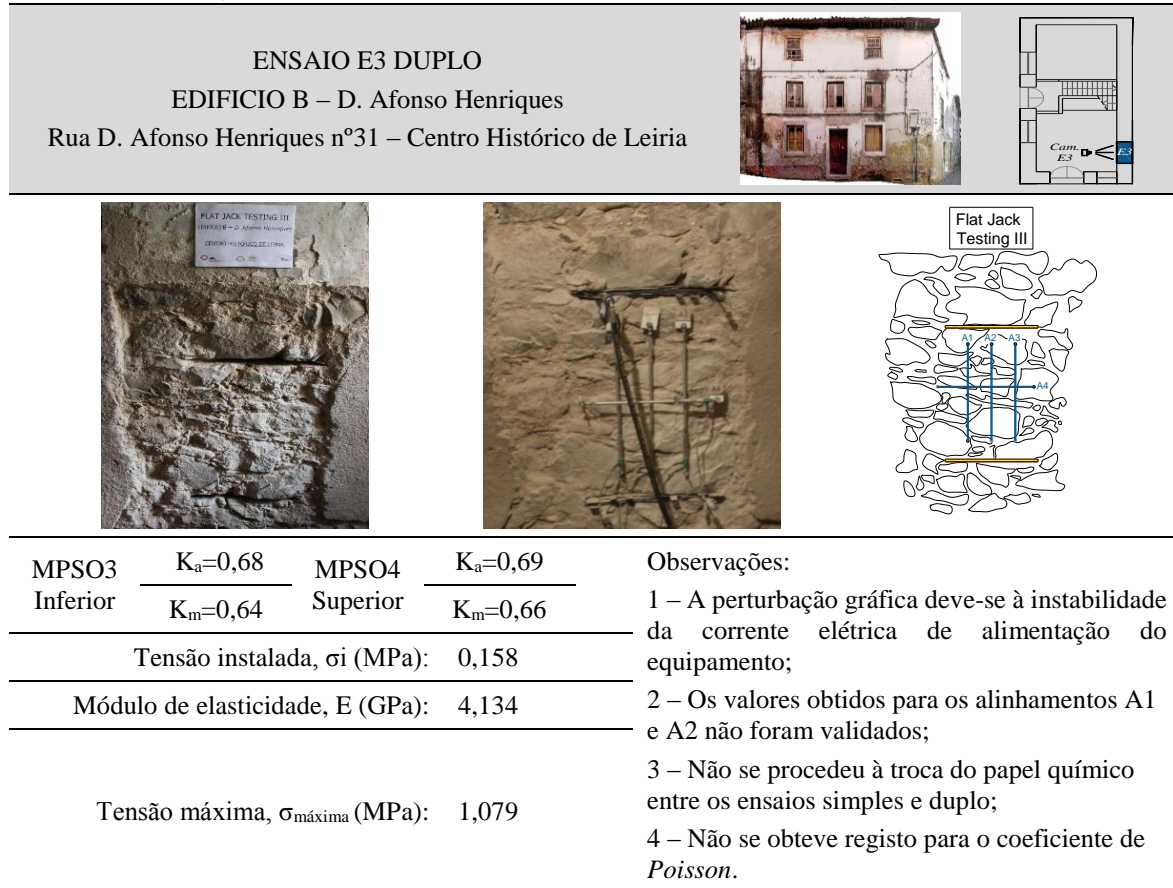
*Quadro C.4 – Síntese dos resultados obtidos no ensaio duplo E2.*

ENSAIO E2 DUPLO EDIFÍCIO A – PERO ALVITO Rua Pero Alvito nº 12 - Centro Histórico de Leiria				 
				
MPSO3 Inferior	$K_a=0,45$ $K_m=0,64$	MPSO4 Superior	$K_a=0,52$ $K_m=0,66$	Observações: 1 – Perturbação inicial devido à presença de vazios. 2 – Não foi possível a obtenção de valores para os alinhamentos A1, A3 e A4 correspondente ao coeficiente de <i>Poisson</i> . 3 – Não se efetuou a troca do papel químico entre o ensaio simples e duplo.
Tensão instalada, $\sigma_i$ (MPa): 0,113				
Módulo de elasticidade, E (GPa): 0,59				
Tensão máxima, $\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa): 0,677				



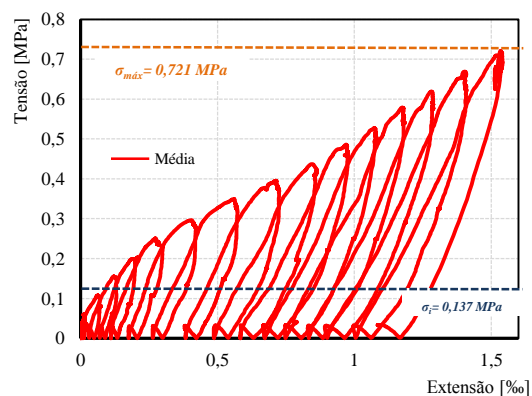
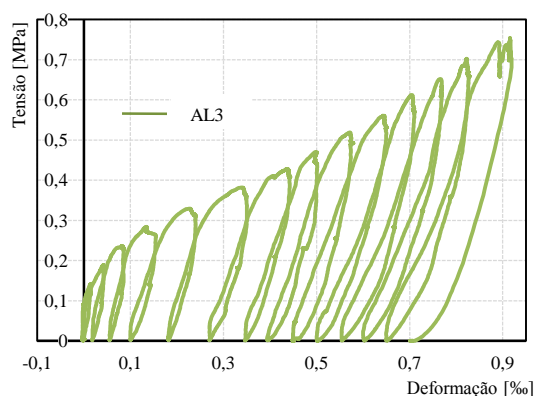
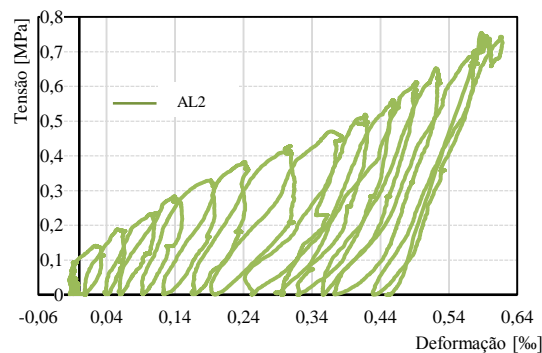
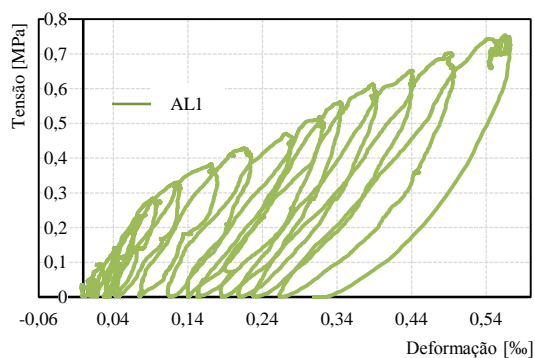
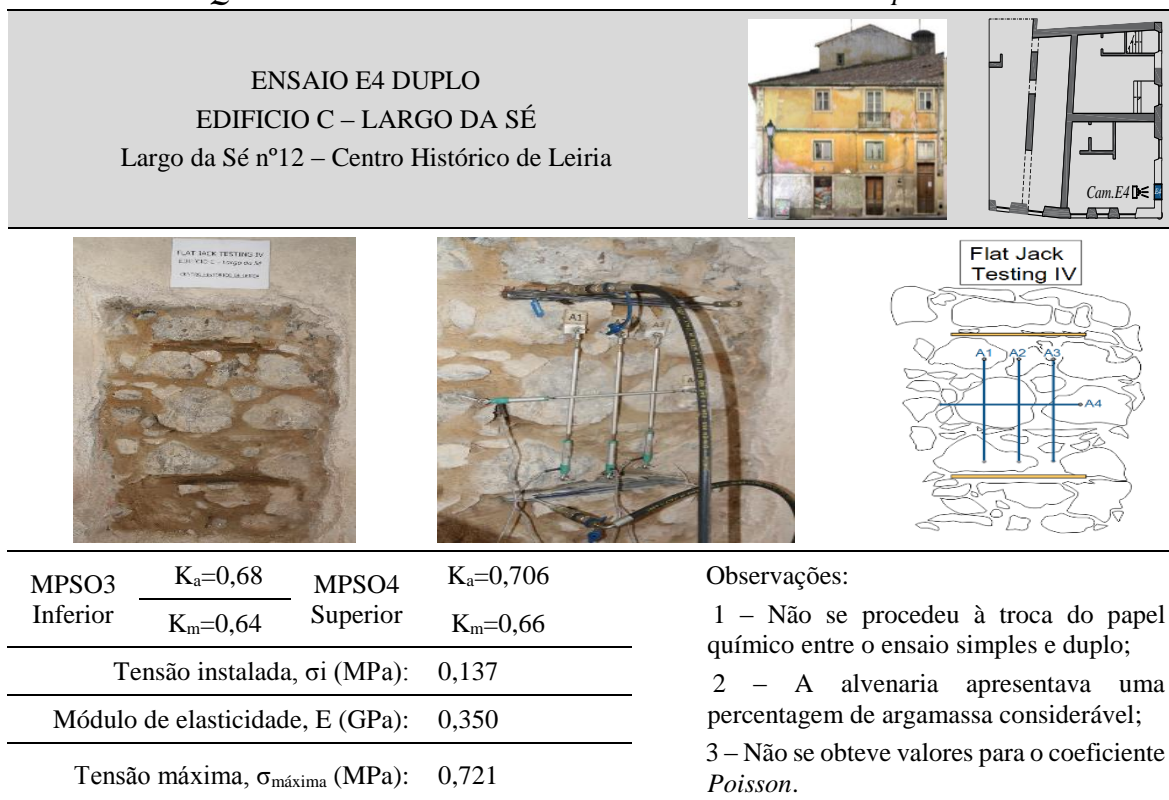
## C.2.2. Ensaio E3 – Edifício D. Afonso Henriques

*Quadro C.5 – Síntese dos resultados obtidos no ensaio duplo E3.*



## C.2.3. Ensaio E4 – Edifício Largo da Sé

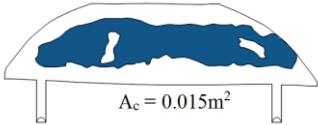
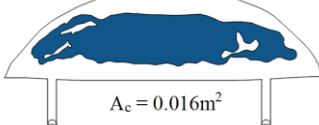
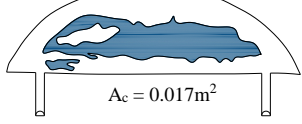
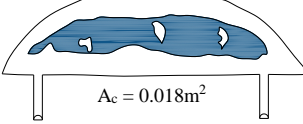
**Quadro C.6 – Síntese dos resultados obtidos no ensaio duplo E4.**



### C.3. Parâmetro Ka

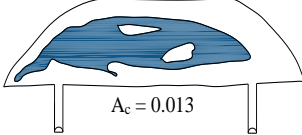
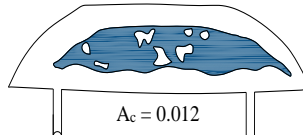
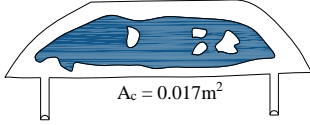
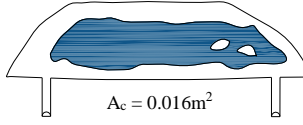
#### C.3.1. Edifício Pero Alvito – Ensaio E1

*Quadro C.7 – Áreas de contato Ensaio E1 – Pero Alvito.*

Ensaio	Áreas efetivas de carregamento	
Ensaio simples	<p>Face inferior MPSO3</p>  <p><math>A_c = 0.015\text{m}^2</math></p>	<p>Face superior MPSO3</p>  <p><math>A_c = 0.016\text{m}^2</math></p>
	$k_a = 0.55$	
Ensaio duplo	<p>Face inferior MPSO4</p>  <p><math>A_c = 0.017\text{m}^2</math></p>	<p>Face superior MPSO4</p>  <p><math>A_c = 0.018\text{m}^2</math></p>
	$k_a = 0.625$	

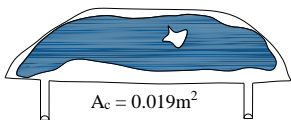
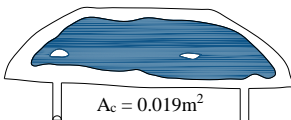
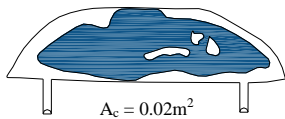
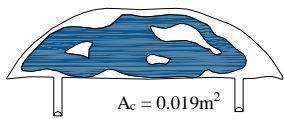
#### C.3.2. Edifício Pero Alvito – Ensaio E2

*Quadro C.8 – Áreas de contato Ensaio E2 – Pero Alvito.*

Ensaio	Áreas efetivas de carregamento	
Ensaio simples	<p>Face inferior MPSO3</p>  <p><math>A_c = 0.013</math></p>	<p>Face superior MPSO3</p>  <p><math>A_c = 0.012</math></p>
	$k_a = 0.45$	
Ensaio duplo	<p>Face inferior MPSO4</p>  <p><math>A_c = 0.017\text{m}^2</math></p>	<p>Face superior MPSO4</p>  <p><math>A_c = 0.016\text{m}^2</math></p>
	$k_a = 0.589$	

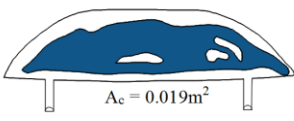
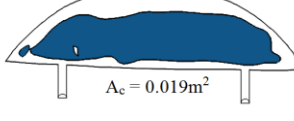
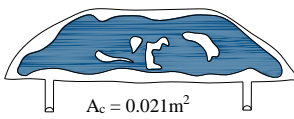
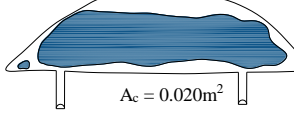
### C.3.3. Edifício D. Afonso Henriques – Ensaio E3

**Quadro C.9 – Áreas de contato Ensaio E3 – D. Afonso Henriques**

Ensaio	Áreas efetivas de carregamento	
Ensaio simples	<p>Face inferior MPSO3</p>  <p><math>A_c = 0.019m^2</math></p>	<p>Face superior MPSO3</p>  <p><math>A_c = 0.019m^2</math></p>
	$k_a = 0.68$	
Ensaio duplo	<p>Face inferior MPSO4</p>  <p><math>A_c = 0.02m^2</math></p>	<p>Face superior MPSO4</p>  <p><math>A_c = 0.019m^2</math></p>
	$k_a = 0.7$	

### C.3.4. Edifício Largo da Sé – Ensaio E4





**Quadro C.10 – Áreas de contato Ensaio E4 – Largo da Sé.**

Ensaio	Áreas efetivas de carregamento	
Ensaio simples	<p>Face inferior MPSO3</p>  <p><math>A_c = 0.019m^2</math></p>	<p>Face superior MPSO3</p>  <p><math>A_c = 0.019m^2</math></p>
	$k_a = 0.68$	
Ensaio duplo	<p>Face inferior MPSO4</p>  <p><math>A_c = 0.021m^2</math></p>	<p>Face superior MPSO4</p>  <p><math>A_c = 0.020m^2</math></p>
	$k_a = 0.732$	

## **Anexo D. Pedra armazenada em laboratório para construção dos muretes**

### **D.1. Pesagem da pedra armazenada em laboratório**

*Quadro D.1 – Pesagem da pedra empregue na construção das alvenarias.*

Pesagem da Pedra em laboratório		
Fração 1 [kg]	Fração 2 [kg]	Fração 3 [kg]
		
2025,168	1515,65	827,50
Total de pedra transportada para Laboratório [kg]		4368,32
Pedra não utilizada na construção dos muretes [kg]		370,79



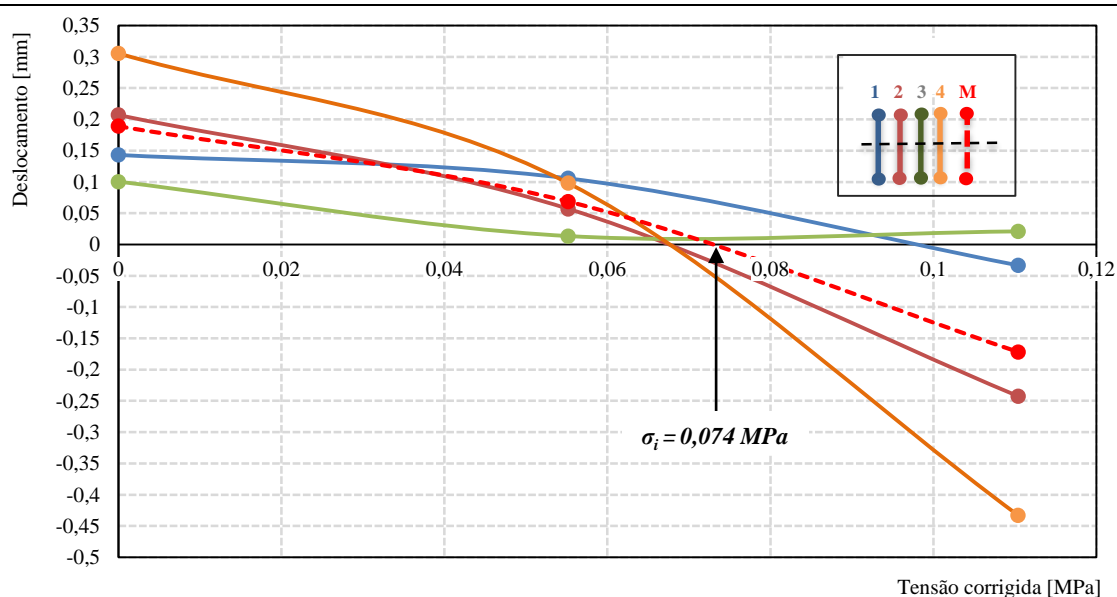
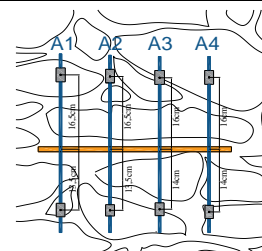
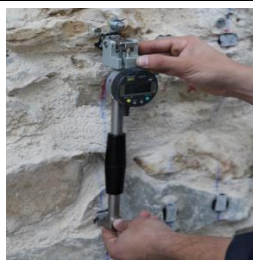
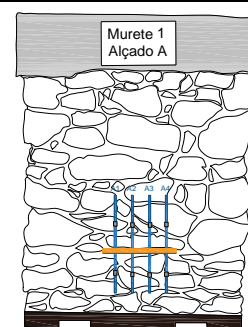
# Anexo E. Ensaios de macacos planos em laboratório

## E.1. Ensaio Simples

### E.1.1. Murete 1 – Alçado A

**Quadro E.1 – Síntese dos resultados obtidos no ensaio simples MLI.**

Flat Jack Testing MLI				
Murete 1 – Alçado A - Ensaio Simples				
Ensaio:	Simples			
Murete:	1			
Macaco Plano:	MPSO1Inf.			
Ka:	0,61			
Km:	0,69			
Tensão instalada, $\sigma_i$ (MPa):	0,074			
	A1	A2	A3	A4
Distâncias Iniciais [mm]	295,911	296,145	296,271	296,475
Observações:	1 - Foram realizadas três leituras para cada incremento de pressão; 2- O restabelecimento do alinhamento A3 não foi atingido.			



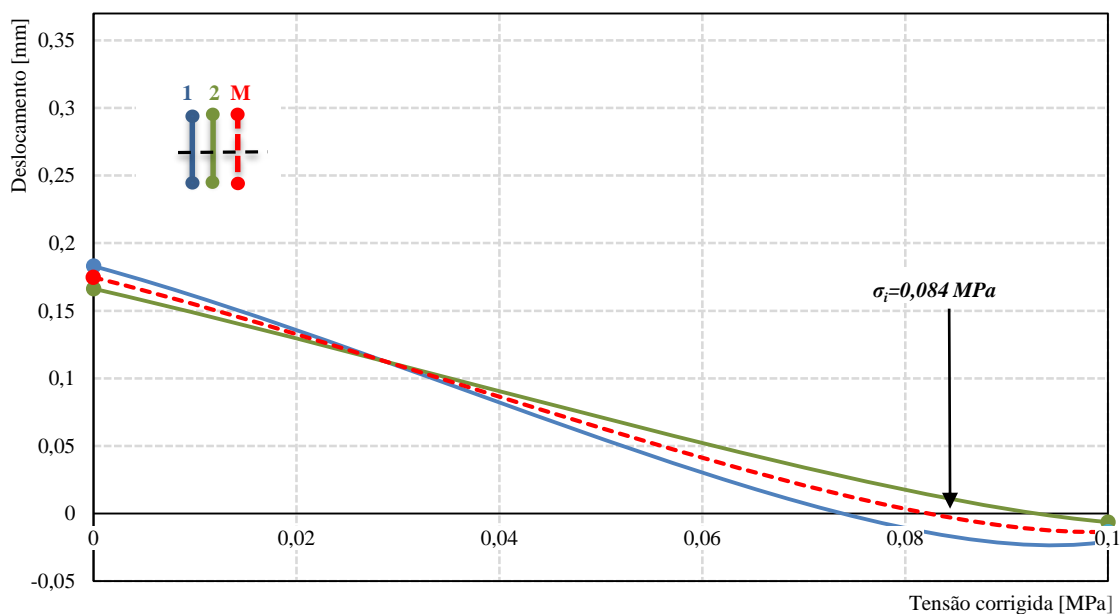
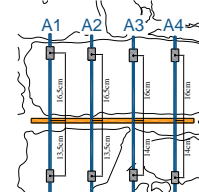
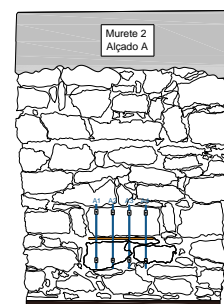
Pressão no macaco (Psi)	A1 (mm)	A2 (mm)	A3* (mm)	A4 (mm)	Tensão não corrigida (MPa)	Tensão corrigida (MPa)	Restabelecimento		
							A1	A2	A4
0	295,768	295,938	296,171	296,170	0,000	0,000	0,143	0,207	0,306
20	295,805	296,088	296,258	296,377	0,138	0,055	0,106	0,057	0,098
40	295,944	296,388	296,250	296,908	0,276	0,110	-0,033	-0,243	-0,433

Nota\*: O restabelecimento relativo ao alinhamento A3 não foi atingido.

## E.1.2. Murete 2 – Alçado A

**Quadro E.2 – Síntese dos resultados obtidos no ensaio simples MLIII.**

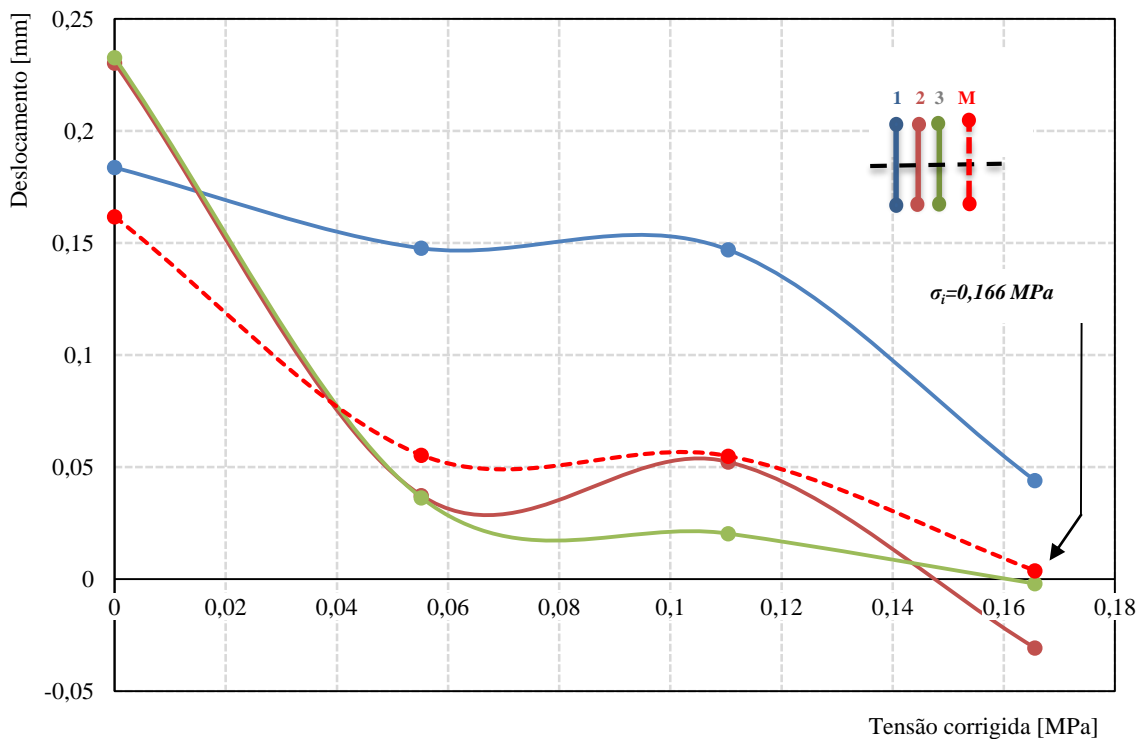
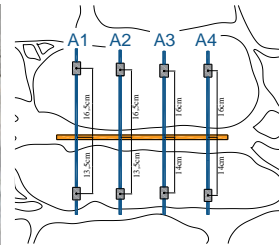
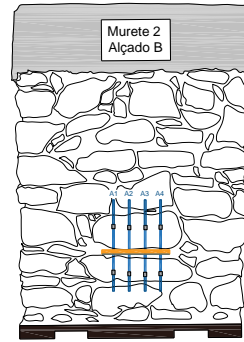
Flat Jack Testing MLIII				
Murete 2 – Alçado A - Ensaio Simples				
Ensaio:	Simples			
Murete:	2			
Macaco Plano:	MPSO1Inf.			
Ka:	0,59			
Km:	0,69			
Tensão instalada, $\sigma_i$ (MPa): 0,084				
	A1	A2	A3	A4
Distâncias Iniciais [mm]	295,464	295,568	295,164	295,425
Observações:	<p>1 – O restabelecimento do alinhamento A3 e A4 não foi atingido;</p> <p>2 – Foram realizadas 3 leituras para cada Alinhamento.</p>			



### E.1.3. Murete 2 – Alçado B

**Quadro E.3 – Síntese dos resultados obtidos no ensaio simples MLIV.**

Flat Jack Testing MLIV				
Murete 2 – Alçado B - Ensaio Simples				
Ensaio:	Simples			
Murete:	2			
Macaco Plano:	MPSO1Inf.			
Ka:	0,57			
Km:	0,69			
Tensão instalada, $\sigma_i$ (MPa):	0,166			
	A1	A2	A3	A4
Distâncias Iniciais [mm]	295,688	295,315	295,549	—
Observações:	1 – Não se obteve valores para o alinhamento A4; 2- O restabelecimento do alinhamento A1 não foi atingido.			





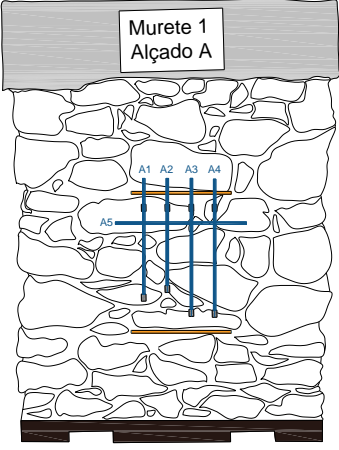
Pressão no macaco (Psi)	A1* (mm)	A2 (mm)	A3 (mm)	A4** (mm)	Tensão não corrigida (MPa)	Tensão corrigida (MPa)	Restabelecimento		
							A1	A2	A3
0	295,504	295,085	295,316	-----	0,000	0,000	0,184	0,230	0,233
20	295,540	295,278	295,512	-----	0,138	0,055	0,148	0,037	0,036
40	295,541	295,263	295,528	-----	0,276	0,110	0,147	0,052	0,020
60	295,644	295,346	295,551	-----	0,414	0,166	0,044	-0,031	-0,002

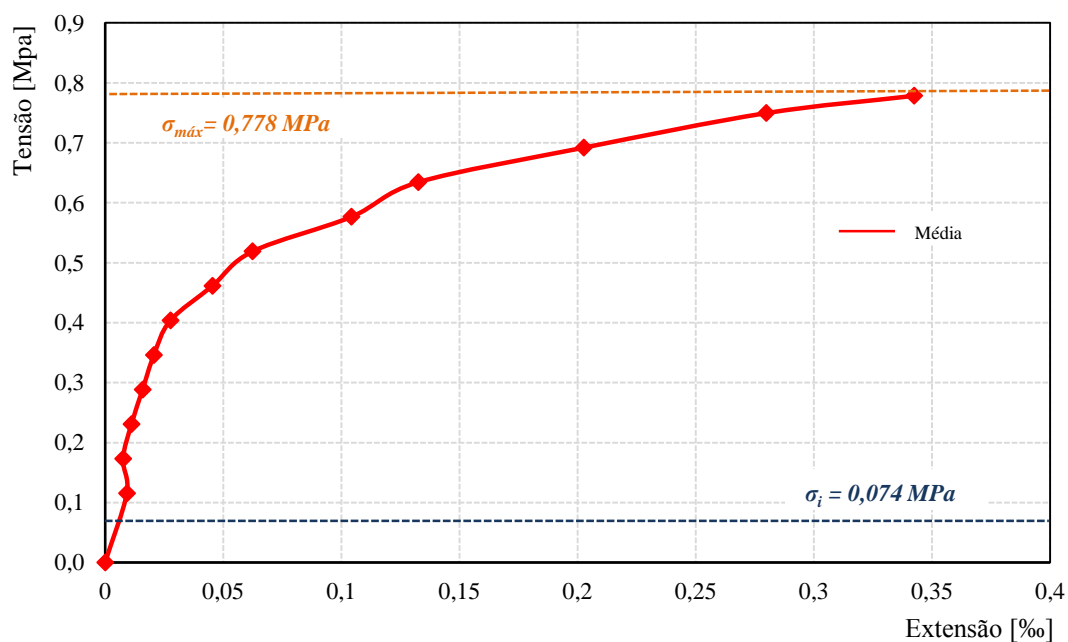
Nota\*: O restabelecimento relativo ao alinhamento A1 não foi atingido.

## E.2. Ensaio duplo

### E.2.1. Murete 1 – Alçado A



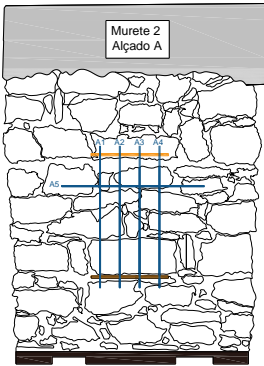
**Quadro E.4 – Valores obtidos correspondentes ao ensaio duplo MLI.**

Flat Jack Testing MLI – Murete 1 – Alçado A			
Ensaio Duplo			
			
MPSO1	$K_a=0,61$	MPSO2	$K_a=0,68$
Inferior	$K_m=0,69$	Superior	$K_m=0,68$
Tensão instalada, $\sigma_i$ (MPa):		0,074	
Módulo de elasticidade, E (GPa):		1,88	
Tensão máxima, $\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa):		0,778	
<p>Observações:</p> <p>1 – Não foi realizada a troca do papel químico entre o ensaio simples e ensaio duplo;</p> <p>2 – O valor obtido para o coeficiente de <i>Poisson</i> não foi validado;</p> <p>3 – O AL1 apresentava um desvio considerável em relação à média dos outros alinhamentos.</p>			





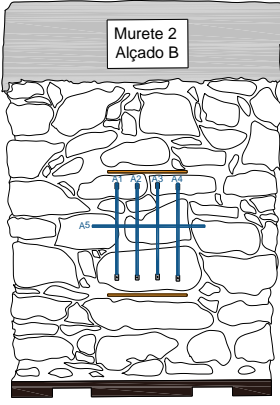
## E.2.2. Murete 2 – Alçado A

**Quadro E.5 – Valores obtidos correspondentes ao ensaio duplo MLIII.**

Flat Jack Testing MLIII – Murete 2 – Alçado A				
Ensaio Duplo				
				
MPSO1	$K_a=0,59$	MPSO2	$K_a=0,661$	Observações: 1 – Os valores obtidos mostraram incoerência para análise; 2 – Grande desprendimento de argamassa na zona do rasgo na execução do corte para o ensaio duplo; 3 – Os valores deste ensaio não foram validados neste estudo.
Inferior	$K_m=0,69$	Superior	$K_m=0,656$	
Tensão instalada, $\sigma_i$ (MPa):				
Módulo de elasticidade, E (MPa):				-----
Tensão máxima, $\sigma_{m\acute{a}xima}$ (MPa):				-----

## E.2.3. Murete 2 – Alçado B

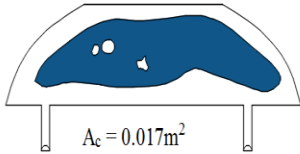
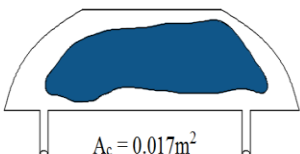
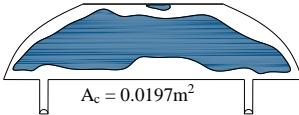
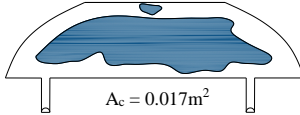
**Quadro E.6 – Valores obtidos correspondentes ao ensaio duplo MLIV.**

Flat Jack Testing MLIV – Murete 2 – Alçado B				
Ensaio Duplo				
				
MPSO1	$K_a=0,57$	MPSO3	$K_a=0,576$	Observações: 1 – O macaco plano MPSO2Sup. atingiu a rutura pela soldadura; 2 – Não se obteve qualquer valor para este ensaio, com exceção das áreas de contato e parâmetro de calibração.
Inferior	$K_m=0,69$	Superior	$K_m=0,656$	
Tensão instalada, $\sigma_i$ (MPa):				
Módulo de elasticidade, E (GPa):				-----
Tensão máxima, $\sigma_{m\acute{a}xima}$ (MPa):				-----

## E.3. Parâmetro Ka

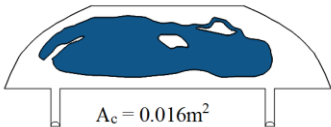
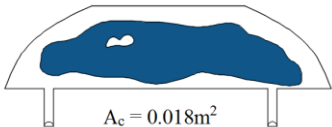
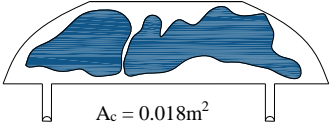
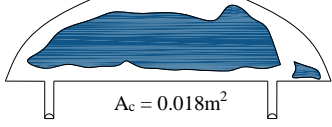
### E.3.1. Murete 1/Alçado A – Ensaio MLI

**Quadro E.7 – Áreas de contato Ensaio MLI – Murete 1/Alçado A.**

Ensaio	Áreas efetivas de carregamento	
Ensaio simples	<p>Face inferior MPSO1</p>  <p><math>A_c = 0.017m^2</math></p>	<p>Face superior MPSO1</p>  <p><math>A_c = 0.017m^2</math></p>
	$k_a = 0.61$	
Ensaio duplo	<p>Face inferior MPSO4</p>  <p><math>A_c = 0.0197m^2</math></p>	<p>Face superior MPSO4</p>  <p><math>A_c = 0.017m^2</math></p>
	$k_a = 0.655$	

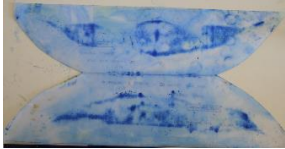
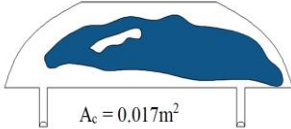
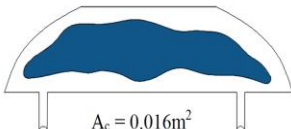
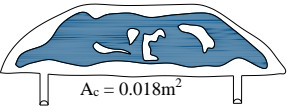
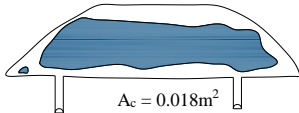
### E.3.2. Murete 1/Alçado B – Ensaio MLII

**Quadro E.8 – Áreas de contato Ensaio MLII – Murete 1/Alçado B.**

Ensaio	Áreas efetivas de carregamento	
Ensaio simples	<p>Face inferior MPSO1</p>  <p><math>A_c = 0.016m^2</math></p>	<p>Face superior MPSO1</p>  <p><math>A_c = 0.018m^2</math></p>
	$k_a = 0.61$	
Ensaio duplo	<p>Face inferior MPSO4</p>  <p><math>A_c = 0.018m^2</math></p>	<p>Face superior MPSO4</p>  <p><math>A_c = 0.018m^2</math></p>
	$k_a = 0.643$	

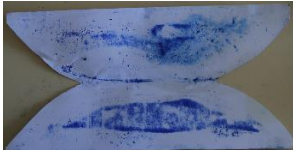
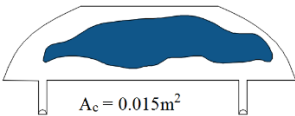
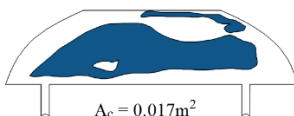
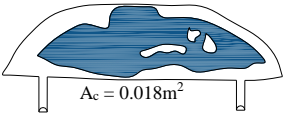
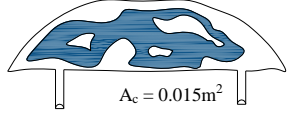
### E.3.3. Murete 2/Alçado A – Ensaio MLIII

**Quadro E.9 – Áreas de contato Ensaio MLIII – Murete 2/Alçado A.**

Ensaio	Áreas efetivas de carregamento	
<p>Ensaio simples</p> 	<p>Face inferior MPSO1</p>  <p><math>A_c = 0.017\text{m}^2</math></p>	<p>Face superior MPSO1</p>  <p><math>A_c = 0.016\text{m}^2</math></p>
<p>Ensaio duplo (papel danificado resultante do processo de remoção do macaco + papel/químico do rasgo)</p>	<p>Face inferior MPSO4</p>  <p><math>A_c = 0.018\text{m}^2</math></p>	<p>Face superior MPSO4</p>  <p><math>A_c = 0.018\text{m}^2</math></p>

### E.3.4. Murete 2/Alçado B – Ensaio MLIV

**Quadro E.10 – Áreas de contato Ensaio MLIV – Murete 2/Alçado B.**

Ensaio	Áreas efetivas de carregamento	
<p>Ensaio simples</p> 	<p>Face inferior MPSO1</p>  <p><math>A_c = 0.015\text{m}^2</math></p>	<p>Face superior MPSO1</p>  <p><math>A_c = 0.017\text{m}^2</math></p>
<p>Ensaio duplo (imagem não perceptível devido ao excesso de óleo resultante da rutura do macaco pela soldadura)</p>	<p>Face inferior MPSO4</p>  <p><math>A_c = 0.018\text{m}^2</math></p>	<p>Face superior MPSO4</p>  <p><math>A_c = 0.015\text{m}^2</math></p>

## **Anexo F. Ensaios de compressão axial – registo de eventos**

### **F.1. Registo de eventos do ensaio à compressão axial ECI**

*Quadro F.1 – Registo de eventos do ensaio à compressão axial ECI.*

Aplicação da carga	Tempo decorrido [h:m:s]	Deslocamento do atuador [mm]	Observações
Controlo de Força	0:00:00	0	Encosto do atuador à viga de carregamento
	0:00:00	0	Início do ensaio em controlo de Força / (Carregamento 100 kN)
	0:01:17	0.987	Início da 1ª Pausa
	0:02:67	1.063	Fim da 1ª Pausa / Início carregamento 200 kN
	0:03:45	2.304	Fim ciclo carga 200 kN / Início 2ª Pausa
	0:05:33	2.685	Fim 2ª Pausa / Início ciclo de carga 300 kN
	0:06:27	5.146	Fim carregamento 300 kN / Início 3ª Pausa
	0:08:17	5,659	Fim da 3ª Pausa
Controlo de deslocamento	0:08:17	5,659	Início em controlo deslocamento / Desprendimento argamassa
	0:10:30	12.06	Aparecimento das primeiras fissuras – centro do murete
	0:13:08	20.355	Aparecimento de novas fissuras – centro do murete
	0:13:47	21.549	Queda de pedra média dimensão – zona central
	0:15:22	26.773	Rutura da alvenaria
	0:24:07	53.355	Destacamento de pedras para fora do plano – canto inferior esquerdo
	0:28:47	60.836	Queda de pedras – canto inferior esquerdo
	0:29:25	63.184	Queda de pedras – canto superior esquerdo
0:33:33	75.41	Colapso total do murete / Fim do ensaio	

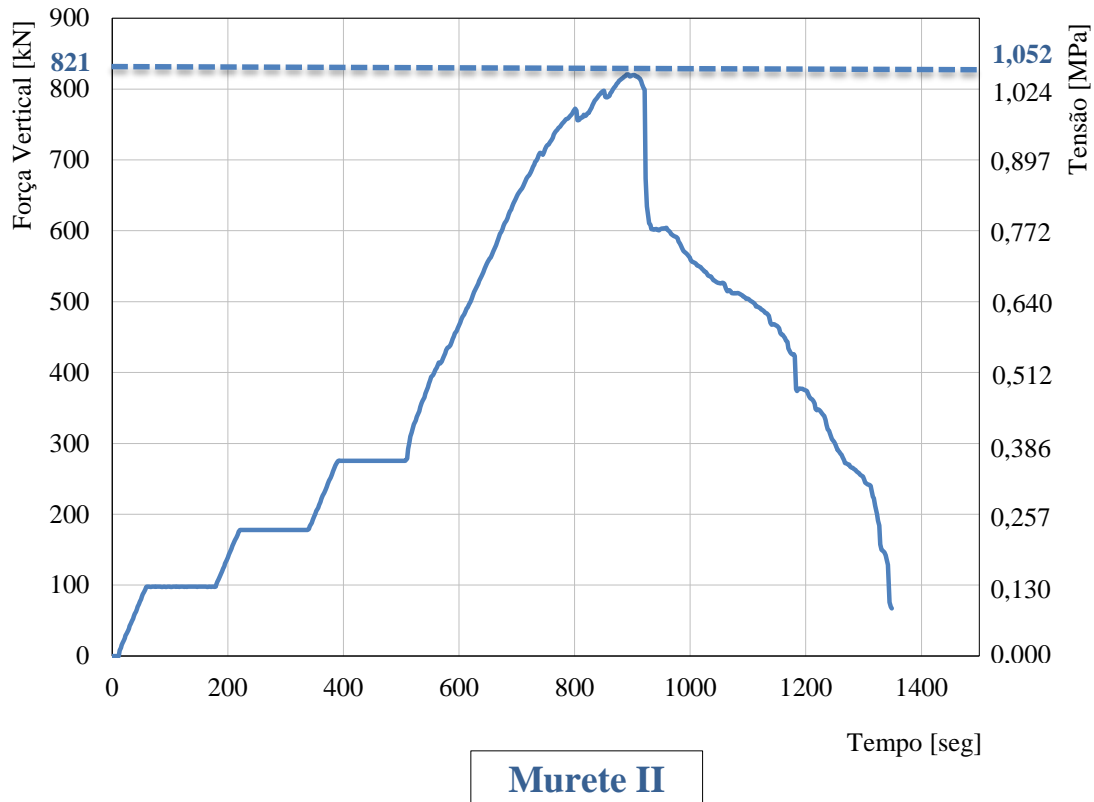
## F.2. Registo de eventos do ensaio à compressão axial EC II

*Quadro F.2 – Registo de eventos do ensaio à compressão axial ECII.*

Aplicação da carga	Tempo decorrido [h:m:s]	Deslocamento do atuador [mm]	Observações
Controlo de Força	0:00:00	0	Encosto do atuador à viga de carregamento
	0:00:00	0	Início do ensaio em controlo de Força / (Carregamento 100 kN)
	0:01:37	4.341	Início da 1ª Pausa
	0:03:00	4.365	Fim da 1ª Pausa / Início carregamento 200 kN
	0:04:07	5.370	Fim ciclo carga 200 kN / Início 2ª Pausa
	0:05:57	5.439	Fim 2ª Pausa / Início ciclo de carga 300 kN
	0:06:58	7.092	Fim carregamento 300 kN / Início 3ª Pausa
	0:08:45	7.347	Fim da 3ª Pausa
Controlo de deslocamento	0:08:45	7.347	Início controlo deslocamento / Desprendimento argamassa
	0:14:38	24.35	Aparecimento das primeiras fissuras – centro do murete
	0:15:38	27.93	Rutura da alvenaria
	0:017:47	34.209	Desenvolvimento das fissuras existentes
	0:19:47	40.218	Queda de pedras – zona superior centro
	0:25:02	43.542	Queda de pedra de média dimensão – canto superior esquerdo
	0:26:31	44.463	Nítida definição dos caminhos preferenciais de carga
	0:32:43	-	Destacamento de grande quantidade de pedra e argamassa para fora do plano – zona central
	0:32:49	-	Expulsão de grande quantidade de pedra e argamassa – zona central
0:34:24	-	Colapso total do murete / Fim do ensaio	

## F.3. Descrição do comportamento do murete 2 durante o ensaio à compressão axial ECII

O início do ensaio tal como para o ensaio de compressão efetuado sobre o murete 1, começou por cumprir-se os pressupostos impostos pela norma, nomeadamente os patamares de carga de 100 kN cada e as pausas intercalares de dois minutos entre os mesmos em controlo de força. Terminada a última pausa aos 507 segundos (8 minutos), o ensaio é retomado em controlo de deslocamento até ao colapso total do murete (Figura F.1).



**Figura F.1** – Diagrama história de carga do ensaio de compressão axial do murete 2.

Terminada a fase de ensaio em controlo de força, o ensaio foi retomado em controlo deslocamento verificando-se a formação das primeiras fissuras, no canto superior esquerdo do murete (Figura F.2b – 1067 seg.).

Com o aumento de carga as fissuras desenvolviam-se sendo perceptível pelo aumento da espessura das mesmas (Figura F.2c – 1120 seg.). A primeira desagregação de elementos do murete digna de registo deu-se aos 1502 seg. (Figura F.2d) com expulsão de pedra e argamassa no canto superior esquerdo (Alçado A).

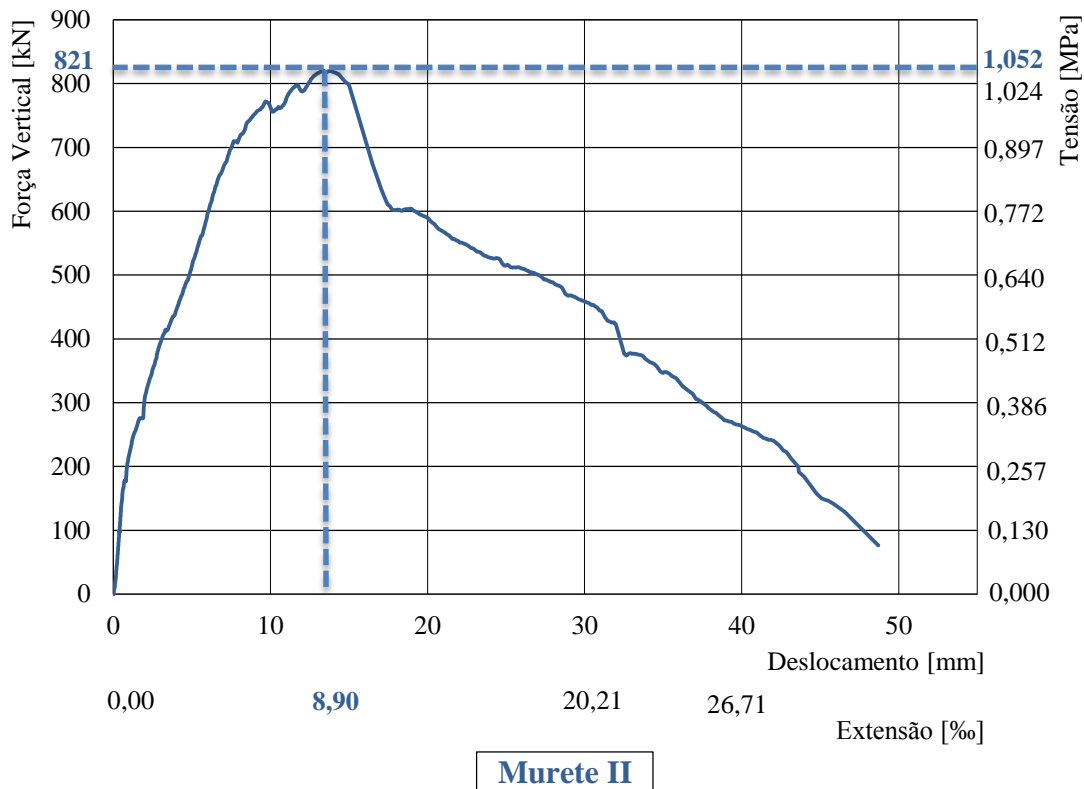
Na Figura F.2e (1591 seg.), era perceptível a definição dos caminhos de carga, lembrando um sistema de biela de compressão.

Aos 1969seg. (Figura F.2g), ocorreu o colapso parcial do murete na zona central. O ensaio terminou aos (2064 seg.) aproximadamente 34 minutos, uma vez atingido o colapso total do murete, de forma “estrondosa” acionando o sistema de segurança implementado (Figura F.2h,i).



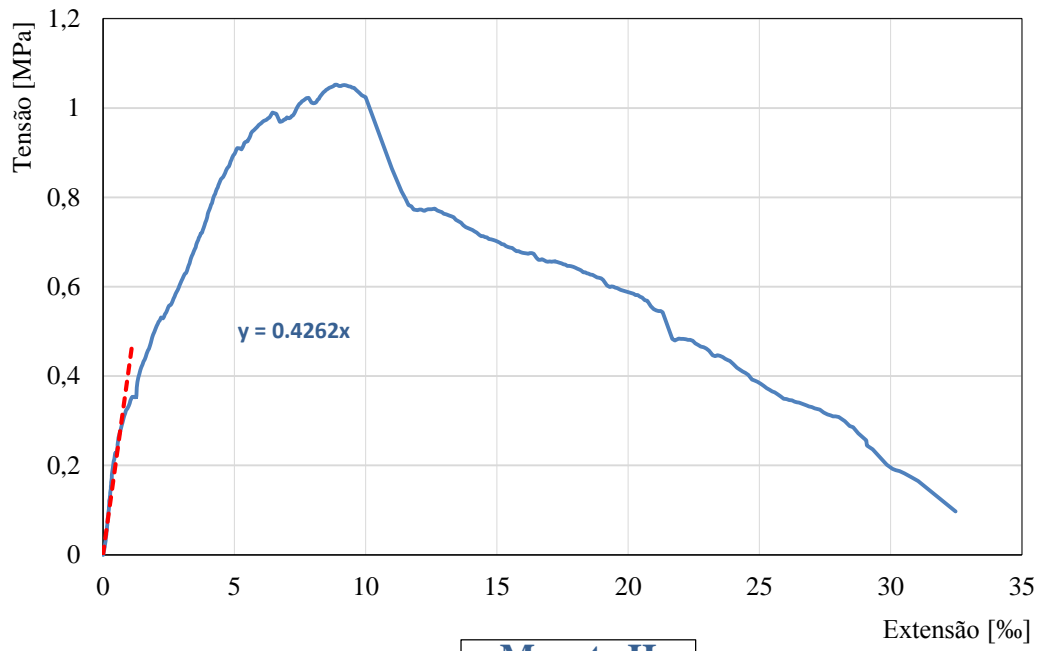
**Figura F.2** – Comportamento do murete 2 (alçado A) em vários instantes do ensaio de compressão axial II: a)  $t=60s$ ; b)  $t=1067s$ ; c)  $t=1120s$ ; d)  $t=1502s$ ; e)  $t=1591s$ ; f)  $t=1963s$ ; g)  $t=1969s$ ; h,i)  $t=2064s$ .

Registou-se para este ensaio (murete 2) uma força máxima aplicada de 820,72 kN (Figura F.3), correspondendo uma tensão de 1,05 MPa atingindo a rotura aos 893 segundos (14 minutos). A rotura ocorrida foi do tipo frágil, irreversível assinalada a partir do momento de ocorrência da desagregação do interior do murete.



**Figura F.3** – Diagrama força-deslocamento ensaio compressão axial.

Segundo a análise do diagrama da história de carga (Figura F.3), percebe-se as diferentes fases do ensaio. Uma vez realizado o ensaio à compressão axial, o comportamento mecânico do murete durante o ensaio, é dado por um diagrama de história de carga, sendo este caracterizado pela força vertical [kN], tempo [Seg.] e tensão [MPa]. A Figura F.4 mostra a determinação do módulo de elasticidade resultante dos parâmetros anteriormente analisados, obtendo-se para o murete 2 um módulo de elasticidade de 0,43 GPa.



**Murete II**

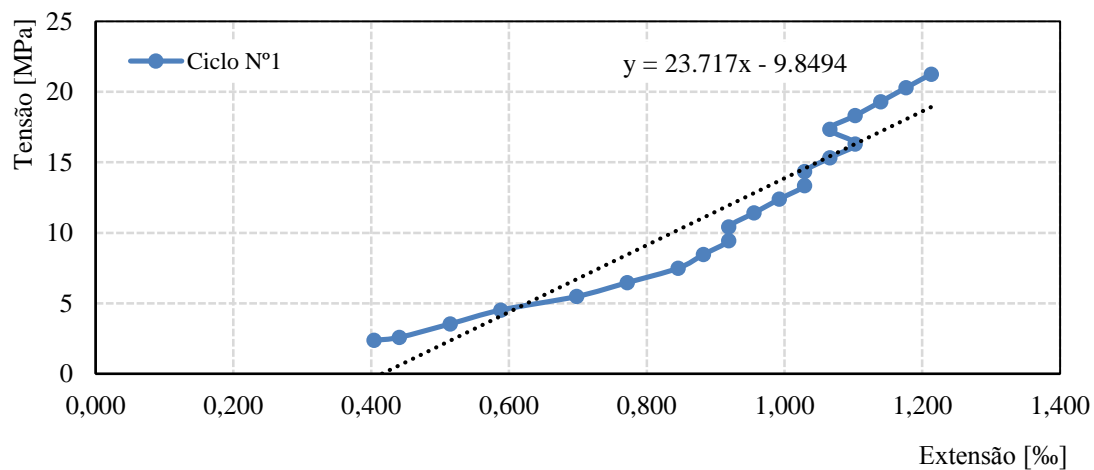
---

**Figura F.4** – Diagrama tensão/extensão para determinação do módulo de elasticidade.

## Anexo G. Ensaio de determinação do módulo de elasticidade em provetes de pedra

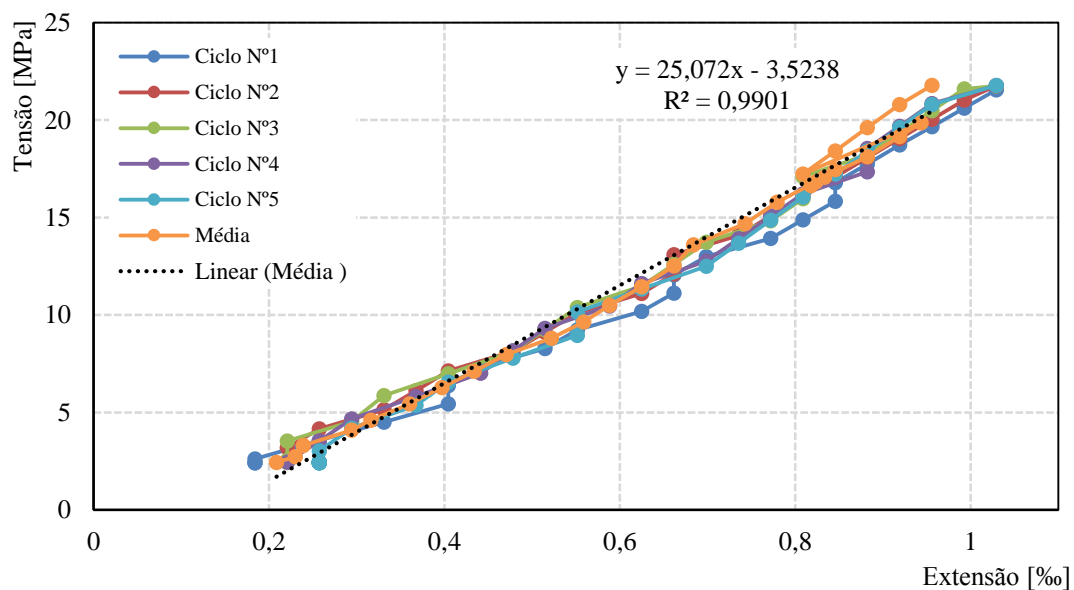
### G.1. Resultados dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade

Carote N°2\*

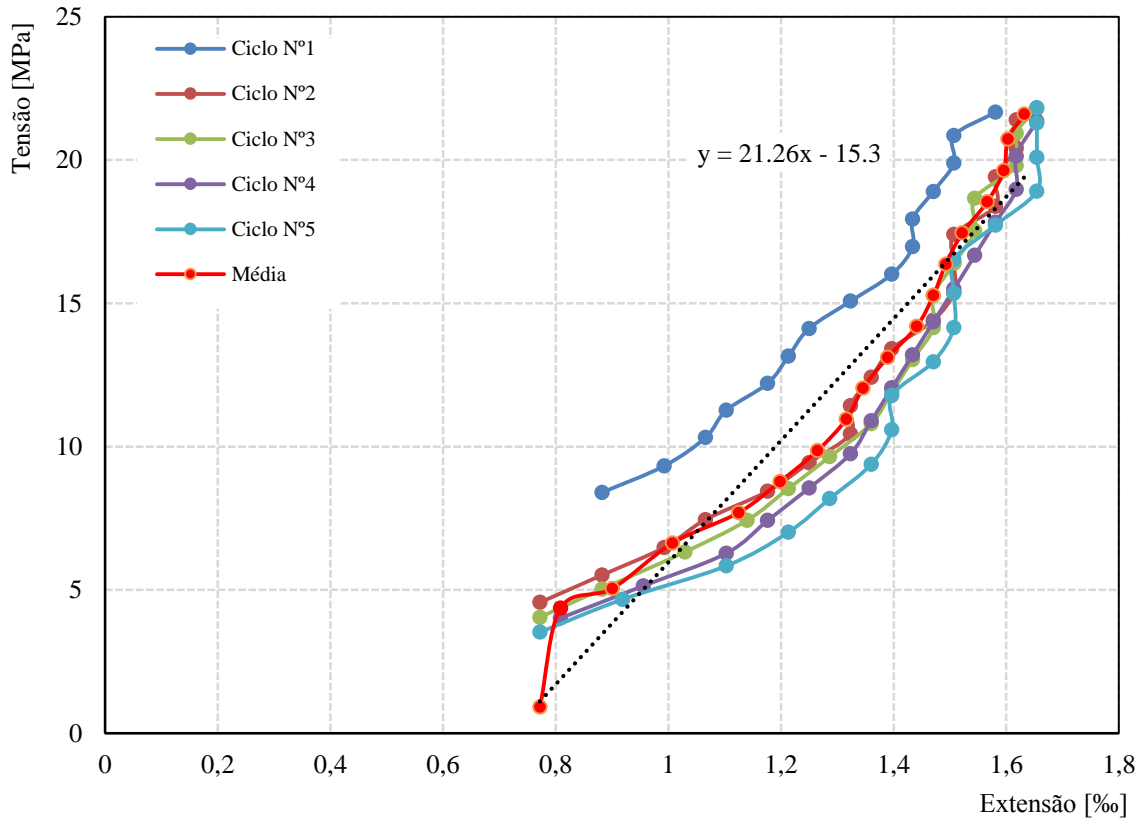


Nota\* Só se considerou o ciclo N°1 devido à não coerência de valores para os restantes ciclos.

Carote N°3



Carote Nº4



Carote Nº5

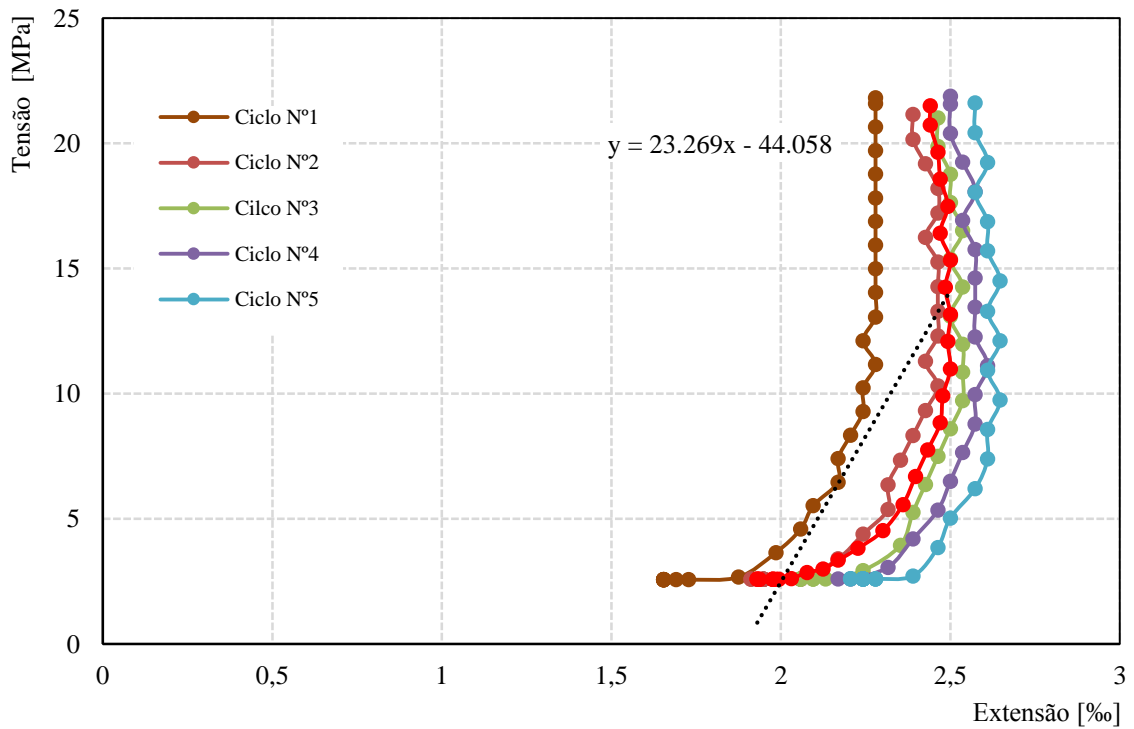


Figura G.1 – Análise e resultados da determinação do módulo de elasticidade da pedra para os carotes nº 2,3,4,5.

## **Anexo H. Ensaios complementares sobre a argamassa de assentamento**

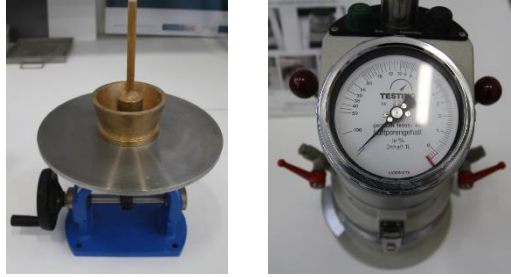
### **H.1. Avaliação da consistência por espalhamento e determinação do teor em ar**

A caracterização da consistência das argamassas foi avaliada através do ensaio de espalhamento. Este ensaio foi realizado na mesa de espalhamento e foi baseado nas recomendações técnicas dadas pela EN 1015-3:1999 [43].

O procedimento passa por encher um molde tronco-cónico com a argamassa fresca até cerca de metade da sua capacidade e, utilizando um varão de compactação com 15 mm de diâmetro, procedeu-se à compactação da mesma por 25 vezes. Em seguida, procedeu-se ao preenchimento do molde e a sua compactação novamente com 25 pancadas. O material é então rasado pelo nível do molde, retirando o excesso que eventualmente se encontre no prato onde está posicionado. Retira-se o molde com cuidado, e submete-se a amostra à acção de 25 pancadas que devem ser aplicadas em 15 segundos.

**Quadro H.1** – Valores obtidos nos ensaios realizados sobre as amassaduras.

	Amostra	Espalhamento (cm)		Peso Volúmico (Kg/dm <sup>3</sup> )	Teor em ar (%)
		x	y		
Amassadura 1	1	17	17	2	2,65
	2	17,8	18,2	2	2,5
	3	18,2	18,1	2	2,45
	<i>Média</i>	<i>17,7</i>	<i>17,8</i>	<i>2,0</i>	<i>2,5</i>
Amassadura 2	1	17	17	2	2,65
	2	17,8	18,2	2	2,5
	3	18,2	18,1	2	2,45
	<i>Média</i>	<i>17,2</i>	<i>17,8</i>	<i>2,0</i>	<i>2,5</i>



---

**Figura H.1-** Equipamento utilizado para os ensaios de caracterização da argamassa de assentamento: a) espalhamento; b) teor em ar.