



**PEDRO GABRIEL DE
ALMEIDA SARRICO**

**Caracterização mecânica de paredes e construções
de alvenaria de adobe**



**Pedro Gabriel de
Almeida Sarrico**

**Caracterização mecânica de paredes e construções
de alvenaria de adobe**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Dr. Aníbal Guimarães da Costa, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e do Professor Humberto Varum, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Dedico este trabalho aos meus pais, aos meus avós, à minha namorada e a todas as pessoas que me apoiaram em todos os aspetos na realização da dissertação.

o júri

presidente

Prof. Doutor Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Hugo Filipe Pinheiro Rodrigues
Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Leiria

Prof. Doutor Aníbal Guimarães da Costa
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Um agradecimento especial ao Professor Humberto Varum por toda a disponibilidade e disposição, ao Professor Aníbal Costa pelos conselhos dados, ao Engenheiro Jorge Fonseca pela ajuda proporcionada em toda a jornada da realização desta dissertação, ao José Carlos Silva e ao Matthias Bernardo pelo tempo que puderam disponibilizar para me ajudarem e à Engenheira Maria Carlos e ao Vítor pelo apoio na realização dos ensaios laboratoriais.

O trabalho apresentado teve o apoio do projeto Be+Earth, com a referência PTDC/ECM-EST/2396/2012, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT).

palavras-chave

Adobe, cal, alvenaria, caracterização mecânica, resistência ao corte, ensaio de arrancamento, pundit, granulometria.

resumo

A região de Aveiro, bem como outras regiões da zona costeira do centro de Portugal, é rica em construção em alvenaria de adobe, sendo esta uma das soluções mais utilizadas até ao final da primeira metade do século XX. Grande parte dessas construções manifesta um avançado estado de degradação, sendo necessária uma intervenção generalizada de forma a se poder recuperar esse legado arquitetónico. De forma a se entender melhor o comportamento da alvenaria de adobe, este trabalho pretende contribuir para a compreensão das características mecânicas deste tipo de alvenaria, a partir do desenvolvimento de ensaios laboratoriais que permitam obter dados relativos à calibração de modelos de comportamento mecânico da alvenaria de adobe.

keywords

Adobe, lime, masonry, mechanical characterization, shear strength, bond strength, pundit, granulometry.

abstract

The region of Aveiro, as other regions of the coastal area of central Portugal, is rich in constructions made of adobe masonry, being the most common technique until the end of the first half of the 20th century. Most of those buildings suffer from an advanced state of deterioration, requiring an integrated intervention, so that this architectonic legacy can be maintained. In order to better understand the behaviour of adobe masonry, the present study aims to contribute to the understanding of the mechanical characteristics of this type of masonry, by developing laboratorial tests which allow to obtain data for the calibraton of mechanical behaviour models for adobe masonry.

ÍNDICE

Índice	xiii
Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas	xvii
1. Introdução	1
1.1. Motivação e enquadramento	1
1.2. Objetivos	2
2. Estado de Arte	4
2.1. Técnicas de construção em alvenaria de terra	4
2.2. O adobe em Aveiro	8
2.3. Exposição de alguns estudos técnicos já realizados	11
3. Recolha de amostras, preparação dos provetes e descrição dos ensaios	23
3.1. Objetivos do estudo	23
3.2. Recolha dos adobes	23
3.3. Ensaio de corte da interface entre o adobe e a junta de argamassa segundo a norma <i>EN 1052-3</i>	25
3.4. Ensaio de corte da interface entre o adobe e a junta de argamassa segundo a norma <i>LUMB5</i>	27
3.5. Ensaio de resistência da ligação entre as unidades de alvenaria e a argamassa das juntas pelo método do arrancamento	29
4. Apresentação e discussão dos resultados dos ensaios	31
4.1. Nomenclatura dos provetes	31
4.2. Análise dos Materiais	32
4.2.1. Análise granulométrica	32
4.2.2. Ensaio de flexão e compressão em provetes de argamassa, indicador de fenolftaleína e Pundit	34
4.2.3. Ensaio de flexão em unidades de adobe	45
4.2.4. Ensaio de compressão em provetes de adobe	48
4.3. Análise mecânica	50
4.3.1. Ensaio de corte da norma <i>EN 1052-3</i>	51
4.3.2. Ensaio de corte da norma <i>RILEM LUMB5</i>	56
4.3.3. Ensaio de arrancamento de adobes segundo a norma <i>RILEM LUMB3</i>	61
5. Conclusões	66
6. Desenvolvimentos futuros	68
Referências Bibliográficas	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de construções de alvenaria em adobe (Google Maps)	1
Figura 2 - Compressão simples e ensaio de flexão de um bloco individual de adobe [2]	3
Figura 3 – a) e b) Ensaio ao corte paralelo à argamassa de assentamento, c) Ensaio de arrancamento em muretes de adobe [2]	3
Figura 4 - Distribuição das construções de terra no mundo [21].....	4
Figura 5 - Molde em madeira, ou adobeira, para fabrico dos blocos de adobe [12].....	5
Figura 6 - Procedimento da mistura da terra com cal, água e palha para fabrico dos blocos de adobe	5
Figura 7 - Blocos de terra comprimida, BTC [22].....	6
Figura 8 - Parede em tabique [23]	7
Figura 9 - Parede em taipa em processo de construção [24].....	8
Figura 10 - Exemplos de habitações construídas em adobe nos arredores da cidade de Aveiro: a) escola primária de Verdemilho, b) moradia unifamiliar em Oliveirinha (Google Maps).....	9
Figura 11 – Dois edifícios de alvenaria em adobe no centro da cidade de Aveiro: a) Casa do Major Pessoa e b) Residência do Arquiteto Francisco Augusto Silva Rocha [25, 26].....	9
Figura 12 – Sequência cronológica das técnicas utilizadas no reforço em betão armado de construções em adobe [9].....	10
Figura 13 – Gráficos da correlação entre o módulo de elasticidade e de resistência: a) à compressão simples e b) à tração [8]	22
Figura 14 – Fotografia dos adobes recolhidos durante o desmonte do muro.....	24
Figura 15 – Esquema do ensaio de corte EN 1052-3 [32]	25
Figura 16 – Gráfico tensão axial vs. tensão de corte [32].....	26
Figura 17 – Esquema da configuração do ensaio de corte <i>LUMB5</i> [33]	28
Figura 18 – Esquema da configuração do ensaio de arrancamento [34]	29
Figura 19 – Procedimento para a caracterização da granulometria: a) determinação da areia, b) peneiração	33
Figura 20 – Gráfico representativo das granulometrias da areia e da terra.....	34
Figura 21 – Ensaio de flexão do provete C7.....	35
Figura 22 – Ensaio de compressão de um dos provetes de argamassa	37
Figura 23 – Ensaio de indicador de fenolftaleína para determinar a carbonatação dos provetes.....	40
Figura 24 – Procedimentos para a realização do ensaio de Pundit: a) determinação da massa dos provetes, b) utilização do aparelho de Pundit	42
Figura 25 – Procedimento do ensaio: a) e b) Configuração do ensaio de flexão, c) Pormenor da rotura por flexão, d) Aspeto geral da rotura.....	46
Figura 26 – Setup do ensaio de compressão	48
Figura 27 – Rotura no ensaio de compressão: a) no provete 11E; b) no provete 10I	49
Figura 28 – Configuração do pórtico e dos servo-atuadores para o ensaio	51

Figura 29 – Realização do ensaio com diferentes materiais na aplicação das cargas axial e de corte: a) carga axial com camada de areia molhada e carga de corte com uma tábua de madeira, b) cargas axial e de corte aplicadas com recurso a poliestireno extrudido	52
Figura 30 – Exemplo da disposição dos transdutores	53
Figura 31 – Rotura das juntas de assentamento	53
Figura 32 – Gráfico do ensaio do murete 29 da série de tensão normal de 0,2 MPa	54
Figura 33 – Gráfico Tensão tangencial Vs. Tensão normal com correspondente regressão linear	56
Figura 34 – Exemplar de murete utilizado no ensaio de corte RILEM LUMB5	57
Figura 35 – Setup do ensaio	58
Figura 36 – Rotura do murete 16, da série 0,15 MPa: a) aspeto geral, b) pormenor da zona dos apoios laterais..	58
Figura 37 – Gráfico do ensaio do murete 4, da série de tensão normal de 0,1 MPa	59
Figura 38 – Sistema de alavanca de arrancamento: a) Pormenor do sistema, b) Vista geral	61
Figura 39 – Procedimento do ensaio: a) Adobe arrancado, b) Determinação da massa do adobe, c) Medição da superfície de rotura	62
Figura 40 – Arrancamento dos adobes 8 e 9 na parede 1	64

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados dos ensaios realizados sobre os carotes de adobe [5]	11
Tabela 2 - Resultados dos ensaios realizados sobre os muretes de adobe [5].....	12
Tabela 3 – Distribuição granulométrica obtida após peneiração dos agregados do muro M_01 [15]	14
Tabela 4 – Distribuição granulométrica obtida após peneiração dos agregados do muro M_02 [15]	14
Tabela 5 – Distribuição granulométrica obtida após peneiração dos agregados do muro M_03 [15]	15
Tabela 6 – Distribuição granulométrica obtida após a peneiração dos agregados da casa C_01 [15]	16
Tabela 7 - Resultados dos ensaios de compressão simples sobre os provetes de adobe das casas 1, 2 e 3 [15]	17
Tabela 8 – Resultados dos ensaios de compressão simples sobre os provetes dos muros 1, 2, 3, 4, 5 e 6 [15]	18
Tabela 9 – Resultados dos ensaios de tração dos provetes das casas 1, 2, 3 e dos muros 2, 4 e 5 [15]	19
Tabela 10 – Resultados dos ensaios de absorção e de penetração capilar [15].....	20
Tabela 11 – Resultados dos ensaios de compressão simples e de compressão diametral dos provetes de adobe [8]	21
Tabela 12 – Valores médios da resistência à compressão simples, do módulo de elasticidade, da extensão média no pico de tensão e da resistência à tração [8]	22
Tabela 13 – Síntese dos provetes preparados de argamassa e alvenaria (muretes) para cada ensaio	32
Tabela 14 – Massas obtidas antes e após a lavagem no peneiro 0,063 mm.....	33
Tabela 15 – Tensão de flexão dos provetes de argamassa.....	37
Tabela 16 – Tensão de compressão dos provetes de argamassa	39
Tabela 17 – Nível de carbonatação dos provetes de argamassa.	41
Tabela 18 – Valores da densidade, velocidade de propagação do som e do módulo de elasticidade dos provetes de argamassa	44
Tabela 19 – Distância entre os apoios inferiores e os valores das tensões de flexão	47
Tabela 20 – Valores da tensão de compressão nos provetes cúbicos de adobe	50
Tabela 21 – Valores da tensão média e da deformação média para a tensão de pico no ensaio de corte EN 1052-3	55
Tabela 22 – Valores calculados a partir da equação da regressão linear	56
Tabela 23 - Valores da tensão média e da deformação média no ensaio de corte EN 1052-3.....	60
Tabela 24 – Valores das massas do balde e dos adobes, das medidas da superfície de rotura e da tensão de arrancamento.....	63

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação e enquadramento

A falta de informação técnica sobre as características das construções em adobe exige que se realizem estudos aprofundados relativamente às suas várias propriedades, incluindo as propriedades mecânicas. O estudo de paredes resistentes de alvenaria em adobe, principalmente na vertente do comportamento estrutural e mecânico, tem uma extrema importância para a avaliação da segurança deste tipo de construção, e permite um apoio abrangente aos projetos de reabilitação e construção de novas edificações que recorram a este material e técnica construtiva.

A terra tem sido usada como material de construção desde os primórdios da existência do homem moderno. O facto de ser uma matéria-prima quase inesgotável, barata, reciclável e de ter boas características térmicas e acústicas, ressalva a importância do seu uso como material de construção a vários níveis, tais como o social, económico, arquitetónico, patrimonial, etc. [1], o que permite a existência de uma grande variedade de património edificado com esta técnica construtiva.



Figura 1 - Exemplos de construções de alvenaria em adobe (Google Maps)

O facto de cerca de 30% de toda a população mundial habitar em construções de terra nos dias de hoje, permite constatar que estas têm uma grande importância não só patrimonial, mas também arquitetónica, social e económica. A quantidade e a importância das construções em adobe, tanto na região de Aveiro como nas restantes regiões em Portugal onde este tipo de construção existe em grande quantidade, requer a necessidade do estudo das características mecânicas deste material, de modo a que estes mesmos estudos permitam apoiar os

projetistas, promotores imobiliários, proprietários, decisores políticos, bem como todos os outros agentes envolvidos direta e indiretamente no processo de reabilitação urbana [2].

O estado de abandono e degradação do património imóvel construído em adobe na região de Aveiro trona-se mais evidente de ano para ano, embora existam várias situações em que algumas construções são perfeitamente capazes de cumprir as funções requeridas, sendo que só serão necessárias pequenas intervenções periódicas de conservação [3].

Na região de Aveiro, um considerável número de habitações são construídas em adobe, a sua maioria edificada até meados do século XX. Após esse período, parte dessas edificações iniciaram um processo de abandono e de ruína, muito devido ao facto de haver uma escassez de medidas de reabilitação, e de se associar a habitação em terra a um sinal de pobreza.

Atualmente o elevado valor arquitetónico e patrimonial deste tipo de construção está a provocar uma inversão da tendência de abandono deste tipo de construção e a despertar as consciências para excelentes propriedades térmicas e acústicas da construção em adobe [3,4].

1.2. Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo central, a realização de um estudo aprofundado do comportamento dos elementos estruturais das habitações em adobe, e juntamente com a restante documentação já existente, preencher as lacunas relativamente à falta de documentação técnica, e adicionar informação que poderá auxiliar a análise das patologias e o aperfeiçoamento de várias soluções de reforço apropriadas aos trabalhos de reabilitação e de colmatação de anomalias estruturais de construções de alvenaria resistente em adobe. A fim de se atingir este objetivo, foi necessário realizar uma investigação em que se procedeu à consulta de uma base de dados documental relativa a este tema, composta por documentos técnicos e por trabalhos de investigação realizados anteriormente, sendo que este estudo foi complementado com um conjunto de ensaios realizados em laboratório. Estes ensaios destinaram-se ao estudo da caracterização granulométrica de areia e terra constituintes de argamassa de assentamento, do seu módulo de elasticidade e da sua tensão de compressão e flexão, da resistência à flexão de blocos individuais de adobe e compressão de provetes de adobe, da resistência ao corte da interface entre a argamassa de assentamento e os blocos de adobe em muretes construídos em laboratório e também ensaios de arrancamento de blocos de adobe.



Figura 2 - Compressão simples e ensaio de flexão de um bloco individual de adobe [5]

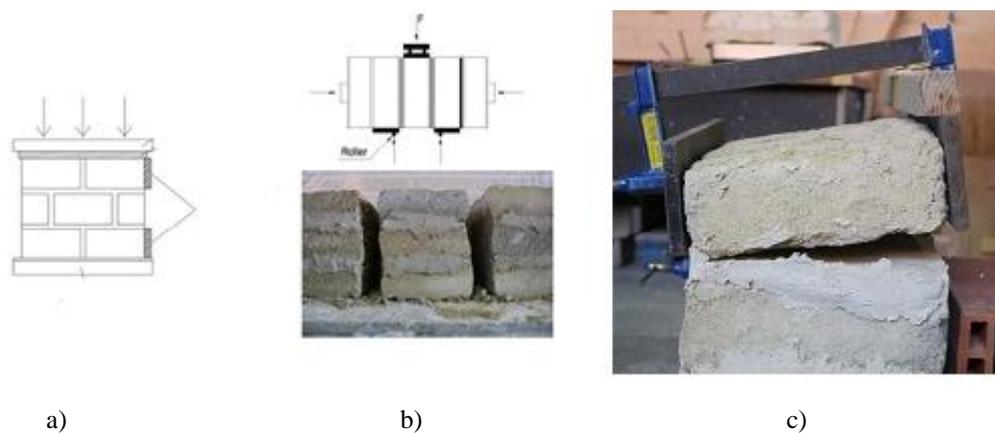


Figura 3 – a) e b) Ensaios ao corte paralelo à argamassa de assentamento, c) Ensaio de arrancamento em muretes de adobe [5]

2. ESTADO DE ARTE

Neste capítulo será realizado um breve estudo teórico que permitirá uma melhor compreensão relativamente às técnicas de construção de alvenaria em terra, a utilização do adobe na região de Aveiro e por final, uma exposição dos estudos técnicos realizados até à atualidade sobre este tema.

2.1. Técnicas de construção em alvenaria de terra

Dentro do contexto mundial atual, a importância da utilização da terra como material de construção demonstra uma importante relevância dentro dos contextos social, patrimonial e arquitetónico. O facto de uma grande fatia da população mundial viver em casas de terra é, por si, uma evidência da importância deste tipo de construção no mundo [1].

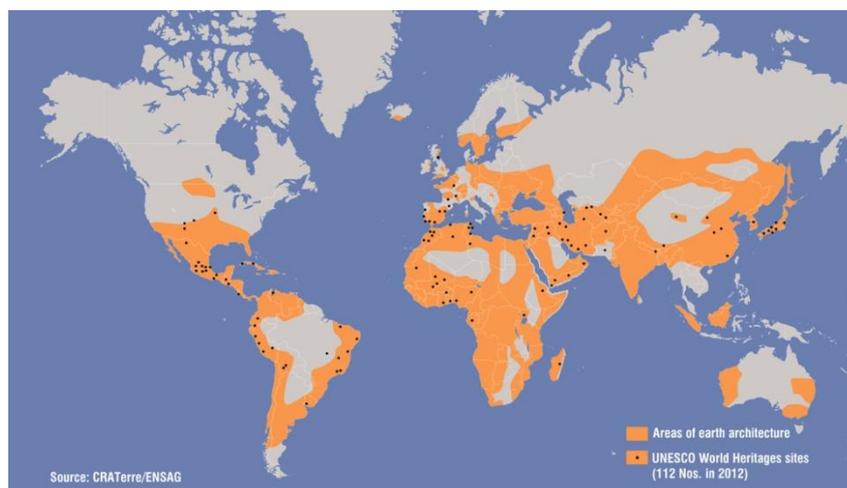


Figura 4 - Distribuição das construções de terra no mundo [6]

Dentro das várias soluções de alvenarias de terra, encontram-se as seguintes tipologias:

Blocos cortados – São cortados em zonas de terra vegetal coesa. Podem também ser obtidos a partir de um solo alterado, humidificado e com boa coesão designado como Laterite. “A arquitetura construída com este material situa-se sobretudo nas regiões tropicais e subtropicais húmidas, na Índia e em África” [7].

Adobes – São blocos de terra argilosa “misturada com água e por vezes com fibras [8]” moldados tanto à mão como em moldes de madeira, sendo este último, o processo mais frequente.



Figura 5 - Molde em madeira, ou adobeira, para fabrico dos blocos de adobe [2]

O processo de fabrico do adobe tem sofrido poucas alterações ao longo do tempo, sendo que atualmente é auxiliado por meios mecanizados. A sua produção é normalmente realizada no local mais próximo da obra onde a terra tem as características adequadas. A terra é misturada com a água e é amassada até se obter uma boa ligação. Após estes processos, os moldes de madeira, chamados de adobeiras, são molhados, o que permite uma maior facilidade no processo de desmoldagem. Seguidamente é colocada a mistura dentro dos moldes e inicia-se o processo de secagem, que dura entre quinze a vinte dias. Durante esta fase, os blocos devem ser virados de dois em dois dias e devem estar abrigados [2, 9, 11].



Figura 6 - Procedimento da mistura da terra com cal, água e palha para fabrico dos blocos de adobe

Blocos de terra comprimida - Os blocos de terra comprimida, ou BTC, como apresentado na figura 7, são blocos de terra crua prensada dentro de moldes, sendo que deste modo, existe uma diminuição da porosidade e um maior contacto entre partículas. Estes blocos podem tanto ser usados como material estrutural ou como material de enchimento. O seu fabrico tem grande visibilidade em países com a Alemanha e como a Dinamarca, sendo utilizados como material de construção corrente [12].

A utilização destes blocos permite que o custo de construção seja relativamente baixo e também encoraja o aparecimento de fabricantes deste material e de aplicadores especializados. O BTC, devido às suas proporções regulares, é o mais apropriado para a utilização na construção [12].

Segundo Moreira [8], a terra que é colocada no molde deve ter uma massa volúmica entre 1000 e 1400 kg/m³, sendo que após a prensagem deve subir para os 1700 kg/m³ e os blocos devem ter 10 cm de altura no máximo. A sua resistência máxima é somente atingida após o tempo de cura, num ambiente húmido e quente.

No que toca aos custos de produção em termos energéticos, existe uma poupança de 40 a 65% comparativamente com a produção de igual quantidade de tijolos cerâmicos.



Figura 7 - Blocos de terra comprimida, BTC [13]

Blocos de terra extrudida – O modo de produção destes blocos surge do fabrico dos tijolos cerâmicos, com a diferença de não existir cozedura, pois são somente secos, e com a possível adição de cimento ou cal à argila. Segundo Fernando [7], os blocos de terra extrudida contém um alto teor de finos e requerem sistemas de produção complexos e mecanizados para a sua produção.

Adobe mecânico – Este sistema é muito semelhante ao anterior, sendo que as diferenças se encontram no modo de secagem dos blocos. Estes são secos ao ar livre, havendo a necessidade da produção destes ser realizada numa maior área devido à maior lentidão da sua secagem. Têm uma grande utilização na construção de habitações na Califórnia, Texas e no Novo México, sendo que a sua produção é realizada por máquinas agrícolas adaptadas [7].

Adobe manual – Técnica em que o adobe é moldado com as mãos em várias formas e que depois de seco é utilizado para a construção de paredes. Esta técnica apesar de ser primitiva, é ainda bastante utilizada em África e é considerada como a forma primitiva dos atuais adobes quadrados e paralelepípedicos. São encontrados em diversos sítios arqueológicos na Palestina e no Paquistão e é possível observar a partir destes, a evolução desta técnica ao longo dos tempos [7].

Existem ainda outras soluções de paredes estruturais em terra, que apesar de não se inserirem dentro do grupo das alvenarias, surgem com importante relevância dentro das construções históricas em Portugal. Duas dessas técnicas construtivas são:

Tabique - O tabique consiste na aplicação da terra sobre uma estrutura pré-concebida de madeira ou de cana, sendo que deste modo é formada uma estrutura mista em que a capacidade estrutural largamente dependente da estrutura de madeira e a terra serve ainda como material de revestimento e enchimento [14].



Figura 8 - Parede em tabique [15]

Taipa - A taipa é uma técnica que consiste em compactar finas camadas de terra sucessivamente dentro de uma cofragem, denominada de taipal. A terra usada na sua construção é geralmente arenosa e com baixo teor em água, contendo agregados mais ou menos grosseiros. A compactação da terra pode ser realizada com um tradicional pilão de madeira ou mais recentemente com equipamentos pneumáticos. Conforme as camadas de terra vão sendo compactadas, os taipais vão sendo fixados à camada anterior através de "agulhas" [7, 4, 16].



Figura 9 - Parede em taipa em processo de construção [17]

2.2. O adobe em Aveiro

Em Portugal, a construção em adobe está representada na sua grande maioria na região centro litoral, principalmente na região de Aveiro devido à abundância de água, que é um elemento fundamental na produção do adobe [2].

Segundo dados fornecidos pela Câmara Municipal de Aveiro, cerca de um quarto das construções existentes na cidade de Aveiro são em adobe, sendo que esse número aumenta para 40% se nos referirmos a todo o distrito [18, 11]. O fabrico de adobe atingiu tal expressão, que este envolveu a participação de fornecedores de terra e de cal, produtores de adobe e construtores, sendo que o sucesso deste material se deveu principalmente às características das matérias-primas, sendo que os blocos eram fabricados com areia grosseira misturada com cal [19].

Nos dias de hoje, o adobe pode ser encontrado num variado leque de construções tais como edifícios de pequenas e grandes dimensões, muros, poços de água, armazéns e igrejas [18, 9], como se pode observar nas figuras 10 e 11.



Figura 10 - Exemplos de habitações construídas em adobe nos arredores da cidade de Aveiro: a) escola primária de Verdemilho, b) moradia unifamiliar em Oliveirinha (Google Maps)

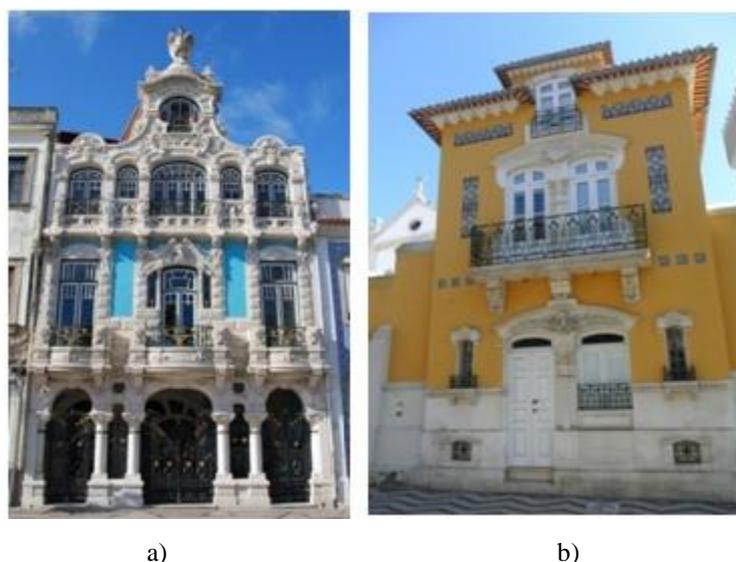


Figura 11 – Dois edifícios de alvenaria em adobe no centro da cidade de Aveiro: a) Casa do Major Pessoa e b) Residência do Arquiteto Francisco Augusto Silva Rocha [20, 21]

Era habitual a adição de cal ou palha com o intuito de melhorar a performance mecânica que era pretendida para os blocos de adobe. As dimensões correntes dos blocos eram de $0,45 \times 0,3 \times 0,11\text{m}$ e de $0,45 \times 0,2 \times 0,11\text{m}$, sendo que na primeira situação os blocos eram utilizados em habitações e na segunda situação os blocos eram utilizados em muros [22,9].

Excepcionalmente eram construídas fundações em pedra onde as paredes assentavam, devido à grande capacidade do adobe em absorver água. Nas situações em que as paredes assentavam diretamente no solo, foram detetados problemas graves de humidade ascensional [4].

Devido à resistência limitada do adobe, foram utilizadas soluções que apesar de serem simples, incrementavam estabilidade estrutural às construções. Exemplo disso era a utilização de barrotes de madeira ou então de arcos realizados com madeira, pedra, tijolo e também em adobe. Estas soluções visavam uma melhoria da resistência através de uma melhor distribuição das cargas nos vãos das aberturas [22].

Também se tornou habitual a adição de elementos em betão armado a partir do início do século XX, que era usado para reforço em trabalhos de reabilitação como na construção de novas casas em adobe. Numa primeira fase eram utilizados só vigas de betão armado, enquanto que numa segunda fase já eram utilizados pilares, vigas e lajes em betão armado. Depois de 1950 até 1960, era habitual a solução de construções híbridas de adobe e betão, em que o rés-do-chão era construído maioritariamente em adobe e os restantes andares eram construídos em betão armado e paredes de tijolo.

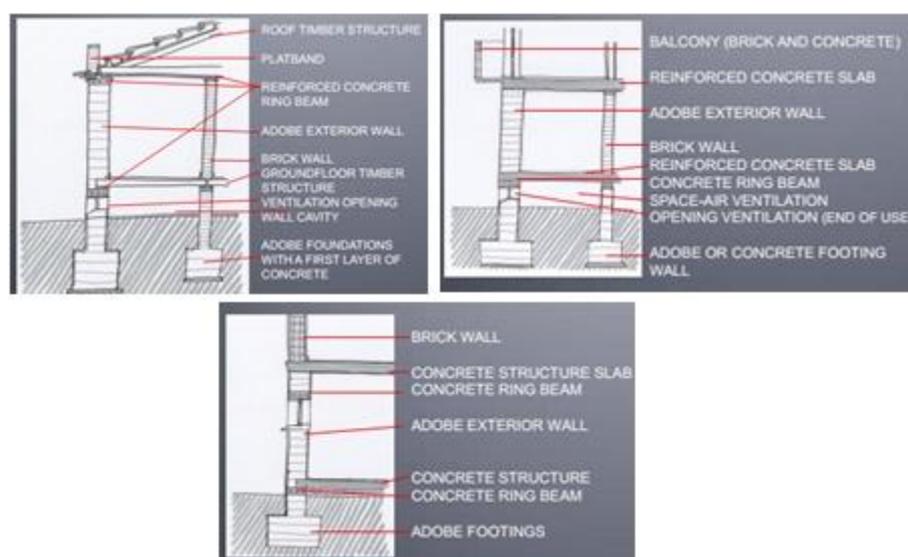


Figura 12 – Sequência cronológica das técnicas utilizadas no reforço em betão armado de construções em adobe [23]

2.3. Exposição de alguns estudos técnicos já realizados

Ao longo destes últimos anos, têm-se vindo a desenvolver vários estudos relativamente ao adobe e à sua função estrutural na construção, sendo que parte desses estudos se apresentam na forma de dissertações de mestrado. A grande maioria desses estudos são realizados por docentes e alunos da Universidade de Aveiro, que pelo facto de se encontrar na região onde mais predomina a construção em adobe, foca grande parte dos seus estudos nesta técnica de construção de alvenarias.

No ano de 2006, foi publicado o artigo *Comportamento Estrutural de Elementos Resistentes em Alvenaria de Adobe* [18], desenvolvido pelos Professores Humberto Varum, Aníbal Costa e pelos Engenheiros Henrique Pereira e João Almeida. Este artigo desenvolve um estudo sobre algumas características do adobe obtidas a partir de ensaios sobre amostras de blocos de adobe, ensaios sobre argamassas de junta e reboco e sobre muretes. Estas amostras foram retiradas de várias casas e muros de modo a que os valores obtidos fossem o mais representativos possível das construções existentes.

Relativamente ao adobe, foram recolhidos carotes cilíndricos com um diâmetro entre 70 a 90 milímetros e com uma altura igual ao dobro do diâmetro. Foram realizados ensaios de compressão simples com o fim de determinar a resistência mecânica do adobe, resultados esses revelados na tabela 1.

Amostra	Módulo de Elasticidade (MPa)	Resistência à Compressão (MPa)	Deformação para a Resistência Máxima (mm/mm)
Casa 5	448	2,15	0,015
Casa 10	336	1,99	0,009

Tabela 1 - Resultados dos ensaios realizados sobre os carotes de adobe [18]

As argamassas de assentamento foram obtidas sob a forma de provetes com uma dimensão de 4x4 cm e com uma espessura semelhante à da junta de assentamento. Na construção dos muretes foi formulada uma argamassa em laboratório em que a cal foi usada como ligante, para que a argamassa fosse o mais semelhante possível às argamassas utilizadas nas construções. Esta argamassa foi realizada sob a forma de prismas com dimensões de 4x4x16 cm que foram ensaiados à flexão e à compressão simples. O valor médio da resistência à compressão das argamassas formuladas foi de 1,42 MPa, sendo que os valores médios das argamassas recolhidas foram semelhantes, com a diferença de terem uma maior variabilidade no caso das argamassas recolhidas.

Relativamente aos muretes, foram realizados ensaios de compressão perpendicular às juntas de assentamento e ensaios de compressão diagonal, de forma a se obter a resistência ao corte e compressão de paredes de alvenaria em adobe. Os 13 muretes construídos tinham de dimensão 17x17x10 cm construídos a partir de blocos retangulares retirados de construções existentes com dimensão de 17x10x5cm. Estes blocos foram retirados de duas casas e de um muro. Recorrendo ao *RILEM* [24] para o cálculo da tensão de rotura, obtiveram-se os resultados presentes na tabela 2.

Amostra				Módulo de Elasticidade (MPa)	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade Transversal (MP)	Resistência ao Corte (MPa)	Deformação para a Resistência Máxima (MPa)
Murete	Casa 5	Perpendicular	H_05_w01p	170	1,02	--	--	0,017
			H_05_w02p	200	1,57	--	--	0,016
		Diagonal	H_05_w03d	--	--	47	0,17	0,004
			H_05_w04d	--	--	57	0,17	0,003
			H_05_w05d	--	--	55	0,19	0,005
Média				185	1,30	53	0,18	--
Murete	Casa 10	Perpendicular	H_10_w01p	200	1,33	--	--	0,08
		Diagonal	H_10_w02d	--	--	25	0,07	0,004
			H_10_w03d	--	--	30	0,11	0,007
Murete	Parede 10	Perpendicular	W_10_w01p	95	0,77	--	--	0,016
			W_10_w02p	250	0,95	--	--	0,016
		Diagonal	W_10_w03d	--	--	25	0,06	0,006
			W_10_w04d	--	--	15	0,05	0,006
			W_10_w05d	--	--	10	0,05	0,011
			Média				173	0,86

Tabela 2 - Resultados dos ensaios realizados sobre os muretes de adobe [18]

Neste estudo concluiu-se que existe uma correlação entre as resistências de compressão perpendicular à argamassa de assentamento dos muretes e a resistência à compressão simples dos blocos de adobe. Também se concluiu que nos ensaios de corte, nos muretes constituídos por adobe com resistência mais baixa também se obtiveram valores de resistência ao corte mais baixos. Os valores do módulo de elasticidade transversal e da resistência ao corte são 10% dos valores do módulo de elasticidade e da resistência à compressão dos ensaios de compressão perpendicular às juntas.

No ano de 2009, foi realizada a dissertação de mestrado *Caracterização Mecânica e Patológica das Alvenarias em Adobe de Aveiro* [1] pelo mestrando Hermano Tiago Teixeira Martins sob a orientação dos professores Aníbal Costa e Humberto Varum. Nesta dissertação foi realizada uma análise granulométrica de agregados que foram extraídos de blocos de adobe originários de alvenarias existentes na região de Aveiro, tendo como base técnica a especificação *NP 1379 (1376)* [22]. Após a análise granulométrica, foram retirados provetes cilíndricos de adobe dos blocos, tendo esses carotes sido ensaiados à compressão simples de acordo com a norma *RILEM CPC4* [27] e alguns deles foram também ensaiados à compressão diametral segundo o *RILEM CPC6* [28]. Estes ensaios de compressão foram realizados com níveis de humidade dos provetes diferentes, desde a saturação até à humidade de equilíbrio. Foram realizados também ensaios de absorção de água com a finalidade de se determinar os coeficientes de absorção e de penetração capilar de acordo com o *RILEM CPC4* [27] e também o *prEN 15801* [30] e da capacidade de absorção total de água, segundo o *NMAC 14.7.4.2003* [30]. Por último foi realizado um ensaio de compressão simples à argamassa de reboco do adobe.

Relativamente à análise granulométrica, foram peneiradas as amostras seleccionadas do adobe de 3 muros e de uma casa, sendo que os resultados das granulometrias são apresentados nas tabelas 3, 4, 5 e 6.

M_01 (200g)						
Massa total de amostra (g)						200
Fração > 0,075 mm	Massa do recipiente de secagem (g)					224,8
	Massa do recipiente + solo seco (g)					421,8
Massa da fração > 0,075 mm (g)						191,2
Massa da fração < 0,075 mm (g)						8,8
	Peneiro n°	Abertura (mm)	Massa retida (g)	% retida	% cum. retida	% cum. passada
Peneiramento	1 ½"	38,1	0,00	0,00	0,00	100,00
	¾"	19	0,00	0,00	0,00	100,00
	3/8"	9,51	4,00	2,03	3,03	97,97
	N°4	4,76	2,80	1,42	3,46	96,54
	N°8	2,38	7,60	3,86	7,32	92,68
	N°16	1,19	22,50	11,44	18,76	81,24
	N°30	0,595	52,60	26,74	45,50	54,50
	N°50	0,297	80,40	40,87	86,38	13,62
	N°100	0,149	15,00	7,63	94,00	6,00
	N°200	0,075	6,00	3,05	97,05	2,95
	Fundo			5,80	2,95	100,00
Σ			196,70			

Tabela 3 – Distribuição granulométrica obtida após peneiração dos agregados do muro M_01 [1]

M_02 (200g)						
Massa total de amostra (g)						200
Fração > 0,075 mm	Massa do recipiente de secagem (g)					240,5
	Massa do recipiente + solo seco (g)					440,1
Massa da fração > 0,075 mm (g)						190,6
Massa da fração < 0,075 mm (g)						9,4
	Peneiro n°	Abertura (mm)	Massa retida (g)	% retida	% cum. retida	% cum. passada
Peneiramento	1 ½"	38,1	0,00	0,00	0,00	100,00
	¾"	19	0,00	0,00	0,00	100,00
	3/8"	9,51	0,00	0,00	0,00	100,00
	N°4	4,76	0,60	0,30	0,30	99,70
	N°8	2,38	3,10	1,56	1,86	98,14
	N°16	1,19	31,90	10,99	12,85	87,15
	N°30	0,595	74,50	37,40	50,25	49,75
	N°50	0,297	59,10	29,67	79,92	20,08
	N°100	0,149	16,00	8,03	87,95	12,05
	N°200	0,075	15,00	7,53	95,48	4,52
	Fundo			9,00	4,52	100,00
Σ			199,20			

Tabela 4 – Distribuição granulométrica obtida após peneiração dos agregados do muro M_02 [1]

M_03 (200g)						
Massa total de amostra (g)						200
Fração > 0,075 mm	Massa do recipiente de secagem (g)					239,9
	Massa do recipiente + solo seco (g)					438
Massa da fração > 0,075 mm (g)						192,5
Massa da fração < 0,075 mm (g)						7,5
	Peneiro nº	Abertura (mm)	Massa retida (g)	% retida	% cum. retida	% cum. passada
Peneiramento	1 ½"	38,1	0,00	0,00	0,00	100,00
	¾"	19	0,00	0,00	0,00	100,00
	3/8"	9,51	2,10	1,06	1,06	98,94
	Nº4	4,76	9,90	5,01	6,07	93,93
	Nº8	2,38	16,70	8,45	14,52	85,48
	Nº16	1,19	26,40	13,35	27,87	72,13
	Nº30	0,595	46,00	23,27	51,14	48,86
	Nº50	0,297	66,80	33,79	84,93	15,07
	Nº100	0,149	15,90	8,04	92,97	7,03
	Nº200	0,075	8,30	4,20	97,17	2,83
	Fundo			5,60	2,83	100,00
Σ			197,70			

Tabela 5 – Distribuição granulométrica obtida após peneiração dos agregados do muro M_03 [1]

C_01 (200g)						
Massa total de amostra (g)						200
Fração > 0,075 mm	Massa do recipiente de secagem (g)					229,4
	Massa do recipiente + solo seco (g)					428,1
Massa da fração > 0,075 mm (g)						191,3
Massa da fração < 0,075 mm (g)						8,7
	Peneiro nº	Abertura (mm)	Massa retida (g)	% retida	% cum. retida	% cum. passada
Peneiramento	1 ½"	38,1	0,00	0,00	0,00	100,00
	¾"	19	0,00	0,00	0,00	100,00
	3/8"	9,51	0,00	0,00	0,00	100,00
	Nº4	4,76	0,20	0,10	0,10	99,90
	Nº8	2,38	1,80	0,91	1,01	98,99
	Nº16	1,19	5,90	2,97	3,98	96,02
	Nº30	0,595	24,00	12,09	16,07	83,93
	Nº50	0,297	60,40	30,43	46,50	53,50
	Nº100	0,149	83,60	42,12	88,61	11,39
	Nº200	0,075	15,20	7,66	96,27	3,73
	Fundo			7,40	3,73	100,00
Σ			198,50			

Tabela 6 – Distribuição granulométrica obtida após a peneiração dos agregados da casa C_01 [1]

Segundo o diagrama triangular da Escala de Atterberg, concluiu-se que as terras utilizadas nas alvenarias são um "solo arenoso - predominância de areias, com o aspeto de uma argamassa de reboco" [1].

Nos ensaios de compressão simples dos provetes de adobe, tanto nos provetes secos como saturados, foram obtidos os valores que constam nas tabelas 7 e 8.

Provete			Propriedades mecânicas			
			Módulo de Young (MPa)	Resistência à Compressão provetes “secos” (MPa)	Deformação no pico (1/1000)	Resistência à compressão provetes “saturados” (MPa)
Casas	Casa 1	C_01_02	173,3	1,24	6,71	1,18
		C_01_03				
		C_01_04				
		C_01_08				
		AR_C_01_01 (Argamassa)	-	2,78	-	-
	AR_C_01_02 (Argamassa)					
	Casa 2	C_02_01	203,3	1,00	6,75	-
		C_02_02				
		C_02_03				
	Casa 3	C_03_01	96,7	0,75	13,85	-
		C_03_02				
		C_03_03				
C_03_07						

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de compressão simples sobre os provetes de adobe das casas 1, 2 e 3 [1]

Provete			Propriedades Mecânicas			
			Módulo de Young (MPa)	Resistência à Compressão Provetes "secos" (MPa)	Deformação no Pico (1/1000)	Resistência à Compressão Provetes "saturados" (MPa)
Muros	Muro 1	M_01_02	138,3	0,95	8,18	-
		M_01_03				
		M_01_04				
	Muro 2	M_02_01	117,3	0,83	8,90	-
		M_02_02				
		M_02_03				
	Muro 4	M_04_01	200,0	0,99	5,55	-
		M_04_02				
		M_04_03				
		M_04_07				
	Muro 5	M_05_01	340,0	1,57	6,19	1,43
		M_05_02				
		M_05_03				
		M_05_07				
		M_05_08				
	M_05_09					
	Muro 6	M_06_01	--	--	--	2,14

Tabela 8 – Resultados dos ensaios de compressão simples sobre os provetes dos muros 1, 2, 3, 4, 5 e 6 [1]

Relativamente aos resultados de resistência à tração obtidos a partir dos ensaios de compressão diametral, obtiveram-se os resultados presentes na tabela 9.

Provete			Resistência à Tração Provetes “secos” (MPa)
Casas	Casa 1	C_01_05	0,13
		C_01_06	
		C_01_07	
	Casa 2	C_02_04	0,19
		C_02_05	
		C_02_06	
	Casa 3	C_03_04	0,19
		C_03_05	
		C_03_06	
Muros	Muro 2	M_02_04	0,13
		M_02_05	
		M_02_06	
	Muro 4	M_04_04	0,12
		M_04_05	
		M_04_06	
	Muro 5	M_05_04	0,40
		M_05_05	
		M_05_06	

Tabela 9 – Resultados dos ensaios de tração dos provetes das casas 1, 2, 3 e dos muros 2, 4 e 5 [1]

No ensaio de compressão simples da argamassa de reboco, obteve-se o valor médio de 2,8 MPa. Concluiu-se que esse valor, que é superior ao valor da resistência à compressão do adobe, se deve a uma maior quantidade de cal presente na argamassa, relativamente ao adobe usado na alvenaria.

Concluindo, nos ensaios de absorção, os valores obtidos são apresentados na tabela 10.

Provete	Coefficiente de Absorção ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$)	Coefficiente de Penetração Capilar ($\text{cm}/\text{s}^{1/2}$)	Absorção Total (7 dias de imersão) (%)
C_03_05	132,3	0,167	15,8
M_02_05	131,1	0,165	14,6
C_03_04	180,6	0,189	14,6
M_04_06	241,4	0,153	14,3
C_02_04	234,0	0,153	16,2
M_05_06	100,2	0,141	13,5
C_01_06	157,7	0,141	15,5
M_04_07	200,7	0,153	14,4
Média	172,2	0,158	14,9

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de absorção e de penetração capilar [1]

Com estes resultados concluiu-se que o adobe é um material com elevada porosidade e que é bastante permeável, sendo que é fundamentalmente devido ao efeito conjugado destas especificidades construtivas do adobe como material formado por um sistema poroso de elevada conectividade entre poros, que permite o fluxo eficaz de água capilar, que se alcançam os elevados valores dos coeficientes de absorção e penetração capilar obtidos nos ensaios realizados [1].

Em 2012 foi publicado o artigo científico *Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions* [25], elaborado por Dora Silveira, Humberto Varum, Aníbal Costa, Tiago Martins, Henrique Pereira e João Almeida. Neste artigo fez-se um estudo das características mecânicas do bloco de adobe presente em paredes de habitações e de muros exteriores que dividem terrenos. Desses blocos foram retirados provetes cilíndricos com aproximadamente 80 a 90 mm de diâmetro, com exceção de algumas amostras com diâmetros menores devido a defeitos existentes nos blocos. Os provetes foram depois ensaiados à compressão simples e à compressão diametral, tendo sido retirados os valores médios da resistência à compressão simples e à tração do adobe e consecutivamente os valores médios do módulo de elasticidade e da extensão média no pico de tensão. Após a realização dos ensaios, os resultados obtidos foram compilados na tabela 11.

Construção	Tensão de Compressão Média (MPa)	Módulo de Elasticidade Médio (MPa)	Deformação média na Tensão Máxima (1/1000)	Tensão de Tração Média (MPa)
Casas				
H_01	1,24	273	7	0,13
H_02	1,00	203	7	0,19
H_03	0,75	97	14	0,19
H_04	0,68	51	28	--
H_05	2,15	448	6	--
H_09	0,70	87	10	--
H_10	1,98	334	7	--
H_11	1,08	143	9	--
Muros de divisão de terras				
W_01	0,94	138	8	--
W_02	0,83	117	9	0,13
W_04	0,99	200	6	0,12
W_05	1,72	340	8	0,40
W_06	1,25	209	8	--
W_07	0,80	94	10	--
W_09	1,05	114	14	--
W_10	0,98	127	11	--

Tabela 11 – Resultados dos ensaios de compressão simples e de compressão diametral dos provetes de adobe [25]

O valor médio da tensão de compressão em blocos de adobe provenientes dos muros é de 1,03 MPa, sendo este 78% inferior ao valor do adobe proveniente de casas, que é de 1,32 MPa. Também se verificou que os valores no caso das casas apresentam maiores desvios relativamente ao seu valor médio comparativamente com os valores dos muros.

Relativamente às tensões de tração, o valor médio da tensão de tração dos muros é superior ao valor do adobe das casas, sendo este último aproximadamente 78% do valor da tensão média no adobe das casas. A extensão média na tensão de pico em muros é de 10,3% enquanto que nos adobes das casas é de 9,8%. A variabilidade entre os valores médios nas casas é maior comparativamente com os muros, sendo muito maior na situação da casa H_04.

O valor médio do módulo de elasticidade para os adobes provenientes das casas é de 225 MPa e de 147 MPa nos muros, sendo este cerca de 65% do valor do módulo de elasticidade nas casas. A variabilidade dos resultados nas amostras das casas é maior comparativamente com os muros. Foi também estudada a correlação entre os módulos de elasticidade e as tensões de compressão e de tração, sendo estes apresentados na figura 13.

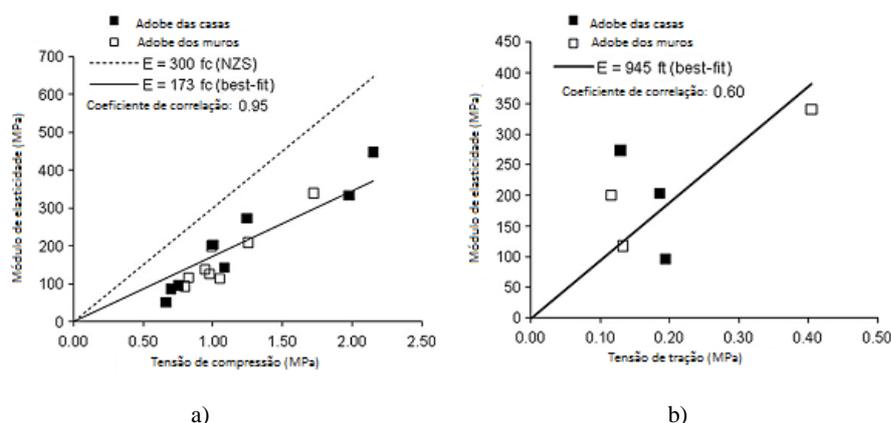


Figura 13 – Gráficos da correlação entre o módulo de elasticidade e de resistência: a) à compressão simples e b) à tração [25]

Esta correlação obtida nos ensaios foi comparada com a correlação proposta pelo NZS 4297 [31] para alvenarias de adobe no caso da compressão simples.

Concluindo, os resultados médios obtidos foram apresentados na tabela 12.

	Tensão de Compressão Média (MPa)	Módulo de Elasticidade Médio (MPa)	Deformação Média na Tensão Máxima (1/1000)	Tensão de Tração Média (MPa)
Casas	1,32	225	9,8	0,17
Muros de divisão de terras	1,03	147	10,3	0,22
Todas as construções	1,17	187	10,1	0,19

Tabela 12 – Valores médios da resistência à compressão simples, do módulo de elasticidade, da extensão média no pico de tensão e da resistência à tração [25]

A alta variabilidade nos resultados era expectável devido à grande heterogeneidade dos diferentes adobes e devido também às variáveis presentes na produção dos blocos de adobe e também na sua cura.

3. RECOLHA DE AMOSTRAS, PREPARAÇÃO DOS PROVETES E DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

3.1. Objetivos do estudo

Depois do exposto no estado da arte, esta dissertação terá como objetivo complementar a bibliografia existente sobre as técnicas e características da construção em adobe na região de Aveiro. A informação contida nesta dissertação e recolhida até aos dias de hoje e a que será elaborada em estudos futuros, poderão ser aproveitados para a elaboração de uma norma nacional para a construção neste tipo de alvenarias, que terá uma grande utilidade nos trabalhos de reabilitação estrutural e até na construção de novos empreendimentos em adobe.

Neste estudo foram realizados três ensaios que servirão para compreender o comportamento mecânico da interação entre o adobe e a argamassa presentes em exemplares construídos em laboratório. Foram realizados dois ensaios de corte em muretes de reduzida dimensão e um ensaio de arrancamento de blocos de adobe.

Para complementar os ensaios referidos, foram também realizados ensaios de caracterização dos materiais constituintes dos elementos em estudo, nomeadamente ensaios de granulometria da areia e da terra constituintes da argamassa de reboco, ensaios Pundit para a aferição do módulo de elasticidade, de compressão, flexão e carbonatação de provetes de argamassa e também de compressão e flexão de provetes de adobe.

3.2. Recolha dos adobes

Para realizar a recolha dos adobes necessários para a realização dos ensaios, teve que se proceder ao contato com várias Câmaras Municipais da área dos Distritos de Aveiro e Coimbra, com o âmbito de se obterem informações relativamente a demolições de edificações em adobe nesses mesmos municípios. Após vários contactos, a Câmara Municipal de Anadia disponibilizou a informação de que iria ser realizada a demolição de um muro de separação de terrenos, sendo então essa edificação a escolhida para a recolha dos adobes.

Conforme se procedia ao desmonte do muro, detetaram-se diferenças entre alguns adobes, sendo essas diferenças mais evidentes no tamanho dos blocos e nas marcações que estes tinham, que seriam de certa forma marcas dos fabricantes dos adobes, de acordo com a figura 14. Havia 3 marcas de adobes, sendo estas a marca ACA, CFA e M. As suas dimensões variavam em média entre os 0,40 x 0,30 x 0,10m para os ACA e os 0,44 x 0,32 x 0,11m nos CFA e M. No processo de seleção dos adobes que foram retirados, foram escolhidos os que se encontravam em melhor estado de conservação, sendo que também foram aproveitados alguns com poucos danos e que poderiam ser aproveitados para os ensaios a realizar. Os adobes encontravam-se espalhados por zonas no muro, sendo que os blocos maiores estavam na base e os mais pequenos no topo.

O muro encontrava-se previamente inclinado, tendo sido tomada como medida preventiva a demolição da parte superior para evitar o seu colapso anteriormente à intervenção de desmonte. Esta intervenção decorreu manualmente com a utilização de várias ferramentas, tais como um pé de cabra, um escopro, uma talhadeira, uma maceta e também um martelo elétrico, sendo adiada várias vezes devido às condições climatéricas adversas, uma vez que os blocos se partiam quando se encontravam molhados. O martelo elétrico foi maioritariamente utilizado em zonas onde o muro já tinha sofrido uma reabilitação com base em argamassas de cimento, sendo que os adobes em contato com essa argamassa tinham a sua integridade assegurada apesar de ter estado em contato direto com esta.

No final da recolha, foram contabilizados 509 adobes que foram posteriormente enviados para o laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.



Figura 14 – Fotografia dos adobes recolhidos durante o desmonte do muro

3.3. Ensaio de corte da interface entre o adobe e a junta de argamassa segundo a norma EN 1052-3

A norma *EN 1052-3 - Methods of test for masonry - Part 3: Determination of initial shear strength* [32] permite a utilização de um método específico para o estudo da determinação da resistência inicial ao corte de juntas horizontais de alvenaria a partir de um provete testado em laboratório.

Devem ser ensaiados pelo menos 9 provetes, sendo que estes são colocados numa máquina de ensaio que aplica uma carga diretamente sobre a fiada intermédia de adobes, sendo que as fiadas de extremidade são apoiadas na face contrária para que a fiada central possa escorregar após sofrer a rotura por corte, tal como está representado na figura 15.

A máquina de ensaio que é usada para aplicar a carga sobre o provete deve ter uma capacidade adequada, sendo que a escala deve ser tal, que a carga máxima aplicada deve exceder um quinto da leitura máxima da escala.

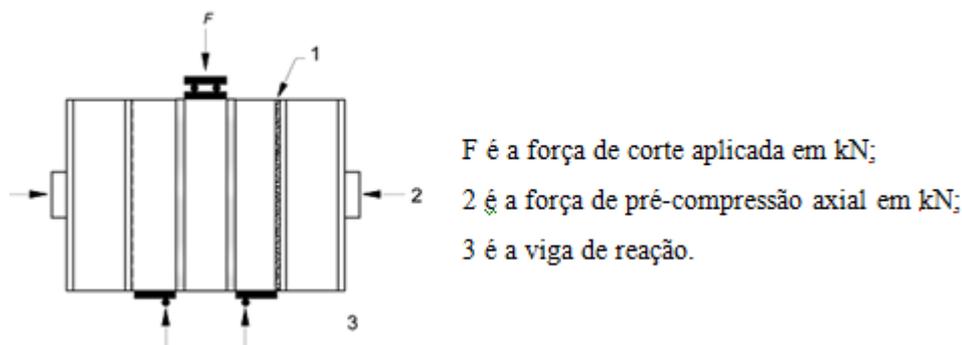


Figura 15 – Esquema do ensaio de corte EN 1052-3 [32]

Para cada provete, deve-se calcular a tensão de corte e a tensão de compressão com uma aproximação aos 0,01 N/mm², recorrendo às seguintes equações:

$$f_{\text{voi}} = \frac{F_{i,\text{max}}}{2 \times A_i} \quad [32]$$

$$f_{\text{pi}} = \frac{F_{\text{pi}}}{A_i} \quad [32]$$

Sendo que:

f_{voi} é a tensão de corte em N/mm^2 ;

$F_{i,\text{max}}$ é a força de corte em kN;

A_i é a área longitudinal do murete em mm^2 ;

f_{pi} é a tensão de compressão em N/mm^2 ;

F_{pi} é a força axial de compressão em kN.

Após realizados os cálculos, usam-se os valores obtidos para executar um gráfico que relaciona a tensão de corte f_{voi} com a tensão de compressão axial f_{pi} que se apresenta na figura 16. A linha que relaciona os dois conjuntos de valores deve obedecer a uma regressão linear dos pontos obtidos. Depois de desenhada a linha, deve-se obter o valor da resistência ao corte sem tensão axial, calculando a interseção desta linha com o eixo vertical e deve ser calculado o ângulo de atrito interno. Devem ser também calculadas a tensão de resistência ao corte característica sem tensão axial f_{vok} e o ângulo de atrito característico α_k , sendo que $f_{\text{vok}} = f_{\text{vo}}$ e $\tan \alpha_k = 0,8 \cdot \tan \alpha$.

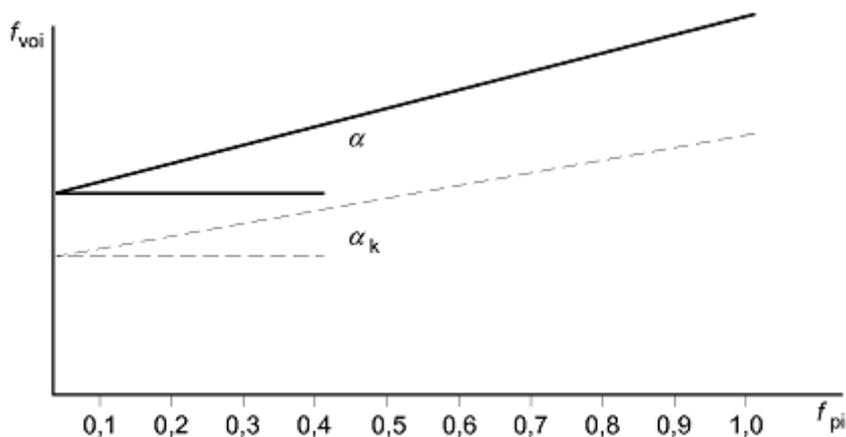


Figura 16 – Gráfico tensão axial vs. tensão de corte [32]

Antes e durante o ensaio, devem ser obtidos os seguintes dados:

- A área de secção A_i dos muretes em mm^2 , paralela à força de corte com uma precisão de 1%;
- A carga máxima $F_{i,\text{max}}$ em N/mm^2 ;
- A carga compressão F_{pi} em N/mm^2 ;
- O tipo de rotura.

No caso de a rotura não ser por corte, mas por esmagamento ou quebra das unidades de alvenaria, mais provetes devem ser ensaiados até se completarem 3 ensaios em que a rotura aconteça por corte. Os dados obtidos nos ensaios em que houve esmagamento devem ser excluídos da avaliação, e caso seja necessário, devem ser utilizadas cargas diferentes de compressão até que os resultados sejam satisfatórios.

3.4. Ensaio de corte da interface entre o adobe e a junta de argamassa segundo a norma *LUMB5*

Este ensaio, designado por *LUMB5 - Short-term shear test for the interface between the masonry unit and mortar or moisture-insulating interlayer* [33], pretende avaliar a resistência ao corte de juntas horizontais da alvenaria. Os muretes devem ser construídos conforme o apresentado na figura 17.

Esta norma requer a construção de um número mínimo de 5 muretes para a recolha de dados, embora refere que seja preferível esse valor ser de 10 muretes.

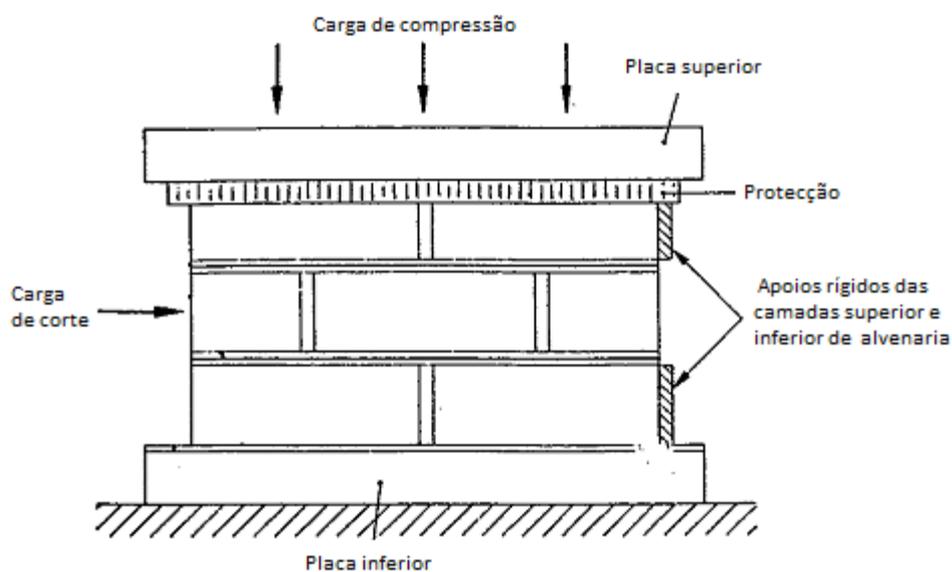
Estes devem ser construídos sobre uma superfície limpa e nivelada. Os lados devem ter um ângulo reto e a base e o topo devem ser paralelos. As juntas devem ser totalmente preenchidas de argamassa e a construção dos muretes deve ser o mais fiel possível à configuração ordinária de uma parede de alvenaria.

O aparelho de ensaio deve conseguir aplicar uma tensão normal de 1 N/mm^2 e aplicar uma tensão tangencial progressivamente crescente entre 0,3 e $0,4 \text{ N/mm}^2/\text{min}$ sobre o provete.

Após o processo de cura da argamassa estar finalizado, deve-se colocar o provete sobre uma placa de cartão ou outro material de 3 mm de espessura.

Deve-se colocar um material compressível e moldável entre o topo do murete e a placa de reação para assegurar que a carga é distribuída uniformemente pela superfície do murete.

De seguida deve-se aplicar uma tensão normal até um máximo de 1 N/mm^2 e deve ser aplicada variavelmente entre 0 e 1 N/mm^2 , para estabelecer a componente friccional da resistência de corte. Depois, deve ser aplicada uma carga horizontal sobre a fiada intermédia de adobes, enquanto que as fiadas exteriores devem estar apoiadas na face oposta do murete, de forma a que possa ser aplicada a carga tangencial, tal como é demonstrado na figura 19. Esta carga deve ser medida com uma célula de carga e o ritmo de aumento da tensão deve ser entre $0,3$ e $0,4 \text{ N/mm}^2/\text{min}$. A tensão de rotura é o valor mais elevado obtido.

Figura 17 – Esquema da configuração do ensaio de corte *LUMB5* [33]

A resistência ao corte de cada provete deve ser calculada pela seguinte fórmula:

$$\tau = \frac{F}{2 \times A} \quad [33]$$

Em que:

τ é a tensão resistente de corte em MPa;

F é a força de corte aplicada em kN;

A é a área de cada junta de argamassa em mm^2 .

3.5. Ensaio de resistência da ligação entre as unidades de alvenaria e a argamassa das juntas pelo método do arrancamento

Este ensaio, especificado pela norma *LUMB3 - Bond strength of masonry using the bond wrench method* [34], permite determinar a resistência da ligação entre as unidades de alvenaria e a argamassa. Descreve também a preparação dos provetes, o acondicionamento necessário antes do ensaio, o método de ensaio e o método de cálculo.

Para casos em que a ligação é boa, os espécimes devem ter um mínimo de 5 unidades de altura. Para os casos em que é necessário obter dados para futuras propostas de construção, deve haver um mínimo de 5 juntas de argamassa.

Os muretes devem ser construídos numa superfície limpa, com os lados em ângulo reto com a base. As juntas devem ter todas a mesma espessura e devem ser totalmente preenchidas de argamassa.

O bloco de adobe situado logo abaixo do adobe a ser arrancado deve estar restringido para que este não seja arrancado juntamente com o bloco superior. A alavanca utilizada para aplicar o momento deve estar na horizontal, como pode ser visto na figura 18. A carga deve ser aplicada de forma crescente a um ritmo entre 0,3 a 0,4 N/mm²/min até à rotura.

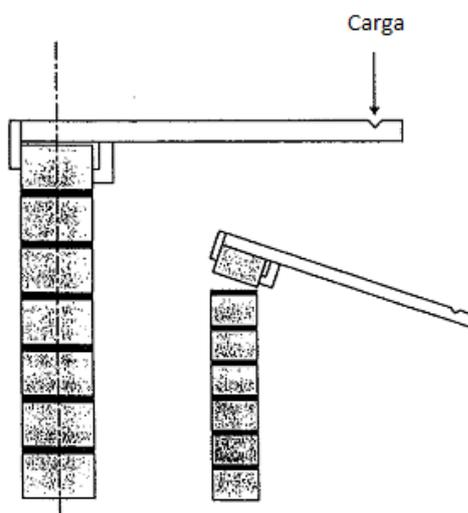


Figura 18 – Esquema da configuração do ensaio de arrancamento [34]

Depois de realizado o ensaio, deve ser calculada a tensão de cedência, sendo que a fórmula é apresentada por:

$$S = \frac{g \times (e_4 \times m_4 + e_3 \times m_3 - \frac{2}{3} \times d \times (m_4 + m_3 + \frac{m_2}{4}))}{Z} \text{ em que:} \quad [34]$$

g é a aceleração da gravidade, ou seja $9,81 \text{ m/s}^2$;

m_4 é a massa da alavanca em kg;

m_3 é a massa da carga em kg;

m_2 é a massa do adobe arrancado juntamente com a massa aderente em kg;

e_4 é a excentricidade entre o centro de gravidade do sistema de alavanca e a lateral exterior do adobe em mm;

e_3 é a excentricidade entre o ponto de aplicação da carga e a lateral exterior do adobe em mm;

d é o comprimento médio da superfície de arrancamento do adobe em mm;

b é largura média da superfície de arrancamento em mm;

Z é o módulo de secção da junta em mm^3 .

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

4.1. Nomenclatura dos provetes

Ao longo da construção dos muretes foram retiradas amostras de argamassa fabricada para a realização de provetes. Estes muretes foram numerados para que fosse possível obter uma ordem cronológica da sua construção. A numeração teve igual importância para a associação aos provetes de argamassa que foram realizados ao longo da construção dos muretes, de maneira a que pudesse haver uma correspondência cronológica entre os ensaios dos muretes e dos provetes de argamassa correspondentes.

A nomenclatura atribuída aos muretes foi separada por ensaios, sendo que nos ensaios de corte, *RILEM LUMB5* [33] e *EN 1052-3* [32], os muretes foram numerados de um a trinta e no ensaio de arrancamento, os muretes foram numerados de um a três.

Os provetes de argamassa foram organizados em grupos de 3, sendo que houve uma exceção no primeiro conjunto de provetes e também no conjunto 11, em que foi organizado um conjunto de 6 provetes, sendo o esquema da nomenclatura com o formato $[ABC]_i$, em que o i representa a numeração de cada conjunto de provetes e nas exceções, a nomenclatura é representada por $[ABCDEF]_1$ e $[ABCDEF]_{11}$. A relação entre os provetes de argamassa e os muretes encontra-se na tabela 13.

No total foram construídos 30 muretes para o ensaio de corte relativo à norma *EN 1052-3* [32], 30 muretes para o ensaio da norma *RILEM LUMB5* [33] e 3 muros para o ensaio de arrancamento, sendo esses valores bastante superiores à quantidade mínima exigida pelas respectivas normas, para se poder obter um resultado o mais fidedigno possível.

Ensaio	Provetes de argamassa	Muretes
Corte BS EN 1052-3	[ABCDEF] ₁	1,2,3,4
	[ABC] ₂	5,6,7
	[ABC] ₃	8,9,10
	[ABC] ₄	11,12
	[ABC] ₅	13,14,15,16
	[ABC] ₆	17,18,19,20
	[ABC] ₇	21,22,23,24
	[ABC] ₈	25,26,27,28,29,30
Corte RILEM LUMB5 (P6A)	[ABC] ₁	1,2,3
	[ABC] ₂	4,5,6
	[ABC] ₃	7,8,9
	[ABC] ₄	10,11
	[ABC] ₅	12,13,14
	[ABC] ₆	15,16,17
	[ABC] ₇	18,19,20
	[ABC] ₈	21,22,23,24,25
	[ABC] ₉	26,27,28,29,30
Arrancamento	[ABC] ₉	1
	[ABC] ₁₀	2
	[ABCDEF] ₁₁	3

Tabela 13 – Síntese dos provetes preparados de argamassa e alvenaria (muretes) para cada ensaio

4.2. Análise dos Materiais

4.2.1. Análise granulométrica

A argamassa utilizada para o assentamento nos provetes construídos é constituída por cal (90% cal aérea e 10% cal hidráulica), por terra e por areia na proporção de 1:1:2, respetivamente. De forma a caracterizar a areia e a terra utilizadas foram realizadas análises granulométricas seguindo as recomendações da norma *EN 933-1* [35]. Após a secagem das amostras em forno durante setenta e duas horas a uma temperatura de oitenta e seis graus para se retirar toda a humidade destas, obtiveram-se duzentos e cinquenta gramas de areia e oitocentos gramas de terra para peneiração. Ambas as amostras foram colocadas no peneiro de 0,063 mm para se realizar uma lavagem que retirou todas as partículas com dimensão menor que a do peneiro. De seguida, as amostras já lavadas foram colocadas novamente no forno para nova secagem. Depois de retiradas do forno foram pesadas, sendo que os dados

obtidos durante todo o processo representados na tabela 14. Após a secagem, foram realizadas as peneirações dos solos nos peneiros da série *BS410-2:2000*, de acordo com a figura 19.

Amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa lavada (g)
Areia	250,00	247,130	2,870
Terra	800,00	730.240	69,760

Tabela 14 – Massas obtidas antes e após a lavagem no peneiro 0,063 mm



a)

b)

Figura 19 – Procedimento para a caracterização da granulometria: a) determinação da areia, b) peneiração

Posteriormente foram realizadas as granulometrias da areia e da terra, sendo a sua análise representada na figura 20.

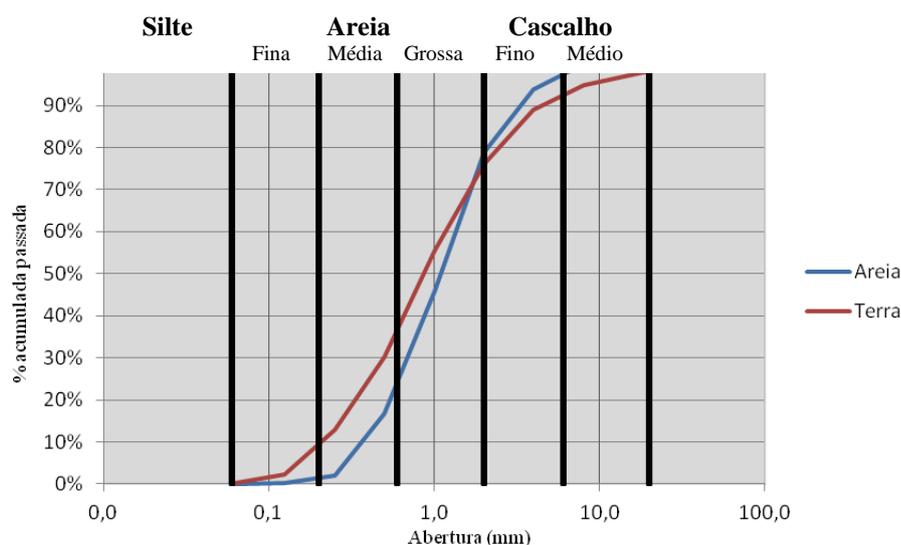


Figura 20 – Gráfico representativo das granulometrias da areia e da terra

O gráfico das granulometrias revela que ambos os solos são areias grossas, sendo que a terra contém mais quantidade de areias médias comparativamente com a areia.

4.2.2. Ensaio de flexão e compressão em provetes de argamassa, indicador de fenolftaleína e Pundit

Durante o fabrico da argamassa de assentamento, foram realizados provetes para serem ensaiados à flexão e compressão. Os ensaios foram realizados respeitando a cronologia de ensaios dos muretes de adobe, visto que cada provete corresponde à argamassa utilizada para fazer um determinado número de muretes. Seguindo esta ordem cronológica, foi assegurado que as propriedades mecânicas da argamassa eram semelhantes, visto o tempo de cura foi o mesmo. Os provetes foram colocados em estufa a uma temperatura de 25°C e com uma humidade relativa de 65%.

Seguindo o estipulado na norma EN 1015-11 (1999) [36], para o ensaio de flexão os provetes foram colocados numa máquina, como mostra a figura 21, que aplica uma carga entre 10N/s a 50N/s, sendo que a rotura ocorre entre 30 a 90 segundos após o início do ensaio. Os provetes têm uma dimensão de 16x4x4cm e o vão de apoio utilizado foi de 10 centímetros.

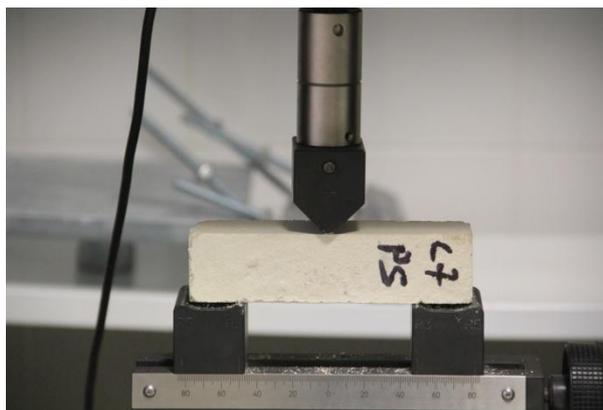


Figura 21 – Ensaio de flexão do provete C7

O cálculo da tensão de flexão dos provetes obtém-se a partir da seguinte fórmula:

$$f = 1,5 \times \frac{F \times l}{b \times d^2} \quad [36]$$

em que:

F é a carga aplicada em N;

l é a distância entre os suportes inferiores em mm;

b é a largura do provete em mm;

d é a altura do provete em mm.

Os valores obtidos para este ensaio apresentam-se na tabela 15.

Provete	Carga máxima aplicada (N)	Tensão máxima (N/mm ²)	Tensão média (N/mm ²)
A1	135,940	0,320	0,315
B1	128,590	0,300	
C1	135,500	0,320	
D1	127,67	0,300	
E1	138,300	0,320	
F1	138,170	0,320	
A2	148,090	0,350	0,380
B2	152,940	0,360	
C2	179,800	0,420	
A3	166,940	0,390	0,370
B3	155,530	0,360	

Provete	Carga máxima aplicada (N)	Tensão máxima (N/mm ²)	Tensão média (N/mm ²)
C3	155,140	0,360	
A4	136,800	0,320	0,310
B4	125,910	0,300	
C4	136,590	0,320	
A5	139,750	0,330	0,330
C5	141,750	0,330	
A6	172,060	0,400	0,400
B6	166,000	0,390	
C6	176,560	0,410	
A7	94,910	0,220	0,340
B7	175,000	0,410	
C7	161,310	0,380	
A8	140,840	0,330	0,330
B8	142,440	0,330	
C8	141,090	0,330	
A9	164,310	0,390	0,405
B9	177,160	0,420	
A10	128,530	0,300	0,320
B10	129,220	0,300	
C10	150,810	0,350	
A11	120,000	0,280	0,310
B11	126,690	0,300	
C11	129,190	0,300	
D11	143,560	0,340	
E11	132,060	0,310	
F11	130,690	0,310	
P6A			
A1	126,880	0,300	0,300
A2	121,090	0,280	0,260
B2	104,060	0,240	
C2	107,590	0,250	0,310
A3	129,440	0,300	
B3	134,000	0,310	
C3	133,690	0,310	0,310
A4	124,250	0,290	
B4	130,310	0,310	
C4	140,250	0,330	0,260
A5	123,380	0,290	
B5	103,530	0,240	
C5	112,130	0,260	0,230
A6	81,470	0,190	
B6	89,470	0,210	
C6	119,720	0,280	0,260
A7	119,750	0,280	

Provete	Carga máxima aplicada (N)	Tensão máxima (N/mm ²)	Tensão média (N/mm ²)
B7	109,440	0,260	
C7	102,160	0,240	
A8	110,470	0,260	0,240
B8	102,030	0,240	
C8	91,160	0,210	
A9	108,160	0,250	0,230
B9	67,690	0,160	
C9	116,750	0,270	
Média			0,309
Desvio Padrão			0,043
CoV (%)			13,985

Tabela 15 – Tensão de flexão dos provetes de argamassa

O valor da tensão média de flexão foi de 0,309 MPa com um coeficiente de variação de 13,985%, não havendo uma grande dispersão de valores das tensões ao longo do ensaio. Os valores das tensões dos provetes B5, C9 e dos provetes A1 e B1 da série P6A não foram contabilizados porque estes se encontravam fissurados, sendo entretanto excluídos do ensaio.

Para o ensaio de compressão, a máquina de ensaios deve ser capaz de aplicar uma carga entre 50 N/s a 500 N/s, sendo que a rotura deve ocorrer entre 30 a 90 segundos após o início do ensaio.



Figura 22 – Ensaio de compressão de um dos provetes de argamassa

O cálculo do valor da tensão de compressão é apresentado pela seguinte fórmula:

$$f = \frac{F}{b \times d} \quad [36]$$

Sendo que:

F é a carga aplicada em N;

b é a largura do provete em mm;

d é a altura do provete em mm.

Os valores da tensão de compressão são apresentados na tabela 16.

Provete	Carga aplicada máxima (N)	Tensão máxima (N/mm ²)	Tensão média (N/mm ²)
A1	1191,411	0,740	0,700
B1	1105,470	0,690	
C1	1157,580	0,720	
D1	1150,940	0,720	
E1	1031,480	0,640	
F1	1060,08	0,660	
A2	1643,670	0,350	0,960
B2	1429,610	0,360	
C2	1512,11	0,420	
A3	1525,700	0,390	1,030
B3	1662,110	0,360	
C3	1759,530	0,360	
A4	1469,770	0,920	0,850
B4	1328,910	0,830	
C4	1300,000	0,810	
A5	1340,470	0,840	0,850
B5	1307,340	0,820	
C5	1438,750	0,900	
A6	1603,200	1,000	0,970
B6	1452,970	0,910	
C6	1621,560	1,010	
A7	1754,380	1,100	1,100
B7	1782,240	1,110	
C7	1767,270	1,100	
A8	1810,550	1,130	0,990
B8	1455,080	0,910	
C8	1471,170	0,920	
A9	1761,640	1,100	1,110
B9	1682,890	1,050	

Provete	Carga aplicada máxima (N)	Tensão máxima (N/mm ²)	Tensão média (N/mm ²)
C9	1876,720	1,170	
A10	1078,750	0,670	0,670
B10	1086,800	0,680	
C10	1027,340	0,640	
A11	827,810	0,520	0,560
B11	819,220	0,510	
C11	892,110	0,560	
D11	976,800	0,610	
E11	876,330	0,550	
F11	929,530	0,580	
P6A			
A1	1057,660	0,660	0,670
B1	1074,060	0,670	
C1	1065,230	0,670	
A2	1067,580	0,670	0,630
B2	941,880	0,590	
C2	1009,300	0,630	
A3	954,690	0,600	0,560
B3	823,670	0,510	
C3	920,630	0,580	
A4	1023,360	0,640	0,700
B4	1129,770	0,710	
C4	1187,660	0,740	
A5	919,840	0,570	0,580
B5	912,340	0,570	
C5	933,360	0,580	
A6	877,970	0,550	0,600
B6	1013,130	0,630	
C6	1009,800	0,630	
A7	743,050	0,460	0,560
B7	1003,440	0,630	
C7	942,580	0,590	
A8	994,690	0,620	0,630
B8	1017,730	0,640	
C8	997,420	0,620	
A9	1029,610	0,640	0,670
B9	1096,720	0,690	
C9	1103,280	0,690	
Média			0,720
Desvio Padrão			0,110
CoV (%)			15,278

Tabela 16 – Tensão de compressão dos provetes de argamassa

O valor da tensão média de compressão foi de 0,720 MPa com um coeficiente de variação de 15,278%, o que significa que houve alguma dispersão de valores de tensões nos provetes ao longo do ensaio.

Foi também realizado um ensaio de indicador de fenolftaleína, com base na norma LNEC E391 [37], que consiste na avaliação da carbonatação da argamassa. Esse processo consiste na penetração do dióxido de carbono nos poros da argamassa, sendo que este reage com o hidróxido de cálcio, formando carbonato de cálcio e água.

Com este ensaio, é possível determinar a profundidade de carbonatação, sendo que a superfície de uma secção do provete é borrifada com a solução de fenolftaleína e toda a área que não sofre uma alteração de cor é considerada a área que já sofreu carbonatação, como é visível na figura 23. Os valores da profundidade de carbonatação são apresentados na tabela 17.



Figura 23 – Ensaio de indicador de fenolftaleína para determinar a carbonatação dos provetes

Série de provetes	Profundidade de carbonatação (mm)
(ABCDEF) ₁	11,50
(ABC) ₂	8,25
(ABC) ₃	10,50
(ABC) ₄	12,00
(ABC) ₅	11,25
(ABC) ₆	8,50
(ABC) ₇	9,00
(ABC) ₈	13,50
(ABC) ₉	9,25
(ABC) ₁₀	8,00
(ABCDEF) ₁₁	5,75
P6A	
(ABC) ₁	5,25
(ABC) ₂	3,75
(ABC) ₃	4,75
(ABC) ₄	5,00
(ABC) ₅	4,00
(ABC) ₆	5,25
(ABC) ₇	4,50
(ABC) ₈	6,50
(ABC) ₉	5,50

Tabela 17 – Nível de carbonatação dos provetes de argamassa.

A partir deste ensaio é possível determinar que os provetes correspondentes à argamassa com mais tempo de cura, tiveram uma distância de carbonatação menor em média comparativamente com os provetes mais recentes, sendo que as variações entre os provetes fabricados em datas aproximadas se devem a diferenças na porosidade.

Foi também realizado um ensaio de Pundit para se conferir qual o módulo de elasticidade dinâmico dos provetes de argamassa. Para a realização deste ensaio foi utilizado um aparelho da marca CNS Farnell, pelo que se utilizou o seu manual técnico [38] para a realização do ensaio e dos cálculos necessários.

Em primeiro lugar foi necessário saber qual a massa de cada provete. De seguida, com a ajuda do aparelho de Pundit, determinou-se qual o tempo necessário para a onda sonora emitida atravessar todo o comprimento de cada provete, como é apresentado na figura 24, calculando-se assim a velocidade de propagação do som. Com os valores da massa e com as dimensões de cada provete, calculou-se a densidade dos provetes.

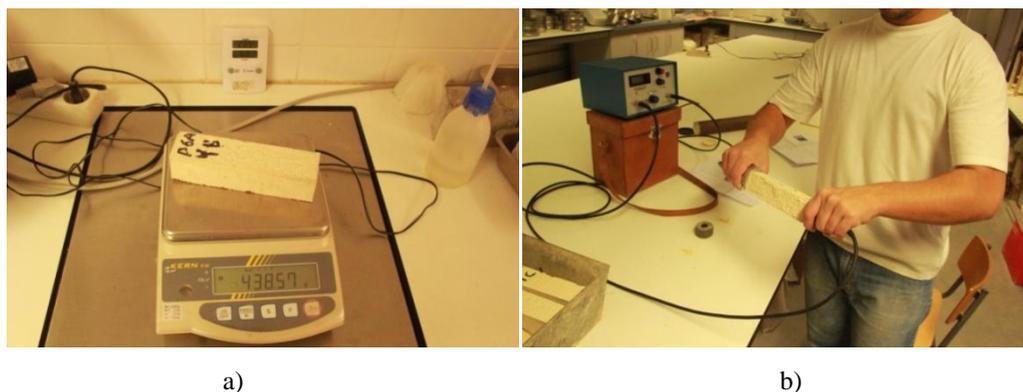


Figura 24 – Procedimentos para a realização do ensaio de Pundit: a) determinação da massa dos provetes, b) utilização do aparelho de Pundit

Recorrendo ao manual técnico do aparelho de Pundit, foi possível calcular o módulo de elasticidade dinâmico pela seguinte fórmula:

$$E_d = \frac{\rho \times V^2 \times (1 + \delta) \times (1 - 2 \times \delta)}{(1 - \delta)} \quad [38]$$

Em que:

E_d é o módulo de elasticidade em MPa;

δ é o coeficiente de Poisson;

ρ é a densidade;

V é a velocidade de propagação do som em km/s.

Os valores obtidos são apresentados na tabela 18.

Provete	Velocidade (km/s)	Massa (kg)	Densidade (ρ) (kg/m³)	Módulo de Elasticidade (Mpa)
A1	1,416	0,445	1740	2464
B1	1,322	0,458	1789	2365
C1	1,410	0,453	1770	2495
D1	1,468	0,428	1671	2452
E1	1,362	0,461	1801	2452
A2	1,461	0,460	1796	2624
B2	1,362	0,458	1787	2434
C2	1,379	0,450	1757	2423
A3	1,385	0,468	1829	2534
B3	1,391	0,445	1740	2421
C3	1,416	0,448	1749	2476
A4	1,373	0,448	1751	2405
B4	1,345	0,445	1740	2339
B4	1,322	0,465	1815	2399
A5	1,581	0,459	1794	2837
B5	1,410	0,446	1742	2456
C5	1,379	0,458	1788	2466
A6	1,441	0,474	1850	2667
B6	1,572	0,464	1813	2850
C6	1,527	0,465	1817	2774
A7	1,441	0,474	1851	2668
B7	1,501	0,462	1805	2709
C7	1,531	0,457	1783	2731
A8	1,391	0,476	1860	2588
B8	1,345	0,460	1797	2416
C8	1,441	0,458	1790	2580
A9	1,438	0,467	1823	2620
B9	1,435	0,459	1794	2575
C9	1,410	0,468	1830	2580
A10	1,362	0,459	1794	2443
B10	1,358	0,458	1790	2432
C10	1,345	0,459	1793	2410
A11	1,311	0,454	1771	2324
B11	1,240	0,427	1668	2,069
C11	1,265	0,435	1698	2480
D11	1,311	0,427	1668	2187
E11	1,270	0,419	1636	2077
F11	1,362	0,415	1620	2205
A1	1,333	0,453	1770	2359

Provete	Velocidade (km/s)	Massa (kg)	Densidade (ρ) (kg/m ³)	Módulo de Elasticidade (Mpa)
B1	1,328	0,449	1755	2330
C1	1,265	0,441	1725	2181
A2	1,250	0,438	1710	2137
B2	1,236	0,439	1715	2119
C2	1,231	0,441	1721	2118
A3	1,301	0,442	1726	2245
B3	1,203	0,449	1752	2108
C3	1,245	0,438	1711	2130
A4	1,350	0,448	1750	2363
B4	1,362	0,439	17,133	2333
C4	1,379	0,445	1740	2400
A5	1,231	0,440	1718	2114
B5	1,208	0,426	1665	2010
C5	1,250	0,444	1734	2168
A6	1,199	0,421	1643	1969
B6	1,176	0,430	1681	1978
C6	1,260	0,432	1686	2124
A7	1,231	0,447	1748	2151
B7	1,203	0,452	1765	2123
C7	1,143	0,445	1740	1989
A8	1,280	0,443	1732	2217
B8	1,212	4,445	17362	2104
C8	1,212	4,447	17369	2105
A9	1,328	0,437	1707	2266
B9	1,301	0,442	1728	2247
C9	1,265	0,452	1764	2231
Média				2349
Desvio Padrão				222
CoV (%)				9,447

Tabela 18 – Valores da densidade, velocidade de propagação do som e do módulo de elasticidade dos provetes de argamassa

O valor médio do módulo de elasticidade foi de 2349 MPa com um coeficiente de variação de 9,447%, o que significa que houve uma pequena dispersão nos valores dos módulos de elasticidade obtidos ao longo do ensaio.

4.2.3. Ensaio de flexão em unidades de adobe

Para determinar a tensão de flexão dos blocos de adobe, realizaram-se ensaios de flexão recorrendo à norma *RILEM LUMA2 – Flexural strength of masonry units* [39].

Foram escolhidos 11 adobes para o ensaio, obtiveram-se as suas dimensões e foram pesados.

Tendo os adobes um rácio comprimento/altura maior do que 4:1, podem ser ensaiados sem nenhum tipo de preparação adicional. O ensaio pode ser realizado numa máquina de compressão e devem ser utilizadas barras metálicas cilíndricas com um diâmetro nominal entre 25 e 40 milímetros tanto para o suporte como para a aplicação da força. O seu comprimento deve ter no mínimo o comprimento dos blocos mais 10 milímetros. Os eixos das barras de suporte devem estar distanciados de 15 a 25 milímetros das faces do adobe e a barra que aplica a força deve estar centrada entre as outras barras. Somente uma das barras deve ter a rotação impedida.

O ensaio realizou-se utilizando um pórtico metálico em que estava acoplado um servo-atuador verticalmente. Esse atuador serviu para aplicar a força vertical descendente sobre os adobes para que pudesse ser realizado este ensaio. Foi utilizada uma célula de carga de carga de 25kN de forma a aferir com maior precisão a força aplicada aos adobes.

As barras metálicas que serviram como apoios tinham um diâmetro de 35 milímetros e tentou-se sempre colocar as barras inferiores o mais perto possível das laterais dos adobes, tendo sempre em conta a distância mínima permitida pela norma. Depois de colocados os adobes, procedeu-se á medição da distância entre as barras metálicas e conferiu-se que estas estariam paralelas entre si, aplicando-se de seguida a carga de flexão, sendo este procedimento visível na figura 25.

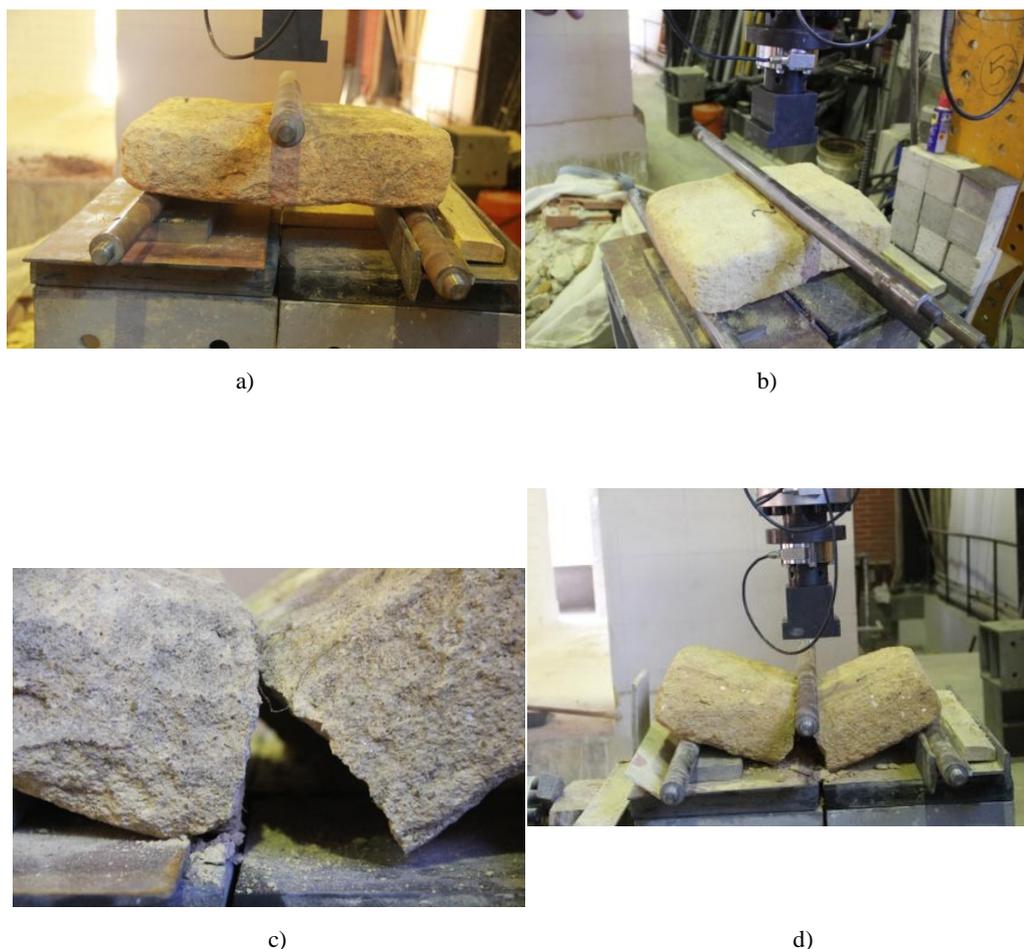


Figura 25 – Procedimento do ensaio: a) e b) Configuração do ensaio de flexão, c) Pormenor da rotura por flexão, d) Aspeto geral da rotura

O valor da tensão de flexão é obtido a partir da fórmula:

$$S = \frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times d^2} \quad [39]$$

Em que:

- P é a força máxima aplicada no bloco em Newton;
- L é a distância entre os eixos das barras de suporte em mm;
- b é a largura média do bloco na linha de fratura em mm;
- d é a altura média do bloco na linha de fratura em mm.

Os valores da tensão calculada apresentam-se na tabela 19.

Adobe	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Peso (kg)	Peso Volúmico (kN/m ³)	Tensão (Mpa)
1	100	400	300	20,42	17,363	0,533
2	100	405	295	20,72	17,697	0,555
3	90	405	295	19,66	18,657	0,715
4	95	405	310	21,70	18,565	0,858
5	95	405	300	18,20	16,070	0,505
6	100	405	300	20,94	17,58	0,621
7	110	440	335	27,24	17,143	-
8	100	445	325	27,04	19,078	0,859
9	90	395	275	19,26	20,103	-
10	105	440	320	25,72	17,752	0,708
11	100	425	300	24,24	19,400	1,239
Média					18,128	0,708
Desvio Padrão					1,154	0,230
CoV (%)					6,364	32,551

Tabela 19 – Distância entre os apoios inferiores e os valores das tensões de flexão

Os valores da tensão dos adobes 7 e 9 não foram contabilizados devido a terem sido muito inferiores relativamente aos restantes valores. Isso deveu-se ao facto de estes estarem fissurados anteriormente com fissuras que não tinham sido perceptíveis a olho nu antes de se ter realizado o ensaio sobre esses mesmos adobes. Assim sendo, a média calculada de 0,708 MPa provém das tensões dos restantes adobes ensaiados. Com a medição das massas dos blocos de adobe e com a medição das suas dimensões, foi possível calcular o peso volúmico médio, sendo este valor de 18,128 kN/m³.

De forma a complementar este estudo, recorreu-se à análise dos valores da tensão média num ensaio de flexão de unidades de adobe presente na dissertação de mestrado *Caracterização Material e Construtiva de Edifícios de Adobe em Aveiro* [7] de José Carvalho. Neste estudo, obtiveram-se valores de 0,66 MPa para a tensão de rutura para os adobes retirados de um edifício e 0,23 MPa para os adobes retirados de outro edifício diferente, havendo uma relativa proximidade entre a tensão de 0,66 MPa e a tensão de 0,708 MPa obtida na presente dissertação.

4.2.4. Ensaios de compressão em provetes de adobe

Foram realizados ensaios de compressão em provetes de adobe cortados diretamente a partir dos blocos de adobe utilizados no ensaio de flexão. Foi utilizada, como base para este ensaio, a norma *RILEM LUMA1 – Compressive strength of masonry units* [40].

Os provetes foram cortados em forma de cubo com uma medida aproximada de 9x9x9cm devido à altura mínima dos blocos de adobe ser de 9,5 cm. Estes foram cortados com um disco metálico arrefecido com água e posteriormente foram secos numa estufa a 60°C durante 24 horas para ser retirada toda a humidade adquirida durante o corte.

Após a secagem em estufa, os provetes foram retirados e deixados à temperatura ambiente para arrefecerem durante 24 horas.

O ensaio foi realizado numa prensa de marca ELE Multiplex 50-E. Para uma distribuição regular da carga de compressão aplicada foi utilizada areia molhada tanto na superfície superior como inferior de apoio dos provetes, sendo os apoios duas chapas metálicas, tendo a chapa superior uma massa de 4,127 kg. O ensaio foi realizado a uma velocidade de 1 mm/min, sendo este o valor mínimo permitido pela prensa e também tendo em conta a preservação da integridade dos provetes ao longo do ensaio até ao ponto de rotura. O setup do ensaio é apresentado na figura 26.



Figura 26 – Setup do ensaio de compressão

A medição do valor da carga de compressão aplicada é feita a partir da medição da deformação de um anel metálico de 50kN colocado na superfície superior do provete, tal como é apresentado na figura 26. A relação entre a deformação medida e a força aplicada é demonstrada pela equação $y = 23,11578x + 0,204115$, em que y é o valor da carga aplicada e

x é o deslocamento medido no anel metálico. A rotura deu-se sempre por fissuras verticais nas faces laterais dos provetes como é visível na figura 27.

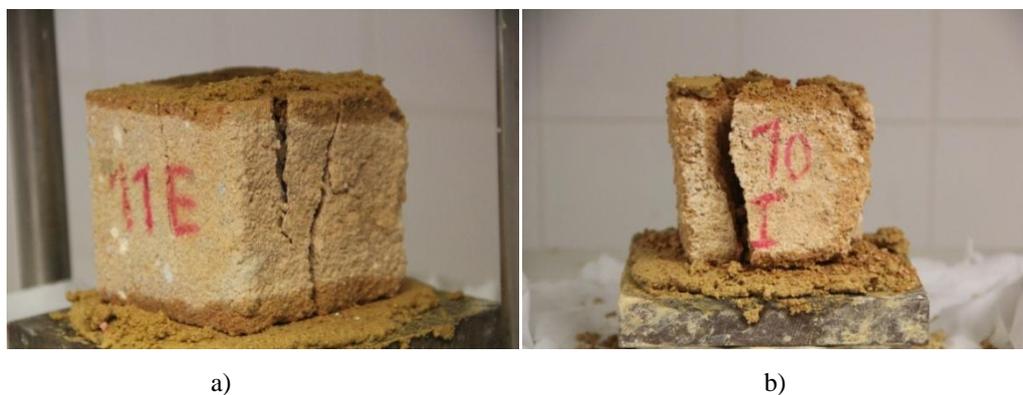


Figura 27 – Rotura no ensaio de compressão: a) no provete 11E; b) no provete 10I

Os valores medidos durante o ensaio e o valor correspondente calculado da carga de rotura aplicada são apresentados na tabela 20.

Provete	Deslocamento (mm)	Força (N)	Área (mm ²)	Tensão (Mpa)
5A	0,256	6162,24055	7225	0,853
5B	0,246	5931,08275	7650	0,775
5C	0,285	6832,59817	7225	0,946
5D	0,201	4890,87265	7225	0,677
5E	0,183	4474,78861	7225	0,619
5F	0,231	5584,34605	7650	0,730
6A	0,233	5630,57761	7650	0,736
6B	0,193	4705,94641	8100	0,581
6C	0,246	5931,08275	7650	0,775
6D	0,237	5723,04073	8100	0,707
6E	0,284	6809,48239	7225	0,942
6F	0,293	7017,52441	7650	0,917
6G	0,353	8404,47121	7225	1,163
6H	0,336	8011,50295	7225	1,109
7A	0,122	3064,72603	7225	0,424
7B	0,163	4012,47301	7650	0,525
7C	0,205	4983,33577	7225	0,690
7D	0,144	3573,27319	7225	0,495
7E	0,162	3989,35723	7200	0,554
7F	0,224	5422,53559	7650	0,709
7G	0,129	3226,53649	7650	0,422
7H	0,263	6324,05101	7650	0,827

Provete	Deslocamento (mm)	Força (N)	Área (mm ²)	Tensão (Mpa)
7I	0,18	4405,44127	7225	0,610
7J	0,086	2232,55795	7650	0,292
7K	0,142	3527,04163	8100	0,435
10A	0,161	3966,24145	7650	0,518
10B	0,185	4521,02017	7225	0,626
10C	0,22	5330,07247	8100	0,658
10D	0,183	4474,78861	8100	0,552
10E	0,26	6254,70367	8100	0,772
10F	0,301	7202,45065	8100	0,889
10G	0,223	5399,41981	7225	0,747
10H	0,256	6162,24055	8100	0,761
10I	0,187	4567,25173	7650	0,597
11A	0,512	12079,88023	7225	1,672
11B	0,709	16633,68889	8100	2,054
11C	0,525	12380,38537	8100	1,528
11D	0,521	12287,92225	7650	1,606
11E	0,695	16310,06797	8100	2,014
11F	0,663	15570,36301	8100	1,922
11G	0,426	10091,92315	7225	1,397
11H	0,35	8335,12387	8100	1,029
11I	0,578	13605,52171	7225	1,883
Média				0,901
Desvio Padrão				0,463
CoV (%)				51,347

Tabela 20 – Valores da tensão de compressão nos provetes cúbicos de adobe

O valor médio da tensão de compressão foi de 0,901 MPa, sendo que o coeficiente de variação foi de 51,347%, demonstrando a grande dispersão de tensões obtidas ao longo do ensaio.

Para se obter uma ideia comparativa do valor da tensão de compressão dos provetes, recorreu-se à análise da dissertação de mestrado *Caracterização Material e Construtiva de Edifícios de Adobe em Aveiro* [3], onde foram realizados igualmente ensaios de compressão de provetes cúbicos de adobe. Os valores obtidos para dois conjuntos de provetes obtidos de dois edifícios diferentes foram de 0,98 MPa e de 0,48 MPa, não havendo desfasamento entre estas tensões e a tensão média obtida nesta dissertação.

4.3. Análise mecânica

4.3.1. Ensaios de corte da norma EN 1052-3

Como já referenciado acima, este ensaio, representado pela norma EN 1052-3 [32], permite determinar a tensão resistente de juntas de argamassa a uma carga de corte.

Para a realização deste ensaio, foi preparado um pórtico metálico em que foram acoplados dois servo-atuadores hidráulicos, na posição vertical e horizontal, utilizados para aplicar as cargas normal e de corte respetivamente, como se pode verificar na figura 28.



Figura 28 – Configuração do pórtico e dos servo-atuadores para o ensaio

Na vertical foi colocado um servo-atuador de 300 kN que aplicou a carga normal sobre o murete e na horizontal foi utilizado um servo-atuador de 200 kN que exerceu a carga de corte sobre o adobe intermédio.

Para este ensaio foram construídos trinta muretes, sendo que para dez foi aplicada uma tensão normal de 0,1 MPa, para outros dez, uma tensão normal de 0,15 MPa e para os restantes dez, uma tensão normal de 0,2 MPa. A aplicação destas cargas permitiu simular o esforço que uma parede resistente de adobe sofre com o peso da cobertura, do primeiro andar e do rés-do-chão respetivamente, sendo que esse esforço é aplicado por todo o edifício existente superiormente a estes três níveis.

Devido à irregularidade das superfícies laterais dos muretes, foram usadas tábuas de madeira como apoios para a aplicação do esforço cortante. Nos primeiros ensaios foi aplicada terra molhada nas superfícies superior e inferior dos muretes para que a carga de compressão axial fosse distribuída igualmente. Verificou-se nos muretes iniciais algum esmagamento no

ponto de aplicação de carga de corte. Deste modo adotou-se a utilização de poliestireno extrudido tanto na aplicação do esforço axial como no esforço de corte, como evidenciado na figura 29, para permitir uma melhor distribuição de esforços pela superfície dos muretes, o que evitou o esmagamento localizado nas paredes. Optou-se também por abandonar a colocação de areia amassada com água na superfície inferior das paredes dada a superfície ser bastante regular, resultado da construção ter sido efetuada sobre a laje de piso do laboratório.

A aplicação tanto da carga normal como da carga de corte decorreu a uma velocidade de 0,1 mm/s, pois assim foi possível reduzir ao máximo o risco de esmagamento tanto dos muretes como dos adobes individualmente. Esta velocidade é também o valor mínimo aplicável pelo software que controla os servo-atuadores.



Figura 29 – Realização do ensaio com diferentes materiais na aplicação das cargas axial e de corte: a) carga axial com camada de areia molhada e carga de corte com uma tábua de madeira, b) cargas axial e de corte aplicadas com recurso a poliestireno extrudido

Os transdutores dos servo-atuadores utilizados para a realização destes ensaios fornecem os dados da força aplicada e do deslocamento. Sendo que os materiais utilizados nos apoios laterais dos muretes sofreram deformações, os dados os dados do deslocamento obtidos pelos transdutores não poderiam ser utilizados para se obter a deformação dos muretes ao esforço tangencial. A partir do ensaio do décimo sétimo murete, inclusive, foram aplicados sensores de deslocamento Rectilinear Displacement Transducer com 500 mm de curso da marca Gefran para que pudessem ser medidas as deformações reais de acordo com a figura 30. A colocação dos sensores inicia-se com a furação do murete e a fixação de varões roscados de 5 mm de diâmetro nos furos, com uma bucha química de cura rápida, permitindo a fixação dos transdutores nestes.



Figura 30 – Exemplo da disposição dos transdutores

O posicionamento dos varões permite que os transdutores de deslocamento meçam o deslocamento do adobe central relativamente aos outros dois adobes, determinando a deformação que a junta sofre ao longo do ensaio, tanto na fase pré-rotura como na fase pós-rotura. Com estes dados, torna-se possível saber a capacidade de deformação quando se atinge a carga máxima de corte. A aplicação dos transdutores só se realizou a partir do murete 17, sendo que não foi possível medir a deformação dos muretes 1 ao 16. A rotura dos muretes aconteceu sempre nas juntas de assentamento, tal como é visível na figura 31.



Figura 31 – Rotura das juntas de assentamento

O gráfico da figura 32 é representativo da relação típica entre a tensão e a deformação neste ensaio. A deformação atinge o seu máximo no ponto de tensão máxima, ou seja, no instante anterior à rotura a junta.

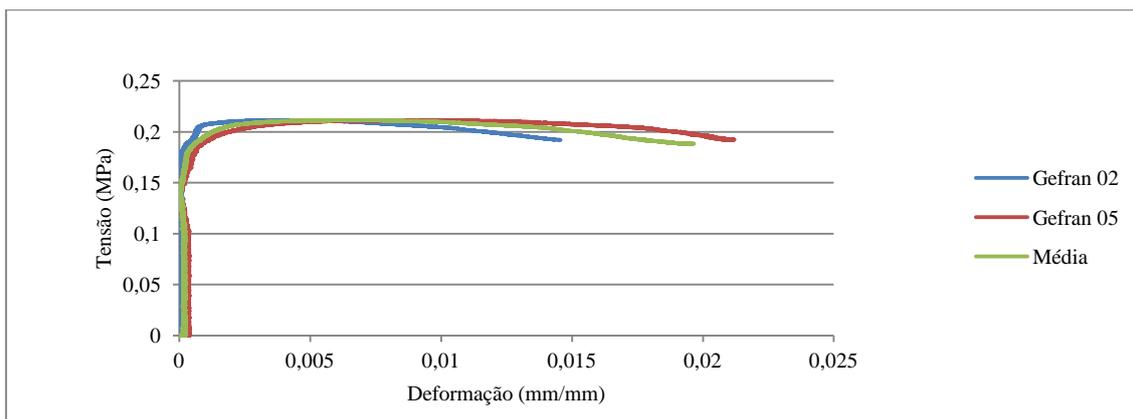


Figura 32 – Gráfico do ensaio do murete 29 da série de tensão normal de 0,2 MPa

Os valores da tensão máxima e deslocamentos médios obtidos nos ensaios são apresentados na tabela 21.

Tensão Axial (MPa)	Murete	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Área (mm ²)	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão	coV (%)	Deformação Média (mm/mm)	Desvio Padrão	coV (%)

Tensão Axial (MPa)	Murete	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Área (mm ²)	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão	coV (%)	Deformação Média (mm/mm)	Desvio Padrão	coV (%)
0,1	1	445	360	160200	0,166	-	0,139	0,023	16,465	-	-	-
	2	440	330	145200	0,116	-						
	3	445	320	142400	0,131	-						
	4	450	320	144000	0,129	-						
	5	450	360	162000	0,138	-						
	6	450	370	166500	0,185	-						
	7	440	330	145200	0,151	-						
	8	450	320	144000	0,136	-						
	9	440	325	143000	0,113	-						
	10	430	320	137600	0,120	-						
0,15	11	425	315	133875	0,156	-	0,199	0,022	11,172	0,008	0,007	83,286
	12	440	330	145200	0,236	-						
	13	450	340	153000	0,179	-						
	14	450	365	164250	0,201	-						
	15	450	325	146250	0,207	-						
	16	450	360	162000	0,198	-						
	17	430	325	139750	0,200	0,005						
	18	425	330	140250	0,189	0,016						
	19	430	330	141900	0,224	0,002						
	20	430	330	141900	0,202	0,002						
0,2	21	435	335	145725	0,147	0,008	0,221	0,031	13,811	0,007	0,003	46,451
	22	430	330	141900	0,238	0,004						
	23	430	300	129000	0,228	0,009						
	24	415	330	136950	0,209	0,011						
	25	440	330	145200	0,259	0,010						
	26	420	320	134400	0,236	0,002						
	27	420	330	138600	0,212	0,006						
	28	430	310	133300	0,245	0,006						
	29	450	330	148500	0,212	0,008						
	30	420	300	126000	0,227	0,003						

Tabela 21 – Valores da tensão média e da deformação média para a tensão de pico no ensaio de corte EN 1052-3

A partir da tabela 21 é então possível observar que para a série de tensão normal de 0,1 MPa foi obtida uma tensão tangencial média de 0,139 MPa, para a série de tensão normal 0,15 MPa foi obtida uma tensão tangencial média de de 0,199 MPa e uma deformação média de 0,0063 mm/mm e para a série de tensão normal 0,2 MPa foi obtida uma tensão média de corte de 0,221 MPa e uma deformação média de 0,007 mm/mm.

Utilizando os valores das diferentes tensões normais e das correspondentes tensões tangenciais médias, foi possível determinar uma regressão linear que permitisse calcular o

ângulo de atrito nas juntas de assentamento e também a tensão tangencial quando a tensão normal é nula, tal como se pode comprovar na figura 33.

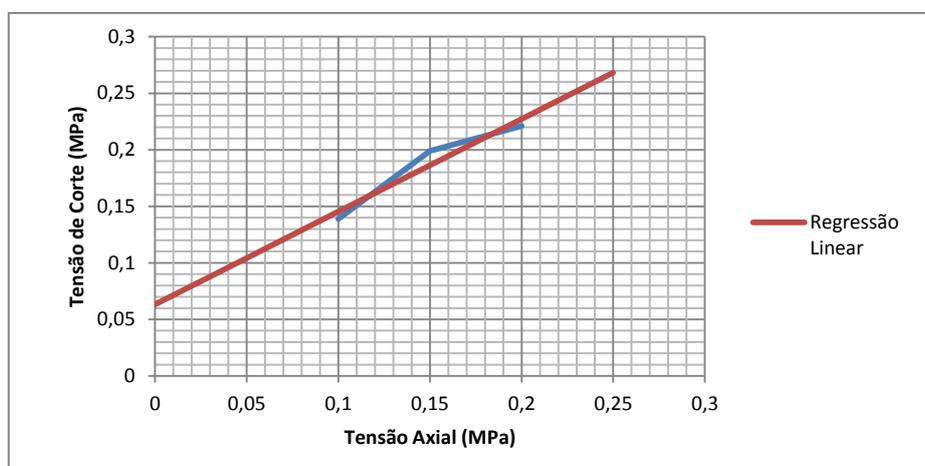


Figura 33 – Gráfico Tensão tangencial Vs. Tensão normal com correspondente regressão linear

A partir da regressão linear determinada, foi possível obter a sua equação correspondente, $y = 0,82x + 0,0633$, tendo sido a partir daqui determinados os valores obtidos na tabela 22.

Tensão axial em $x=0$ (MPa)	Tensão axial característica em $x=0$ (MPa)	Ângulo de atrito	Ângulo de atrito característico
0,063	0,051	39,352°	33,265°

Tabela 22 – Valores calculados a partir da equação da regressão linear

4.3.2. Ensaios de corte da norma RILEM LUMB5

A realização do ensaio de corte *RILEM LUMB5* [33], tal como o ensaio de corte segundo a EN 1052-3, permite determinar a tensão tangencial das juntas de argamassa de muretes, sendo que a diferença relativamente ao outro ensaio de corte se prende na disposição e tamanho dos blocos de adobe, tal como é visível na figura 36. Para este ensaio, os blocos de adobe foram cortados em metades e em quartos devido a questões logísticas da fase de ensaios. Foram construídos trinta muretes, tendo em dez sido aplicada uma tensão normal de 0,1 MPa, noutros dez 0,15 MPa e nos restantes dez 0,2 MPa.

Devido à irregularidade da superfície dos muretes, tal como é visível na figura 34, tiveram que ser usados pedaços de poliestireno extrudido para as cargas normal e tangencial serem distribuídas pelas superfícies de forma a evitar esmagamento localizado.

Após a construção dos muretes, foi atribuído um tempo de cura da argamassa de três meses até à realização dos ensaios.



Figura 34 – Exemplar de murete utilizado no ensaio de corte RILEM LUMB5

O pórtico utilizado para este ensaio foi o mesmo utilizado para o ensaio de corte EN 1052-3, tendo os servo-atuadores exatamente a mesma disposição.

A aplicação das cargas normal e tangencial foi realizada a uma velocidade de 0,1 mm/s para se evitar o esmagamento dos adobes, sendo esta a velocidade mínima permitida pelo software que controla os servo-atuadores.

Para a medição da deformação dos muretes foram utilizados sensores de deslocamento Rectilinear Displacement Transducer de 500 mm de curso da marca Gefran, como é visível na figura 35. A aplicação destes nos muretes foi possível após a sua furação e com a fixação de varões roscados com bucha química aos quais foram fixados os transdutores Gefran.



Figura 35 – Setup do ensaio

O ensaio decorre de uma forma geral de forma semelhante ao ensaio de corte EN 1052-3, sendo que a deformação da junta é obtida até ao ponto de rotura. A rotura aconteceu em todos os casos nas juntas de assentamento horizontais, como apresentado na figura 36.

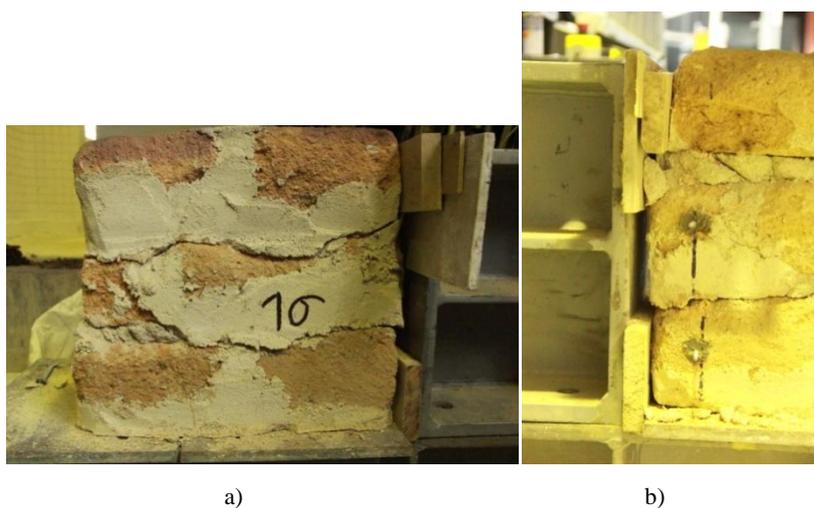


Figura 36 – Rotura do murete 16, da série 0,15 MPa: a) aspeto geral, b) pormenor da zona dos apoios laterais

Os gráficos obtidos a partir do ensaio, tal como no ensaio de corte EN 1052-3, demonstram a relação entre a tensão e a deformação ao longo do tempo, tal como é demonstrado na figura 37, sendo este gráfico representativo da evolução típica da relação tensão/deformação ao longo dos ensaios.

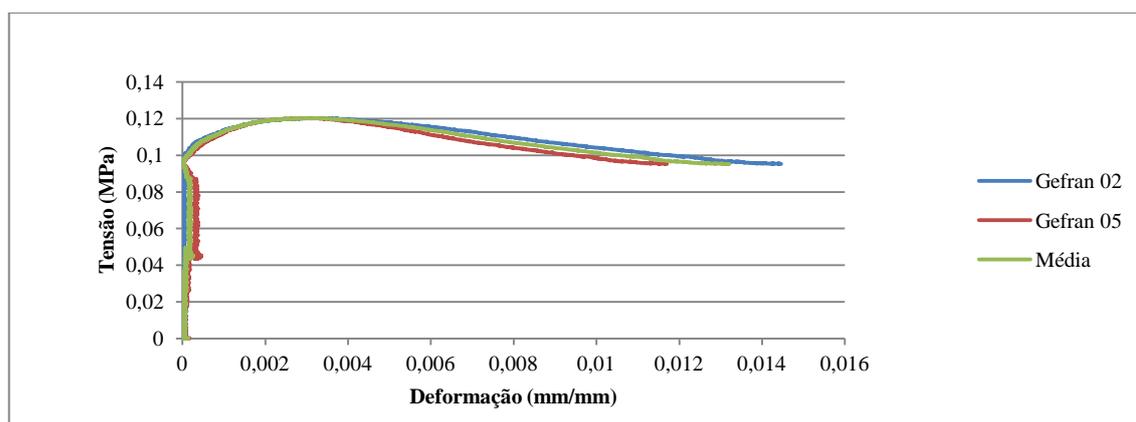


Figura 37 – Gráfico do ensaio do murete 4, da série de tensão normal de 0,1 MPa

Os valores das tensões e das deformações dos muretes são apresentados na tabela 23.

Tensão Axial (MPa)	Murete	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Área (mm ²)	Tensão (MPa)	Deformação (mm/mm)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão	coV (%)	Deformação Média (mm/mm)	Desvio Padrão	coV (%)
0,1	1	475	345	163875	0,149	0,001	0,144	0,015	10,377	0,006	0,004	66,099
	2	440	305	134200	0,132	0,010						
	3	445	325	144625	0,124	0,005						
	4	440	300	132000	0,120	0,003						
	5	420	305	128100	0,138	0,009						
	6	410	310	127100	0,160	0,003						
	7	425	260	110500	0,154	0,011						
	8	430	300	129000	0,150	0,003						
	9	460	310	142600	0,150	0,010						
	10	450	280	126000	0,165	0,003						
0,15	11	425	330	140250	0,204	0,004	0,188	0,013	6,960	0,007	0,004	62,299
	12	440	310	136400	0,194	0,011						
	13	450	320	144000	0,164	0,010						
	14	430	320	137600	0,197	0,001						
	15	415	310	128650	0,184	0,012						
	16	440	290	127600	0,171	0,001						
	17	440	330	145200	0,191	0,011						
	18	450	340	153000	0,191	0,009						
	19	430	300	129000	0,204	0,006						
	20	440	340	149600	0,183	0,005						
0,2	21	465	340	158100	0,220	0,003	0,224	0,022	9,874	0,012	0,007	56,527
	22	440	320	140800	0,222	0,010						
	23	440	310	135400	0,260	0,007						
	24	420	300	126000	0,186	0,013						
	25	450	310	139500	0,218	0,015						
	26	450	330	148500	0,256	0,024						
	27	455	330	150150	0,218	0,020						
	28	460	310	142600	0,238	0,011						
	29	465	335	155775	0,212	0,008						
	30	440	335	147400	0,209	0,004						

Tabela 23 - Valores da tensão média e da deformação média no ensaio de corte EN 1052-3

A partir da tabela 23 é então possível observar que para a série de tensão normal de 0,1 MPa foi obtida uma tensão tangencial de corte de 0,144 MPa e uma deformação média de 0,006 mm/mm, para a série de tensão normal 0,15 MPa foi obtida uma tensão tangencial média de 0,188 MPa e uma deformação média de 0,007 mm/mm e para a série de tensão

normal de 0,2 MPa foi obtida uma tensão tangencial média de 0,224 MPa e uma deformação média de 0,012 mm/mm.

4.3.3. Ensaio de arrancamento de adobes segundo a norma RILEM LUMB3

Para a realização do ensaio de corte *RILEM LUMB3* [34], foram construídos três muretes com quinze adobes cada um, sendo que entre a construção e o ensaio houve um intervalo de três meses para proporcionar a cura da argamassa de assentamento.

Para se proceder ao ensaio, foi necessário construir um sistema de alavanca ajustável ao tamanho dos adobes e que tivesse uma rigidez suficiente para não sofrer grandes deformações na aplicação da carga de arrancamento.

Os muretes tiveram que ser construídos diretamente em cima da laje de piso, sendo que devido à impossibilidade de ser realizado o ensaio com a altura de 11 adobes, foram adicionados 4 adobes que serviram como apoio para haver altura suficiente para ser montado o sistema de alavanca com o balde na extremidade onde ia ser colocada a carga.

O sistema utilizado continha duas chapas metálicas com quinze milímetros de espessura, um grampo, um bloco de madeira e um perfil de alumínio. As chapas foram colocadas nas faces laterais de maior comprimento do bloco superior do murete, sendo que o grampo foi utilizado para comprimir as chapas contra o adobe e para prender o perfil de alumínio a uma das chapas metálicas. Por último, o bloco de madeira foi utilizado para colocar na superfície superior do adobe de forma a apoiar o perfil metálico para não haver demasiada deformação na aplicação da carga. A disposição do ensaio pode ser demonstrada na figura 38.



Figura 38 – Sistema de alavanca de arrancamento: a) Pormenor do sistema, b) Vista geral

Foi determinada a massa de todas as peças pertencentes ao sistema de alavanca. Depois de montado o sistema de alavanca, colocou-se areia dentro do balde a um ritmo lento para garantir que a carga não é aplicada de forma abrupta. Após a rotura por arrancamento, foi determinada a massa do balde com a areia, a massa do adobe arrancado juntamente com a argamassa e também as medidas da superfície de rotura, tal como é demonstrado na figura 39.

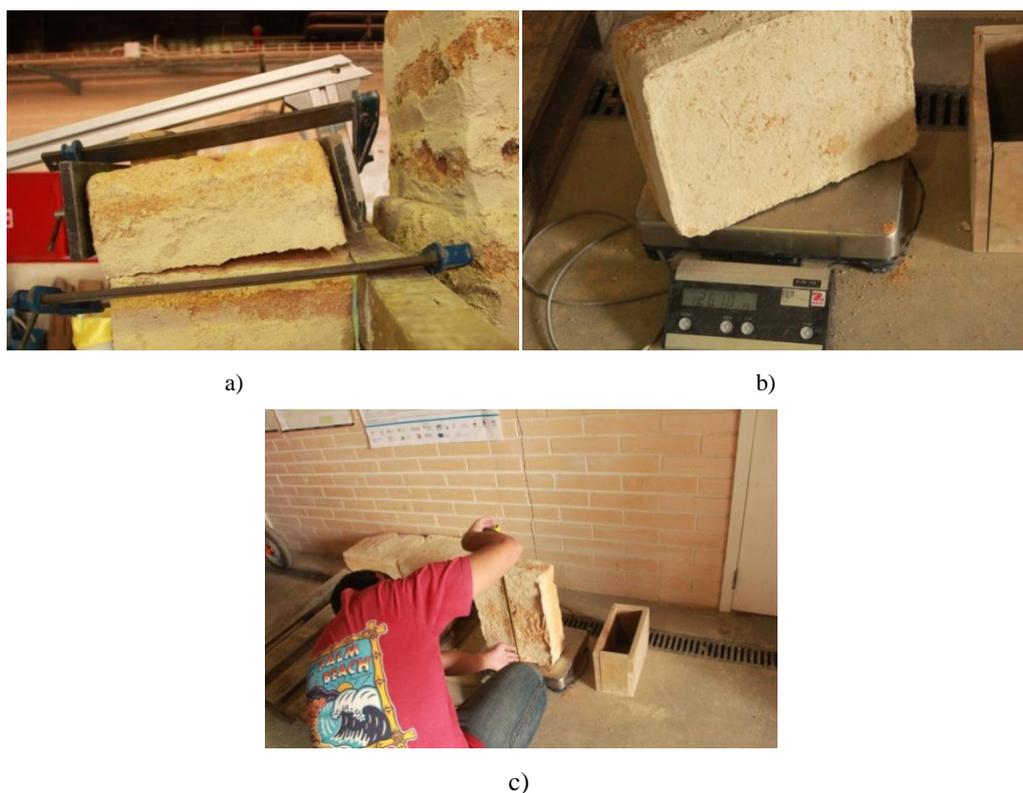


Figura 39 – Procedimento do ensaio: a) Adobe arrancado, b) Determinação da massa do adobe, c) Medição da superfície de rotura

Com base nos dados obtidos foi calculada a tensão de arrancamento, sendo os valores apresentados na tabela 24.

	Adobe	Massa do balde com areia (Kg)	Massa do adobe arrancado (Kg)	Largura da superfície de rotura (mm)	Comprimento da superfície de rotura (mm)	Tensão de arrancamento (MPa)	Tensão média de arrancamento de cada parede (MPa)
PAREDE 1	Adobe 1	-	-	-	-	-	0,038
	Adobe 2	30,2	30,4	305	430	0,063	
	Adobe 3	25,44	26,1	310	410	0,054	
	Adobe 4	13,46	26,76	310	415	0,029	
	Adobe 5	22,28	28,76	310	420	0,046	
	Adobe 6	5,82	29,22	308	420	0,013	
	Adobe 7	9,72	31,5	310	420	0,020	
	Adobe 8	19,92	56,98	315	420	0,038	
	Adobe 9	-	-	-	-	-	
	Adobe 10	12,7	30,22	335	415	0,022	
	Adobe 11	24,88	52,9	300	395	0,057	
PAREDE 2	Adobe 1	33,76	68,66	325	435	0,058	0,060
	Adobe 2	-	-	-	-	-	
	Adobe 3	-	-	-	-	-	
	Adobe 4	45,9	37,7	330	460	0,075	
	Adobe 5	53,52	37,78	330	435	0,093	
	Adobe 6	18,72	32,8	345	430	0,030	
	Adobe 7	-	-	-	-	-	
	Adobe 8	-	-	-	-	-	
	Adobe 9	49,1	170,42	330	430	0,077	
	Adobe 10	16,86	32,52	340	430	0,028	
	Adobe 11	-	-	-	-	-	
PAREDE 3	Adobe 1	26,7	32,74	335	420	0,046	0,038
	Adobe 2	14,04	31,84	325	415	0,026	
	Adobe 3	30,08	32,92	335	435	0,050	
	Adobe 4	14,96	29,32	335	440	0,025	
	Adobe 5	26,42	30,42	320	440	0,049	
	Adobe 6	10,02	30,56	330	440	0,017	
	Adobe 7	14,5	34,02	335	425	0,025	
	Adobe 8	14,68	34,96	335	425	0,025	
	Adobe 9	33,54	32,14	335	435	0,056	
	Adobe 10	34,26	70,66	330	440	0,056	
	Adobe 11	23,8	33,84	330	435	0,041	
	Média Total					0,043	
	Desvio padrão					0,020	
	CoV (%)					46,712	

Tabela 24 – Valores das massas do balde e dos adobes, das medidas da superfície de rotura e da tensão de arrancamento

A partir dos dados extraídos na tabela 24, as tensões médias de cada parede foram de 0,038 MPa para a parede 1, 0,060 MPa para a parede 2 e 0,038 para a parede 3. A tensão média de arrancamento total foi de 0,043 MPa, sendo que o coeficiente de variação foi de 46,712%, demonstrando assim a grande dispersão de valores de tensões obtidas ao longo do ensaio, possivelmente devido tanto à irregularidade das superfícies dos adobes como à cura da argamassa que pode ter ocorrido a velocidades diferentes para cada junta.

Durante o ensaio ocorreram algumas situações em que o arrancamento não ocorreu pelo adobe superior, mas sim por adobes que se situavam por baixo deste, ou seja, foram arrancados mais do que um adobe simultaneamente.

No caso do arrancamento do adobe 8 da primeira parede, em que o adobe 9 foi arrancado juntamente com o adobe 8, tendo o mesmo acontecido no arrancamento do adobe 1 da segunda parede, tal como se pode verificar na figura 40. Nestas situações, mediu-se a massa do balde com a areia que provocou o arrancamento e depois a massa dos dois blocos de adobe que foram arrancados.



Figura 40 – Arrancamento dos adobes 8 e 9 na parede 1

No caso do adobe 5 da segunda parede, o arrancamento deu-se pela junta inferior do adobe 9. Posteriormente foi possível fixar o adobe 6 e fazer o arrancamento do adobe 5 e de seguida foi possível também fazer o arrancamento do adobe 6, tendo sido o procedimento da obtenção das massas e das medidas das superfícies de rotura realizado de forma normal. Relativamente aos adobes 7 e 8, pelo facto das juntas terem ficado danificadas, foram retirados manualmente e foram obtidas as massas dos adobes 5 ao 9, tendo a sua massa total

sido medida e utilizada para calcular a tensão de arrancamento de todo o conjunto de adobes inicial.

Por último, no arrancamento do adobe 9 da terceira parede, a rotura aconteceu pela junta inferior do adobe 10. Visto que posteriormente foi possível fixar o adobe 10 aos adobes inferiores, procedeu-se ao arrancamento do adobe 9 individualmente, tendo sido depois colocado na balança para ser medida a sua massa e ser calculada a sua tensão de arrancamento. De seguida, foi também medida a massa do adobe 10 e somada ao adobe 9 para ser possível calcular a tensão de arrancamento do conjunto dos dois adobes.

5. CONCLUSÕES

O trabalho realizado nesta dissertação teve como objetivo a realização de um estudo de caracterização do comportamento mecânico de paredes de alvenaria em adobe, em que o foco incidiu principalmente na interface entre os blocos de adobe e a argamassa de assentamento. Para este estudo ser possível, foi necessário realizar uma análise dos materiais constituintes das paredes (argamassa e adobe), tendo sido realizado um conjunto de ensaios sobre estes dois materiais. Após este estudo da caracterização dos materiais, procedeu-se ao estudo do comportamento mecânico das paredes de alvenaria em adobe, tendo sido construídos provetes de adobe para a realização de dois ensaios de corte da interface entre os blocos de adobe e a junta de argamassa e que se determinou a tensão tangencial resistente e a realização de um ensaio de arrancamento, em que foi possível determinar a resistência ao arrancamento entre os blocos de adobe e a argamassa das juntas.

É de ressaltar as dificuldades na construção destes provetes de adobe devido à elevada massa dos blocos e também à ausência de maquinaria, sendo todo o trabalho de construção artesanal e com mão-de-obra não especializada.

Nos ensaios de caracterização material foram realizadas granulometrias da areia e da terra constituintes da argamassa fabricada para as juntas, sendo que tanto a areia como terra foram caracterizadas como areias grossas. Foram também realizados provetes de argamassa em que foi determinado o módulo de elasticidade, sendo o valor médio de 2349 MPa. Foram igualmente realizados ensaios de flexão e de compressão, sendo as tensões respetivas de 0,309 MPa e 0,720 MPa. Após a realização destes ensaios, foi realizado um teste de Fenolftaleína em que se pode comprovar o já esperado aumento da profundidade de carbonatação dos provetes conforme o seu tempo de cura.

Para a caracterização material dos adobes, foram realizados ensaios de flexão de blocos de adobe e ensaios de compressão de provetes cúbicos de adobe. A tensão média resultante na flexão foi de 0,709 MPa e a tensão média de compressão foi de 0,901 MPa.

Nos ensaios de caracterização mecânica, foram realizados os ensaios de corte segundo a norma EN 1052-3 e RILEM LUMB5 e o ensaio de arrancamento. Relativamente ao ensaio de corte segundo a norma EN 1052-3, a tensão tangencial média obtida para uma tensão normal de 0,1 MPa foi de 0,139 MPa, não sendo possível obter a deformação real dos provetes devido a não terem sido aplicados sensores de deslocamento. Para a tensão normal de 0,15 MPa foi obtida uma tensão tangencial de 0,199 MPa, sendo que dos 10 provetes ensaiados para esta

tensão normal, foram montados sensores de deslocamento em 3, resultando numa deformação média de 0,0087 mm/mm. Para a tensão normal de 0,2 MPa, a tensão tangencial média foi de 0,221 MPa, sendo a deformação correspondente de 0,007 mm/mm. Para o ensaio de corte segundo a norma RILEM LUMB5 e para uma tensão normal de 0,1 MPa, a tensão tangencial correspondente foi de 0,144 MPa com uma deformação média de 0,006 mm/mm. Para uma tensão normal de 0,15 MPa, a tensão tangencial correspondente foi de 0,188 MPa com uma deformação média de 0,007 mm/mm e para a tensão normal 0,2 MPa, a tensão tangencial média foi de 0,224 MPa com uma deformação média de 0,012 mm/mm.

Estes valores estão suscetíveis de conter erros devido ao facto do corte nas juntas de assentamento se ter dado em momentos diferentes na esmagadora maioria dos provetes. Nestes termos, é possível justificar os valores elevados da percentagem do coeficiente de variação relativo às deformações e também é possível ressaltar que a tensão tangencial máxima obtida em cada provete não corresponde ao valor que se esperaria caso a rotura se desse simultaneamente nas duas interfaces.

Relativamente ao ensaio de arrancamento, o valor médio da tensão foi de 0,043 MPa, sendo que o valor elevado do coeficiente de variação correspondente permite concluir que houve uma relevante diferença na capacidade resistente de cada interface submetida a essa tensão.

6. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Devido ao facto do estudo das características mecânicas da interface entre o adobe e a junta de assentamento, com os ensaios realizados na presente dissertação, se encontrar ainda numa fase inicial, propõe-se que sejam realizados mais ensaios, tanto de corte segundo as duas normas mencionadas no presente documento, como de arrancamento. Devido às possíveis variáveis que causaram a grande dispersão nos valores das tensões tangenciais e nas deformações no caso dos ensaios de corte, sugere-se que as superfícies de apoio laterais dos provetes sejam retificadas para que a rotura de ambas as juntas de assentamento suceda simultaneamente, permitindo assim que os valores das tensões tangenciais e das deformações sejam realistas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **Martins, H. (2009).** *Caracterização Mecânica e Patológica das Alvenarias de Adobe de Aveiro*. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal. Tese de Mestrado.
- [2] **Rufo, R. (2010).** *Ensaio de Caracterização Mecânica das Alvenarias de Adobe: Flat-jack Testing*. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal. Tese de Mestrado.
- [3] **Carvalho, J. (2011).** *Caracterização Material e Construtiva de Edifícios de Adobe em Aveiro*. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal. Tese de Mestrado.
- [4] **Pereira, H. (2008).** *Caracterização do Comportamento Estrutural de Construções em Adobe*. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal. Tese de Mestrado.
- [5] **Claude, S., Varum, H., Lobo, B. e Costa, A. (2013).** *Contribution to the mechanical characterization of adobe masonry walls*. International Conference of Vernacular Heritage & Earthen Architecture. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal e CRATERRE ENSAG, DSA Terre, Grenoble, França.
- [6] Auroville Earth Institute - UNESCO Chair Earth Institute. Disponível em http://www.earth-auroville.com/world_techniques_introduction_en.php em 2 de Dezembro de 2013.
- [7] **Fernandes, M. (2006).** *Técnicas de Construção em Terra*. 10ª Mesa Redonda de Primavera – Terra: Forma de Construir. Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Porto.
- [8] **Moreira, A. M. (2008).** *Terra Crua*. Escola Superior de Engenharia de Tomar.

- [9] **Almeida, H. (2011).** *Análise do Comportamento de Estruturas em Alvenaria de Adobe.* Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal. Tese de Mestrado.
- [10] **Costa, A., Varum, H., Arêde, A., Costa, A. A., Pereira, H., Silveira, D., Rodrigues, H. e Vicente, R.** *Caracterização do Comportamento Estrutural de Adobes e de Paredes de Alvenaria de Adobe.* Revista Construir, Workmedia, Ano V, Número 123, pp. 22-25, Abril de 2008.
- [11] **Almeida, J. (2012).** *Mechanical Characterization of Traditional Adobe Masonry Elements.* Universidade do Minho.
- [12] **Gonçalves, T. e Gomes, M. I. (2012).** *Construção de Terra Crua: Potencialidades e Questões em Aberto.* Jornadas de Investigação e Inovação. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- [13] Flickr. Disponível em <http://www.flickr.com/photos/27941207@N02/3306145998/> em 2 de Dezembro de 2013.
- [14] **Carvalho, J., Pinto, J., Varum, H., Jesus, A., Lousada, J. e Morais, J. (2009).** *Construções em Tabique na Região de Trás-os-Montes e Alto Douro.* Departamento de Engenharias, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.
- [15] Olhares - Fotografia Online. Disponível em <http://olhares.sapo.pt/tabique-foto4471478.html> em 2 de Dezembro de 2013.
- [16] **Azevedo, H. (2010).** *Reforço de Estruturas de Alvenaria de Pedra, Taipa e Adobe com Elementos de Madeira Maciça.* Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- [17] InMaricopa. Disponível em <http://www.inmaricopa.com/Article/2012/06/12/cac-campus-construction-rammed-earth-technology-ancient> em 2 de Dezembro de 2013.

- [18] **Varum, H., Costa, A., Pereira, H. e Almeida, J. (2006).** *Comportamento Estrutural de Elementos Resistentes em Alvenaria de Adobe*. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- [19] **Varum, H., Costa, A., Silveira, D., Oliveira, C., Figueiredo, A. (2010).** *Caracterização Mecânica e Reforço de Construções em Alvenaria de Adobe*. Sísmica 2010 – 8º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- [20] Wikipedia – Casa Major Pessoa. Disponível em http://pt.wikipedia.org/wiki/Casa_do_Major_Pessoa em 2 de Dezembro de 2013.
- [21] Wikipedia - Lista de património edificado no distrito de Aveiro. Disponível em http://pt.wikipedia.org/wiki/Anexo:Lista_de_patrim%C3%B3nio_edificado_no_distrito_de_Aveiro#Concelho_de_Aveiro em 2 de Dezembro de 2013.
- [22] **Varum, H., Costa, A., Pereira, H., Almeida, J. e Rodrigues, H. (2008).** *Caracterização do Comportamento Estrutural de Paredes de Alvenaria em Adobe*. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- [23] **Costa, A., Varum, H., Silveira, D., Tavares, A. e Figueiredo, A. (2012).** *Process of Rehabilitation and Strengthening of Earth Constructions – Seismic Concerns*. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- [24] RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials. E&FN Spon. UK. 1994.
- [25] **Silveira, D., Varum, H., Costa, A., Martins, T., Pereira, H. e Almeida, J. (2012).** *Mechanical Properties of Adobe Bricks in Ancient Constructions*. Construction and Building Materials Vol. 28, Pag. 36-44.
- [26] NP 1379 (1376): *Inertes para argamassas e betões: Análise granulométrica*. Instituto Português da Qualidade.
- [27] RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of

Construction Materials (1994). CPC4: *Compression test on concrete* (1975) TC14-CPC.

[28] RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials (1994). CPC6: *Tension by splitting of concrete specimens* (1975) TC14-CPC.

[29] prEN 15801:2008: *Conservation of cultural property - Test methods - Determination of absorption by capillarity*.

[30] NMAC 14.7.4. 2003: “New Mexico Earthen Building Materials Code”, Santa Fé, NM: Construction Industries Division (CID) of the Regulation and Licensing Department 2004.

[31] NZS 4297 (1998): *Engineering design of earth buildings*. Standards Council. New Zealand.

[32] NP EN 1052-3: *Methods of test for masonry – Part 3: Determination of initial shear strength*. European Committee for Standardization. Brussels. 2002.

[33] RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials (1994). LUMB5: *Short-term shear test for the interface between the masonry unit and mortar or moisture-insulating interlayer* (1991) TC 76-LUM.

[34] RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials (1994). LUMB3: *Bond strength of masonry using the bond wrench method* (1991) TC 76-LUM.

[35] NP EN 933-1: *Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method*. European Committee for Standardization. Brussels. 2002.

[36] EN 1015-11: *Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. European Committee for Standardization. Brussels. 1999.

[37] LNEC E391: Determinação da resistência à carbonatação. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa. 1993.

[38] Ultrasonic Pulse Velocity Testing: Technical Reference Manual. CNSFarnell. Borehamwood, Hertfordshire. 2004.

[39] RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials (1994). LUMA2: Flexural strength of masonry units (1991) TC 76-LUM.

[40] RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials (1994). LUMA1: Compressive strength of masonry units (1991) TC 76-LUM.