



Inês Morgado Dias

Licenciada em Ciências da Engenharia Civil

Desenvolvimento e Caracterização de Argamassas de Cal Aérea e Terra

A Influência da Terra como Agregado Parcial

Dissertação para obtenção do Grau Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientadora: Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues, Professora Associada,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professor Doutor Daniel Aelenei

Arguente: Doutora Maria do Rosário da Silva Veiga

Vogal: Professora Doutora Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Maio de 2013

Desenvolvimento e Caracterização de Argamassa de Cal Aérea e Terra – A Influência da Terra como Agregado Parcial

‘Copyright’ Inês Morgado Dias, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Finalizada esta importante etapa da minha vida, quero agradecer a todas as pessoas que, de uma forma ou de outra, me ajudaram e apoiaram ao longo deste caminho.

Um especial agradecimento à minha orientadora científica Professora Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues, pela sua disponibilidade, orientação, auxílio e enorme partilha de conhecimentos desde o primeiro dia. A si devo também a sugestão do tema do trabalho e o incentivo para o desenvolver.

Ao Engenheiro Vítor Silva, quero agradecer todo o apoio incansável que me prestou, quer durante a campanha experimental, quer mais tarde, contribuindo para um melhor desenrolar desta tese. Um obrigado também à disponibilidade, simpatia e amizade demonstradas.

Agradeço também à Mestre Idália Gomes e à Sorgila pela disponibilização da terra, à Lusical pela disponibilização da cal aérea e ao projeto LIMECONTECH pelo apoio à campanha experimental.

À minha colega Naila Jamú, que trabalhou a meu lado durante este longo trajeto, incluindo todos os cinco anos de curso. Sem ela, tudo teria sido mais difícil. Nós caminhamos juntas este percurso desde os primeiros dias de faculdade até ao último e, assim, vai ser por muito tempo.

Ao meu namorado e também colega de curso Pedro Santos, pelo apoio e conselhos que me prestou, não só durante a realização deste trabalho mas também fora da vida académica. A sua amizade, carinho e companheirismo certamente que me ajudaram a percorrer esta etapa.

Aos colegas de curso Teresa Fontes, Cátia Abreu e Duarte Vargas pela disponibilidade, amizade e partilha de conhecimentos quer em fase experimental como em fase posterior.

Quero agradecer tanto aos amigos de longa data como aos amigos de faculdade, que durante todo o meu percurso académico, me ajudaram e apoiaram. A todos, um enorme obrigado, quer por momentos de estudo e trabalho, quer por não menos importantes momentos de diversão e convívio.

Por fim, mas acima de todos, agradeço a toda a minha família, especialmente aos meus pais Teresa e António, e irmã, Joana. Particularmente aos meus pais que mostraram sempre uma enorme compreensão, que me apoiaram incondicionalmente e estiveram sempre do meu lado. Sem eles nada disto era possível.

Resumo

Grande parte das construções antigas, nomeadamente de terra ou de alvenaria argamassada, necessitam de intervenção, principalmente ao nível dos revestimentos exteriores. Muitas construções recentes também necessitam de ser corretamente intervencionadas. A utilização da terra como material de construção caiu em desuso mas felizmente está a ser renovada, sendo considerada uma resposta possível para a sustentabilidade na construção. De forma a credibilizar a utilidade deste material, nas últimas décadas têm-se aprofundado os conhecimentos sobre este tema. No entanto, há ainda um longo caminho a percorrer no que se refere à utilização, antigamente muito corrente, de terra argilosa em argamassas de cal aérea.

Nessa linha de investigação a presente dissertação avalia a influência da introdução de terra argilosa em argamassas de cal aérea. As argamassas produzidas neste estudo são argamassas de cal aérea e uma mistura de areias lavadas de granulometrias distintas, ao traço volumétrico 1:3, em que se substituem determinadas percentagens de areia fina por terra argilosa. Estas substituições em massa são de 5, 10, 15 e 25 %. Realizaram-se ensaios de caracterização nas argamassas em estado fresco e em estado endurecido (28 e 90 dias), sobre provetes distintos condicionados em laboratório (prismáticos e em tijolo furado corrente) e sobre um reboco aplicado num murete de taipa em condições de exposição natural.

Os resultados dos ensaios realizados revelam que a trabalhabilidade das argamassas diminui com o aumento da percentagem de terra argilosa, assim como as propriedades mecânicas. Relativamente ao comportamento face à água, as argamassas com maior teor de terra apresentam maior capacidade de absorção de água e também maior dificuldade em secar. No entanto as características obtidas com percentagens intermédias de terra indiciam ser particularmente interessantes para aplicações em reboco, como é verificado pela aplicação no murete em condições reais de exposição. Com base na caracterização efetuada, este tipo de argamassas estudadas apresentam viabilidade técnica e ao nível da sustentabilidade.

Termos chave: Terra; Argamassa; Cal Aérea Hidratada; Reabilitação; Taipa; Caracterização

Abstract

Many ancient buildings, namely the ones earthen made, need intervention, mainly at external rendering. Most of recent buildings also need to be properly intervened. Earth as building material felt in use but fortunately it is been renewed, being considered a possible answer to sustainability of construction. In the way to improve credibility of this material, during last decades there is going deep in the knowledge about this matter. However, there is still a long way to go in which refers to the use, very common several years ago, of air lime mortar.

In this way of research, present work evaluates the influence of clayish earth in air lime mortar. The mortars produced in this study are air lime mortar and a mix of washed sands from several sizes at volumetric rate of 1:3 in which certain rates of fine sand are replaced by earth. These replacements were 5, 10, 15 and 25%. Trials were made for characterization of mortars in fresh and in hard stages (28 and 90 days), over different samples (prismatic and applied over perforated bricks) stored in lab and over a rendering applied on a wall of rammed earth in conditions of external exposition.

Trials results show that mortar workability decrease with the increase of earth, as well as mechanical properties. In which refers behaviour in face of water, mortars with highest rates of earth showed highest capacity to water absorption and more difficulty to dry. Nevertheless, the characteristics obtained with intermediate rates of earth gave an indication that they can be particularly interesting for uses as renderings, as shown by rendering applied on the wall in the trial, exposed to real weather conditions. Taking into account the characterization that has been made, these type of evaluated mortars showed viability, not only from the technical point of view, but as well as from sustainability sides.

Keywords: Earth, Mortar, Hydrated Air Lime; Rehabilitation; Rammed Earth; Characterization

Índice de Texto

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução | 1 |
| 1.1 | Enquadramento do Tema | 1 |
| 1.2 | Objetivos e Metodologia..... | 1 |
| 1.3 | Estrutura da Dissertação..... | 2 |
| 2 | Estado do Conhecimento | 5 |
| 2.1 | A Terra como Material de Construção | 5 |
| 2.2 | Construções em Terra em Portugal | 7 |
| 2.2.1 | Paredes de Taipa..... | 8 |
| 2.2.2 | Paredes de Adobe | 9 |
| 2.3 | Argamassas Correntes | 9 |
| 2.3.1 | Ligantes..... | 10 |
| 2.3.2 | Agregados..... | 10 |
| 2.3.3 | Adições e Adjuvantes | 10 |
| 2.3.4 | Água..... | 10 |
| 2.4 | Exigências Funcionais das Argamassas | 11 |
| 2.5 | Argamassas de Cal Aérea | 15 |
| 2.6 | Argamassas de Terra..... | 17 |
| 2.7 | Argamassas de Cal Aérea e Terra | 18 |
| 3 | Planeamento da Campanha Experimental | 19 |
| 3.1 | Introdução | 19 |
| 3.2 | Etapas da Campanha Experimental | 20 |
| 3.2.1 | Caracterização dos Suportes..... | 20 |
| 3.2.2 | Caracterização dos Constituintes das Argamassas | 21 |
| 3.2.3 | Ensaio às Argamassas em Estado Fresco | 21 |
| 3.2.4 | Caracterização das Argamassas em Estado Endurecido | 22 |
| 4 | Constituintes, Argamassas e Provetes | 23 |
| 4.1 | Constituintes das argamassas..... | 23 |
| 4.1.1 | Agregados Principais: Areias..... | 23 |
| 4.1.2 | Agregado Parcial: Terra..... | 24 |
| 4.1.3 | Cal Aérea | 25 |
| 4.1.4 | Água..... | 26 |
| 4.2 | Argamassas – Traços e Quantidades..... | 26 |
| 4.3 | Produção e Preparação dos Provetes | 27 |
| 4.3.1 | Amassadura | 28 |
| 4.3.2 | Prismas de Argamassa..... | 29 |
| 4.3.3 | Aplicação em Tijolo | 30 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 4.3.4 | Aplicação em Taipa | 31 |
| 4.4 | Condições de Ambiente da Cura | 33 |
| 5 | Procedimentos de Ensaios de Caracterização..... | 35 |
| 5.1 | Caracterização dos Suportes..... | 35 |
| 5.1.1 | Tijolo Furado | 35 |
| 5.1.1.1 | Condutibilidade Térmica | 35 |
| 5.1.1.2 | Absorção de Água sob Baixa Pressão – Tubos de Karsten..... | 35 |
| 5.1.2 | Murete de Taipa | 36 |
| 5.1.2.1 | Condutibilidade Térmica | 37 |
| 5.1.2.2 | Dureza Superficial - Durómetro | 37 |
| 5.1.2.3 | Dureza Superficial - Esclerómetro | 37 |
| 5.1.2.4 | Absorção de Água sob Baixa Pressão - Tubos de Karsten..... | 38 |
| 5.2 | Ensaios aos Constituintes das Argamassas..... | 39 |
| 5.2.1 | Análise Granulométrica..... | 39 |
| 5.2.2 | Baridade..... | 40 |
| 5.3 | Ensaios às Argamassas em Estado Fresco | 41 |
| 5.3.1 | Consistência por Espalhamento | 41 |
| 5.3.2 | Retenção de Água | 42 |
| 5.3.3 | Teor em Ar | 44 |
| 5.3.4 | Massa Volúmica..... | 45 |
| 5.4 | Ensaios às Argamassas em Estado Endurecido..... | 45 |
| 5.4.1 | Provetes Prismáticos | 45 |
| 5.4.1.1 | Variações Dimensionais e Ponderais – Massa Volúmica Aparente..... | 47 |
| 5.4.1.2 | Módulo de Elasticidade Dinâmico..... | 47 |
| 5.4.1.3 | Resistências Mecânicas..... | 48 |
| 5.4.1.3.1 | Resistência à Tração por Flexão | 48 |
| 5.4.1.3.2 | Resistência à Compressão | 50 |
| 5.4.1.4 | Absorção de Água por Capilaridade | 50 |
| 5.4.1.5 | Secagem | 52 |
| 5.4.1.6 | Condutibilidade Térmica | 54 |
| 5.4.1.7 | Porosidade Aberta e Massa Volúmica Aparente | 54 |
| 5.4.1.8 | Porosimetria de Mercúrio..... | 56 |
| 5.4.1.9 | Resistência aos Sulfatos..... | 57 |
| 5.4.2 | Provetes em Suporte de Tijolo..... | 58 |
| 5.4.2.1 | Dureza Superficial – Durómetro..... | 59 |
| 5.4.2.2 | Velocidade de Propagação de Ultra-sons | 59 |
| 5.4.2.3 | Condutibilidade Térmica | 60 |
| 5.4.2.4 | Absorção de Água sob Baixa Pressão - Tubos de Karsten..... | 61 |
| 5.4.2.5 | Porosimetria de Mercúrio..... | 62 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5.4.3 | Ensaio ao Reboco sobre Murete de Taipa | 63 |
| 5.4.3.1 | Velocidade de Propagação de Ultra-sons | 63 |
| 5.4.3.2 | Dureza Superficial - Esclerómetro pendular | 64 |
| 5.4.3.3 | Dureza Superficial – Durómetro..... | 64 |
| 5.4.3.4 | Absorção de Água sob Pressão - Tubos de Karsten..... | 64 |
| 5.4.3.5 | Porosimetria de Mercúrio | 64 |
| 6 | Apresentação e Análise de Resultados | 67 |
| 6.1 | Caracterização dos Suportes..... | 67 |
| 6.1.1 | Tijolo Furado – Condutibilidade Térmica e Absorção de Água sob Baixa Pressão | 67 |
| 6.1.2 | Murete de Taipa | 67 |
| 6.1.2.1 | Condutibilidade Térmica | 67 |
| 6.1.2.2 | Dureza Superficial – Durómetro e Esclerómetro Pendular | 68 |
| 6.1.2.3 | Absorção de Água sob Baixa Pressão – Tubos de Karsten..... | 69 |
| 6.2 | Constituintes das Argamassas | 70 |
| 6.2.1 | Análise Granulométrica..... | 70 |
| 6.2.2 | Baridade..... | 71 |
| 6.3 | Argamassas | 71 |
| 6.3.1 | Argamassas em Estado Fresco..... | 71 |
| 6.3.1.1 | Consistência por Espalhamento | 71 |
| 6.3.1.2 | Retenção de Água | 73 |
| 6.3.1.3 | Teor em Ar | 73 |
| 6.3.1.4 | Massa Volúmica..... | 74 |
| 6.3.2 | Argamassas em Estado Endurecido | 75 |
| 6.3.2.1 | Provetes Prismáticos | 75 |
| 6.3.2.1.1 | Variações Dimensionais e Ponderais – Massa Volúmica Aparente | 75 |
| 6.3.2.1.2 | Módulo de Elasticidade Dinâmico | 76 |
| 6.3.2.1.3 | Resistências à Tração por Flexão e à Compressão | 77 |
| 6.3.2.1.4 | Absorção de água por Capilaridade | 79 |
| 6.3.2.1.5 | Secagem | 80 |
| 6.3.2.1.6 | Condutibilidade Térmica | 81 |
| 6.3.2.1.7 | Porosidade Aberta e Massa Volúmica | 82 |
| 6.3.2.1.8 | Porosimetria de Mercúrio | 83 |
| 6.3.2.1.9 | Resistência aos Sulfatos | 84 |
| 6.3.2.2 | Provetes em Suporte de Tijolo..... | 85 |
| 6.3.2.2.1 | Dureza Superficial – Durómetro..... | 85 |
| 6.3.2.2.2 | Velocidade de Propagação de Ultrassons | 86 |
| 6.3.2.2.3 | Condutibilidade Térmica | 86 |
| 6.3.2.2.4 | Absorção de Água sob Baixa Pressão – Tubos de Karsten..... | 87 |
| 6.3.2.2.4 | Porosimetria de Mercúrio | 90 |
| 6.3.2.3 | Reboco..... | 91 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 6.3.2.3.1 | Velocidade de Propagação de Ultra-sons | 92 |
| 6.3.2.3.2 | Dureza Superficial – Durómetro..... | 92 |
| 6.3.2.3.3 | Dureza Superficial – Esclerómetro..... | 93 |
| 6.3.2.3.4 | Absorção de Água sob Baixa Pressão – Tubos de Karsten..... | 93 |
| 6.3.2.3.5 | Porosimetria de Mercúrio | 94 |
| 7 | Discussão de Resultados | 97 |
| 7.1 | Caracterização dos Constituintes Utilizados | 97 |
| 7.2 | Síntese da Caracterização das Argamassas..... | 98 |
| 7.3 | Argamassas em Estado Endurecido..... | 102 |
| 7.3.1 | Propriedades Mecânicas dos Provetes Prismáticos..... | 102 |
| 7.3.2 | Comportamento com a Ação da Água dos Provetes Prismáticos..... | 106 |
| 7.3.3 | Condutibilidade Térmica em Provetes em Suporte de Tijolo e Prismáticos..... | 108 |
| 7.3.4 | Compacidade por Ultra-Sons e Condutibilidade Térmica | 109 |
| 7.3.5 | Porosidade Aberta | 109 |
| 7.3.6 | Porosimetria de Mercúrio - Influência do Suporte | 110 |
| 7.4 | Discussão e Apreciação Geral das Argamassas..... | 113 |
| 8 | Conclusões | 117 |
| 8.1 | Considerações Finais..... | 117 |
| 8.2 | Principais Conclusões..... | 117 |
| 8.3 | Propostas de Desenvolvimento Futuro..... | 120 |
| | Bibliografia | 121 |
| | Anexos | i |
| A.1. | Organização dos ensaios realizados..... | i |
| A.2. | Dados meteorológicos | ii |
| A.3. | Valores detalhados de caracterização dos suportes..... | iii |
| A.4. | Valores detalhados de caracterização da terra argilosa | v |
| A.5. | Valores detalhados da caracterização das argamassas em estado fresco | v |
| A.6. | Valores detalhados da caracterização das argamassas em estado endurecido: provetes em suporte de tijolo aos 28 dias | vii |
| A.7. | Valores detalhados da caracterização das argamassas em estado endurecido: provetes em suporte de tijolo aos 90 dias | x |
| A.8. | Valores detalhados da caracterização das argamassas em estado endurecido: provetes prismáticos aos 90 dias..... | xiv |
| A.9. | Valores detalhados de caracterização do reboco aplicado no murete de taipa aos 90 dias .. | xxiv |
| A.10. | Porosimetria de mercúrio – provetes prismáticos, provetes em suporte de tijolo e reboco aplicado no murete de taipa (90 dias)..... | xxv |
| A.11. | Divulgação de resultados | xxvii |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Distribuição geográfica em Portugal das principais técnicas construtivas tradicionais em terra: a) Taipa, b) Adobe, c) Tabique (Carvalho et al. 2008)..... | 7 |
| Figura 2.2 - Uso de argamassas tradicionais de cal, bastardas e de cimento no Alentejo (Margalha 2011)..... | 15 |
| Figura 3.1 – Aspeto geral do murete de taipa | 21 |
| Figura 3.2 – Tijolo furado..... | 21 |
| Figura 4.1 – Curva granulométrica das três areias individualizadas e da mistura..... | 23 |
| Figura 4.2 – Três areias, da mais fina para a mais grossa (APAS30, APAS20 e APAS12) | 24 |
| Figura 4.3 – Curva granulométrica da terra argilosa por via húmida (Gomes et al. 2012a)..... | 25 |
| Figura 4.4 – Pormenor da terra argilosa | 25 |
| Figura 4.5 – Cal aérea hidratada em pó Lusical H100..... | 26 |
| Figura 4.6 – Pesagem dos constituintes (a) e processo de mistura dos constituintes manualmente (b)..... | 28 |
| Figura 4.7 – Misturadora (a), introdução de água na cuba (b) e aspeto de uma das argamassas com terra após o processo de amassadura (c) | 28 |
| Figura 4.8 – Molde dos provetes prismáticos..... | 29 |
| Figura 4.9 – Processo de compactação: a, b e c..... | 29 |
| Figura 4.10 – Processo de desmoldagem dos provetes prismáticos | 30 |
| Figura 4.11 – Provede prismático partido após a desmoldagem..... | 30 |
| Figura 4.12 – Molde de madeira (a) e afastador (b) | 31 |
| Figura 4.13 – Aspeto do conjunto afastador e molde de madeira (a), rasagem do provede (b) e aspeto final do provede em suporte de tijolo (c)..... | 31 |
| Figura 4.14 – Esquema da distribuição de argamassas | 32 |
| Figura 4.15 – Processo de amassadura com berbequim elétrico (a), níveis de humidade ascendente do solo no murete de taipa (b) e aplicação da argamassa (c)..... | 33 |
| Figura 4.16 – Aspeto geral do murete após aplicação do salpisco (a), acabamento do salpisco (b) e acabamento do reboco final (c)..... | 33 |
| Figura 4.17 – Condições de cura (a) e (b), provetes em condições de cura na sala climatizada (c) ... | 33 |
| Figura 5.1 – Ensaio de condutibilidade térmica em tijolo convencional..... | 35 |
| Figura 5.2 – Tubos de Karsten..... | 36 |
| Figura 5.3 – Alçado Este (esquerda) e Sul (direita) do murete de taipa | 36 |
| Figura 5.4 – Alçado Poente (esquerda) e Norte (direita) do murete de taipa | 36 |
| Figura 5.5 – Condutibilidade térmica realizada ao murete de taipa..... | 37 |
| Figura 5.6 – Esclerómetro pendular, DSE (a) e marca provocada pelo esclerómetro pendular após a realização do ensaio (b)..... | 38 |
| Figura 5.7 – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão no murete de taipa através de tubos de Karsten (a, b, c) | 38 |
| Figura 5.8 – Colocação da terra nos peneiros (a) e colocação dos peneiros na máquina (b), várias granulometrias da terra argilosa (c) | 40 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.9 – Colocação da terra no funil (a), abertura do funil (b) e rasagem do recipiente (c) | 41 |
| Figura 5.10 – Determinação do volume do recipiente | 41 |
| Figura 5.11 – Mesa de espalhamento (a), argamassa colocada no molde (b), pancadas com o pilão na argamassa colocada no molde (c) | 42 |
| Figura 5.12 – Molde rasado com argamassa (a), formato da argamassa após ser retirado o molde (b), medição do diâmetro da argamassa com craveira (c) | 42 |
| Figura 5.13 – Molde com argamassa (a), molde com argamassa e gaze por cima (b), molde com argamassa, gaze e oito papéis de filtro (c) | 44 |
| Figura 5.14 – Vidro colocado no topo (a), peso de 2 kg colocado no topo do conjunto invertido (b), pesagem dos oito papéis de filtro passados os 10 minutos (c) | 44 |
| Figura 5.15 – Molde com argamassa (já rasado) e equipamento apropriado (a), equipamento colocado no topo do recipiente (b), leitura do valor (c) | 45 |
| Figura 5.16 – Recipiente utilizado na determinação da massa volúmica | 45 |
| Figura 5.17 - Esquema da sequência de ensaios | 46 |
| Figura 5.18 – Provetes prismáticas (40x40x160 mm) | 46 |
| Figura 5.19 – Esquema do provete prismático 40x40x160 mm | 47 |
| Figura 5.20 – Medição de “a” com craveira (a), craveira (b) e (c) | 47 |
| Figura 5.21 – Equipamento utilizado para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico | 48 |
| Figura 5.22 – Equipamento utilizado na determinação da resistência à tração (a); provete devidamente colocado no dispositivo de ensaio (b) | 49 |
| Figura 5.23 – Provelte colocado no equipamento (a), provete após atingir a rotura (dividido em três) (b) e (c) | 50 |
| Figura 5.24 – Aspeto do provete após a preparação (a), caixa de plástico com lâmina de água onde foi realizado o ensaio (b), pesagem dos provetes (c) | 52 |
| Figura 5.25 – Provetes a absorver água (alguns minutos de ensaio) (a), pormenor de um provelte de terra (b), vista geral dos provetes em ensaio (c) | 52 |
| Figura 5.26 – Aspeto dos provetes prismáticos durante o ensaio de secagem | 53 |
| Figura 5.27 – Condutibilidade térmica em provete prismático | 54 |
| Figura 5.28 – Provetes inseridos no exsiccador (a), aspeto geral do equipamento montado (b), provetes submersos em água no interior do exsiccador (c) | 56 |
| Figura 5.29 – Balança onde é realizada a pesagem hidrostática (a), aspeto geral das duas balanças (b), pesagem saturada (c) | 56 |
| Figura 5.30 – Provetes após o ensaio | 56 |
| Figura 5.31 – Preparação dos provetes (a), pormenor do equipamento (b), conjunto do equipamento (c) | 57 |
| Figura 5.32 – Caixa onde é realizado o ensaio (a), preparação da solução (b), provetes colocados na caixa em imersão na solução (c) | 58 |
| Figura 5.33 – Pormenor de um provete (25% de terra) imerso na solução | 58 |
| Figura 5.34 – Reboco em tijolo | 59 |
| Figura 5.35 – Durómetro, DSD (a), realização do ensaio (b) | 59 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.36 – Folha com os pontos utilizados no ensaio (a), equipamento necessário (b), realização do ensaio (c)..... | 60 |
| Figura 5.37 – Conjunto de tijolo e equipamento (a), realização do ensaio (b) | 61 |
| Figura 5.38 - Tubo de Karsten (a), tijolo com os tubos colocados e esguicho (b), aspeto geral do ensaio realizado em dois tijolos simultaneamente (c) | 62 |
| Figura 5.39 - Reboco após a queda de dois dos tubos (a), reboco com baixo teor de terra (b), reboco com alto teor de terra (c) | 62 |
| Figura 5.40 – Remoção de amostra do reboco aplicado no tijolo para o ensaio de porosimetria..... | 63 |
| Figura 5.41 – Aspeto do reboco aplicado no murete de taipa aos 90 dias | 63 |
| Figura 5.42 – Pontos utilizados no ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons | 63 |
| Figura 5.43 – Esclerómetro pendular aplicado no reboco | 64 |
| Figura 5.44 – Pormenor de dois tubos de Karsten aplicados no reboco | 64 |
| Figura 5.45 – Remoção de amostras as argamassas aplicadas no murete de taipa | 65 |
| Figura 6.1 – Valores de condutibilidade térmica do murete de taipa | 67 |
| Figura 6.2 – Dureza superficial (através de esclerómetro) do murete de taipa | 68 |
| Figura 6.3 – Períodos de tempo necessários para absorção de 4 ml de água no murete de taipa | 69 |
| Figura 6.4 – Quantidade de água absorvida do tijolo | 70 |
| Figura 6.5 - Curva granulométrica da terra por via seca..... | 71 |
| Figura 6.6 – Resultados da consistência por espalhamento | 72 |
| Figura 6.7 – Espalhamento e relação água/argila | 72 |
| Figura 6.8 – Retenção de água | 73 |
| Figura 6.9 – Retenção de água e relação água/argila | 73 |
| Figura 6.10 – Teor em ar..... | 74 |
| Figura 6.11 – Massa volúmica no estado fresco..... | 74 |
| Figura 6.12 – Massa volúmica e relação água/argila..... | 75 |
| Figura 6.13 – Massa volúmica aparente de provetes prismáticos a várias idades..... | 76 |
| Figura 6.14 – Módulo de elasticidade dinâmico por ambos os métodos (provetes prismáticos aos 90 dias) | 77 |
| Figura 6.15 – Resistência à tração por flexão..... | 78 |
| Figura 6.16 – Resistência à compressão | 78 |
| Figura 6.17 - Curvas de absorção capilar | 79 |
| Figura 6.18 - Pormenor da fase inicial das curvas de absorção capilar | 79 |
| Figura 6.19 – Coeficiente de capilaridade e valor assintótico aos 90 dias | 80 |
| Figura 6.20 – Curvas de secagem | 80 |
| Figura 6.21 – Taxa de secagem e índice de secagem aos 90 dias..... | 81 |
| Figura 6.22 – Condutibilidade térmica dos provetes prismáticos (90 dias) | 82 |
| Figura 6.23 – Porosidade aberta e massa volúmica, provetes prismáticos aos 90 dias | 82 |
| Figura 6.24 – Porosimetria de mercúrio em provetes prismáticos (90 dias)..... | 83 |
| Figura 6.25 – Resistência aos sulfatos (90 dias) | 84 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6.26 - Variação de massa das argamassas aos 25 ciclos do ensaio de resistência aos sulfatos..... | 85 |
| Figura 6.27 - Dureza superficial aos 28 e 131 dias sobre tijolo | 85 |
| Figura 6.28 - Velocidade de propagação de ultra-sons sobre tijolo..... | 86 |
| Figura 6.29 - Condutibilidade térmica sobre tijolo | 87 |
| Figura 6.30 - Quantidade de água absorvida para os diversos tempos, aos 28 dias..... | 87 |
| Figura 6.31 - Quantidade de água absorvida para os diversos tempos, aos 90 dias..... | 88 |
| Figura 6.32 - Coeficientes de absorção para os 28 e 90 dias (quantidade de água absorvida em 1 hora)..... | 89 |
| Figura 6.33 - Tempo necessário para absorver 4 ml (28 dias) | 90 |
| Figura 6.34 - Tempo necessário para absorver 4 ml (90 dias) | 90 |
| Figura 6.35 – Porosimetria de mercúrio em provetes em suporte de tijolo (90 dias) | 91 |
| Figura 6.36 – Aspetto visual dos dois rebocos aplicados no murete de taipa (aos 90 dias): argamassas CL3_10t(ArF) e CL3..... | 92 |
| Figura 6.37 – Velocidade de propagação de ultra-sons dos quatro níveis das duas argamassas (m/s) | 92 |
| Figura 6.38 – Dureza superficial por esclerómetro pendular dos três níveis de cada argamassa | 93 |
| Figura 6.39 – Quantidades de água absorvidas em 1 hora no reboco (90 dias)..... | 93 |
| Figura 6.40 – Tempo necessário para absorver 4 ml (90 dias) | 94 |
| Figura 6.41 - Porosimetria de mercúrio no reboco aplicado no murete (90 dias)..... | 94 |
| Figura 6.42 – Porosimetria de mercúrio de ambas as argamassas aplicadas no murete de taipa: Gama de poros capilares..... | 95 |
| Figura 7.1 – Curvas granulométricas da terra, das três areias e da mistura destas | 97 |
| Figura 7.2 – Resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade dinâmico, resultados da presente dissertação e de Gomes et al. (2012b)..... | 103 |
| Figura 7.3 – Relação R_t/R_c e módulo de elasticidade dinâmico..... | 104 |
| Figura 7.4 – Resistência à compressão e resistência aos sulfatos (90 dias) | 104 |
| Figura 7.5 – Resistência à compressão e porosidade aberta por intrusão de mercúrio em provetes prismáticos (90 dias)..... | 105 |
| Figura 7.6 – Resistência à compressão e massa volúmica em provetes prismáticos (90 Dias) | 106 |
| Figura 7.7 – Taxa de secagem e coeficiente de capilaridade dos provetes prismático aos 90 dias.. | 106 |
| Figura 7.8 – Índice de secagem e valor assintótico | 107 |
| Figura 7.9 – Porosidade aberta e valor assintótico em provetes prismáticos (90 dias) | 108 |
| Figura 7.10 - Condutibilidades térmicas de provetes prismáticos e provetes em suporte de tijolos aos 90 dias..... | 108 |
| Figura 7.11 – Condutibilidade térmica e velocidade de propagação de ultra-sons em provetes em suporte de tijolo (28 e 90 dias) | 109 |
| Figura 7.12 – Porosidade aberta das diferentes amostras de argamassas (90 Dias)..... | 110 |
| Figura 7.13 - Quantidade de mercúrio introduzido em algumas intrusões (provetes prismáticos)..... | 111 |

| | |
|--|-----|
| Figura 7.14 - Quantidade de mercúrio introduzido em algumas intrusões (provetes em suporte de tijolo) | 111 |
| Figura 7.15 – Porosimetria das amostras de argamassa CL3 em prisma, sobre tijolo e no reboco, na parte superior e inferior | 112 |
| Figura 7.16 – Porosimetria das amostras da argamassa CL3_10t(ArF) em prisma, sobre tijolo e no reboco, na parte superior e inferior..... | 112 |

Índice de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Resultados obtidos em amostras de taipa (Mateus 2005)..... | 9 |
| Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas de blocos de adobe (Silveira et al. 2012) | 9 |
| Tabela 2.3 – Funções e exigências funcionais de argamassas (Henriques et al. 2006)..... | 12 |
| Tabela 2.4 – Requisitos estabelecidos para as características, aos 90 dias, das argamassas de revestimento para edifícios antigos (Veiga 2010) | 14 |
| Tabela 2.5 - Classificação para as propriedades de argamassas no estado endurecido EN 998-1 (CEN 2010)..... | 14 |
| Tabela 2.6 – Resultados de argamassas com a mesma cal aérea e mistura de areias com 90 dias de idade (Branco 2013)..... | 16 |
| Tabela 2.7 – Propriedades mecânicas de argamassas de cal aérea com distintas areias aos 90 dias (Faria 2004a, Veiga 2003) | 16 |
| Tabela 2.8 – Composição das argamassas (Gomes et al. 2012 b)..... | 18 |
| Tabela 2.9 – Resultados de diversos ensaios (Gomes et al. 2012 b) | 18 |
| Tabela 3.1 – Ensaio de caracterização de suportes | 20 |
| Tabela 3.2 – Ensaio de caracterização dos constituintes das argamassas..... | 21 |
| Tabela 3.3 – Ensaio realizado às argamassas em estado fresco | 21 |
| Tabela 3.4 – Ensaio realizado às argamassas em estado endurecido | 22 |
| Tabela 4.1 – Baridades das três areias e da mistura..... | 23 |
| Tabela 4.2 – Composição mineralógica da terra por análise de XRD (Gomes et al. 2012a) | 24 |
| Tabela 4.3 – Composição química da cal aérea (Gameiro et al. 2012 b)..... | 26 |
| Tabela 4.4 – Dosagens dos constituintes das argamassas..... | 27 |
| Tabela 4.5 – Traços ponderais e volumétricos | 27 |
| Tabela 6.1 – Caracterização do tijolo furado..... | 70 |
| Tabela 6.2 – Esquematização dos pontos no murete (condutibilidade térmica) | 67 |
| Tabela 6.3 – Médias de condutibilidade térmica de alguns dos pontos | 68 |
| Tabela 6.4 – Esquematização dos pontos do murete (esclerómetro pendular) | 68 |
| Tabela 6.5 – Médias de dureza superficial de alguns dos pontos | 68 |
| Tabela 6.6 – Esquematização da colocação dos tubos de Karsten | 69 |
| Tabela 6.7 – Absorção de água sob baixa pressão do murete de taipa..... | 69 |
| Tabela 6.8 – Massa volúmica aparente dos provetes prismáticos a várias idades | 76 |
| Tabela 6.9 – Porosidade aberta por intrusão de mercúrio..... | 84 |
| Tabela 6.10 – Coeficientes de absorção para 4 ml aos 28 e 90 dias (velocidade de absorção inicial)..... | 89 |
| Tabela 6.11 – Tempo necessário para absorver 4 ml de água (velocidade de absorção inicial) | 89 |
| Tabela 6.12 – Porosidade aberta por intrusão de mercúrio nos provetes em suporte de tijolo | 91 |
| Tabela 6.13 – Resultados de absorção de água sob baixa pressão do reboco (90 dias) | 93 |
| Tabela 6.14 – Porosidade aberta por intrusão de mercúrio no reboco..... | 95 |
| Tabela 7.1 – Traços ponderais e volumétricos | 98 |
| Tabela 7.2 – Resumo dos principais resultados obtidos..... | 99 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 7.3 – Análise global dos resultados em estado fresco..... | 100 |
| Tabela 7.4 – Análise global dos resultados dos provetes em suporte de tijolo aos 28 dias..... | 100 |
| Tabela 7.5 – Análise global dos resultados dos provetes em suporte de tijolo aos 90 dias..... | 100 |
| Tabela 7.6 – Análise global dos resultados obtidos para os provetes prismáticos aos 90 dias..... | 101 |
| Tabela 7.7 – Análise global dos resultados obtidos para o reboco aos 90 dias..... | 101 |
| Tabela 7.8 – Verificação dos requisitos das propriedades mecânicas..... | 113 |
| Tabela 7.9 – Comparação de resultados com Jamú (2013) (provetes prismáticos aos 90 dias)..... | 115 |
| Tabela 7.10 – Comparação de resultados com Santos (2013) (provetes em suporte de tijolo, 28 dias)..... | 115 |

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

- **Abreviaturas**

CEN – Comité Européen de Normalisation

DEC – Departamento de Engenharia Civil

EN – European Norm

FCT-UNL – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

IPQ – Instituto Português da Qualidade, I.P.

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LIMECONTECH – Projeto LIMECONTECH financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia

METACAL – Projeto METACAL financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia

NP – Norma Portuguesa

- **Ensaios e determinações**

C_{abs,T} – Coeficiente de absorção total (1 hora)

C_{abs,4ml} – Coeficiente de absorção inicial (de 4 ml de água)

C_{abs,5min} – Coeficiente de absorção aos 5 minutos

CC – Coeficiente de Capilaridade

DS_D – Dureza superficial utilizando um durómetro Shore A

DS_E – Dureza superficial utilizando um esclerómetro pendular

DP – Desvio Padrão

DRX – Difração de Raios X

Ed – Módulo de elasticidade dinâmico

Ed_{us} – Módulo de elasticidade dinâmico obtido através da velocidade de propagação de ultra-sons

Esp – Consistência por espalhamento

IS – Índice de Secagem

MV_{ap} – Massa Volúmica aparente

P_{ab} – Porosidade aberta

Qt_{abs,5min} – Quantidade de água absorvida em 5 minutos

Qt_{abs,1h} – Quantidade total de água absorvida (em 1 hora)

Tempo_{4ml} – Tempo necessário para absorver 4 ml de água

R_{et} – Retenção de água

R_c – Resistência à compressão

R_t – Resistência à tração (por flexão)

TG-DTG – Análise Termogravimétrica e análise Termogravimétrica Diferencial

TS – Taxa de Secagem

VA – Valor Assintótico (absorção capilar)

V_{us} – Velocidade de propagação de ultra-sons

W_t – Teor de água

Δm_{25c} – Variação de massa ao fim de 25 ciclos de imersão/secagem, em solução com sulfatos

λ – Condutibilidade térmica

- **Argamassas**

CL3 - Argamassa de cal aérea e areia ao traço volumétrico 1:3 de referência, ou seja, sem qualquer terra

CL3_5t(ArF) - Argamassa de cal aérea e areia ao traço 1:3, com 5% de massa de terra em substituição de igual parcela de areia fina

CL3_10t(ArF) - Argamassa de cal aérea e areia ao traço 1:3, com 10% de massa de terra em substituição de igual parcela de areia fina

CL3_15t(ArF) - Argamassa de cal aérea e areia ao traço 1:3, com 15% de massa de terra em substituição de igual parcela de areia fina

CL3_25t(ArF) - Argamassa de cal aérea e areia ao traço 1:3, com 25% de massa de terra em substituição de igual parcela de areia fina

1 Introdução

1.1 Enquadramento do Tema

Nos dias de hoje há uma grande preocupação com o impacto ambiental que a construção civil produz. Como tal, pretende-se incrementar a sustentabilidade na área de construção através do recurso mais frequente a matérias-primas que não tenham de ser especificamente processadas, nomeadamente a terra. A terra pode ser utilizada, por exemplo, para a execução de paredes monolíticas, para a execução de blocos e de alvenarias com eles executadas, para o enchimento de zonas vazadas, para a execução de argamassas de terra ou como pigmento. Como os terrenos menos férteis são preferíveis para a sua utilização como material de construção, não se está a retirar recursos ao solo, em termos agrícolas.

A terra é um dos materiais de construção mais antigos; foi um dos primeiros a ser utilizado pelo Homem na construção de habitações. Nos dias de hoje, aproximadamente 30% da população mundial vive em edifícios de terra (Silveira et al. 2012). No entanto, caiu em desuso com o passar dos anos, devido ao aparecimento de novos e mais resistentes materiais de construção. Nas últimas décadas o interesse por este tema tem vindo a aumentar, pois como já foi referido, é um material sustentável. Assim sendo, pode ser avaliada a possibilidade da sua utilização na área da construção civil, maioritariamente em termos de argamassas para a reabilitação de edifícios históricos, construídos com terra, mas também para a construção nova e intervenção em edifícios recentes.

Entre as técnicas de construção de paredes de edifícios com terra, a taipa, o adobe (blocos de terra) e o tabique, são as mais conhecidas em Portugal. Muitas destas construções apresentam anomalias e assim sendo, é necessário intervir nesse aspeto.

Para um projeto de reabilitação de uma parede rebocada ser bem executado, é necessário conhecer a parede em si (o suporte) e os materiais de construção que sejam compatíveis, para se definir quais os que se vão utilizar.

1.2 Objetivos e Metodologia

Relativamente a argamassas compatíveis com suportes de terra, ainda há um grande caminho a percorrer. Existem muitas lacunas nas informações existentes sobre este tema. Não há informações suficientes tanto a nível de propriedades mecânicas, físicas e químicas, assim como dos comportamentos que estes produtos apresentam. Esta dissertação tem como objetivo contribuir para melhorar este aspeto, ou seja, pretende contribuir para um melhor conhecimento sistematizado de argamassas de cal aérea e terra argilosa. Para tal formularam-se e caracterizaram-se argamassas com estes constituintes e, posteriormente, compararam-se com argamassas apenas de cal aérea.

Assim, e uma vez que se conhecem relativamente bem as características de argamassas de cal aérea, utilizou-se esta como padrão. As argamassas desenvolvidas foram constituídas tendo por base um traço volumétrico de 1:3 de cal e de uma mistura de três areias siliciosas lavadas e graduadas. Esta mistura de areias tem vindo a ser sistematicamente utilizada em investigação no âmbito do projeto

LIMECONTECH, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, onde se insere este trabalho e, ainda, do projeto METACAL. A argamassa padrão foi submetida a substituições crescentes na parcela do agregado mais fino por uma terra argilosa. A terra argilosa utilizada foi uma terra comercial, fornecida pela empresa Sorgila – Sociedade de Argilas e é a mesma terra utilizada por Gomes et al. (2012).

A colocação de terra numa argamassa pode ser encarada como esta tendo um funcionamento como um agregado ou como um ligante. Este segundo aspeto não foi analisado na presente dissertação, uma vez que é o tema da colega Naila Sofia Pereira Jamú. Assim sendo, estas duas dissertações foram realizadas em paralelo, em que numa se analisa a terra como substituição do agregado, num traço volumétrico mais fraco (1:3) e, na outra, como substituição do ligante, com um traço volumétrico mais forte (1:2). A terra utilizada é a mesma, assim como os restantes materiais. Os ensaios realizados e as metodologias são semelhantes. Deste modo, estas duas dissertações complementam-se, podendo ser comparados os valores obtidos com os ensaios e verificadas quais as vantagens e inconvenientes de cada opção.

Um outro estudo sobre as presentes argamassas teve início, no qual se introduzem diversas fibras naturais na argamassa de referência e na que contém 10% de terra. As fibras utilizadas são introduzidas em duas dosagens e apresentam três origens distintas: crina de cavalo, casca de arroz e *blouces* de lã de ovelha com pelo morto.

1.3 Estrutura da Dissertação

A primeira etapa a realizar foi a pesquisa bibliográfica. Toda a pesquisa foi realizada tentando sempre obter a maior aproximação possível com o tema em questão, as argamassas com terra. No entanto, também foi necessário e útil alargar os limites de pesquisa por forma a complementar toda a informação recolhida. Por exemplo, além de argamassas com terra, foram pesquisados outros temas relacionados tais como argamassas de cal aérea ou hidráulica ou mesmo de cimento, edifícios com paredes de alvenaria em blocos de terra ou de taipa, construções antigas, argamassas com incorporação de vários tipos de fibras, e muitos outros temas que se consideram relevantes, já que quanto mais completa e exaustiva for esta pesquisa, mais fortes são os alicerces de toda a dissertação.

Tendo em conta toda a informação recolhida na pesquisa bibliográfica, entrou-se numa segunda etapa. Nesta, foram definidos os ensaios a realizar nas argamassas durante a campanha experimental, as respetivas datas, a cura a aplicar às argamassas, e ainda os traços, quantidades e materiais a utilizar na elaboração das mesmas. Nesta etapa foram escolhidas as percentagens de terra a introduzir na argamassa, assim como o agregado a retirar nessa mesma percentagem.

Tendo a calendarização do processo experimental definida, assim como os restantes aspetos, deu-se início à campanha experimental propriamente dita. Toda esta etapa (campanha experimental) foi realizada no laboratório de materiais de construção da Faculdade Nova de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT UNL).

Após a finalização de toda a campanha experimental e recolhidos os dados obtidos com os ensaios efetuados, procedeu-se à análise dos mesmos.

Tendo em conta todas as etapas mencionadas anteriormente, optou-se por estruturar a dissertação em oito capítulos.

No capítulo um pretende-se fornecer uma introdução ao tema da dissertação, tentando mencionar aspetos muito gerais sobre argamassas de terra. Neste capítulo também se pretende mencionar os objetivos de toda a dissertação, assim como as metodologias adotadas para ir de encontro aos objetivos. O segundo capítulo pretende levantar todo o estado dos conhecimentos, ou seja, toda a informação obtida na pesquisa bibliográfica e também conhecimentos adquiridos durante todo o curso que de alguma forma são úteis e relacionados com o tema da dissertação.

O terceiro capítulo fornece uma introdução à campanha experimental, mencionando todos os ensaios realizados. Seguidamente no quarto capítulo são descritos os constituintes das argamassas, os traços e quantidade utilizados e os processos de produção e preparação dos provetes. O capítulo cinco corresponde ao capítulo da campanha experimental. Na descrição dos ensaios, são detalhados os objetivos dos mesmos, as normas que se seguiram na elaboração destes, os equipamentos necessários e os procedimentos realizados.

No sexto capítulo é lançada a contribuição de todo o estudo realizado para a evolução do tema. Neste capítulo são apresentados e analisados detalhadamente todos os resultados obtidos na campanha experimental. O sétimo capítulo complementa o capítulo seis. Neste, alguns dos resultados obtidos são confrontados e comparados com outros resultados obtidos em estudos anteriores, por forma a verificar, ou não, melhorias com as alterações nas argamassas propostas nesta dissertação.

Por último, no capítulo oito são apresentadas nas conclusões os aspetos mais relevantes obtidos nos capítulos anteriores. Aqui, também são propostos estudos de desenvolvimento futuros que poderão complementar esta dissertação, uma vez que este tema ainda tem muito por investigar.

No seguimento de todos os capítulos, são apresentados em anexo todos os resultados obtidos em forma de tabelas e gráficos e ainda, alguns dados climáticos.

2 Estado do Conhecimento

O presente capítulo tem o intuito de descrever detalhadamente toda a pesquisa bibliográfica que foi realizada ao longo da elaboração da dissertação. As informações retiradas da pesquisa bibliográfica possuem extrema importância uma vez que permitem fortalecer os conhecimentos sobre o assunto e tomar conhecimento dos estudos que já foram realizados, assim como ter conhecimento de resultados que poderão ter função comparativa com os obtidos nesta dissertação.

O primeiro subcapítulo refere-se à utilização da terra como material de construção, após o que serão abordados os temas de construções em terra. Seguidamente será feito um pequeno enquadramento sobre argamassas correntes, assim como as suas exigências funcionais. Aprofundando um pouco este tema segue-se um subcapítulo sobre argamassas de cal aérea. Os últimos dois subcapítulos dizem respeito a argamassas de terra e argamassas de cal aérea com terra.

2.1 A Terra como Material de Construção

A utilização da terra como material de construção preenche os requisitos de sustentabilidade, e assim, a sua procura tem vindo a aumentar. O interesse crescente de que este material tem sido alvo tem como objetivo, não só a reabilitação e conservação de construções antigas, como também a sua utilização em construção nova.

Este material de construção possui diversas vantagens, dos quais se destacam:

- É uma matéria-prima extremamente abundante;
- Dispensa processos de transformação dispendiosos em termos energéticos;
- Possui bom comportamento térmico e acústico;
- É reciclável e reutilizável, particularmente se não estiver adicionada a outros materiais, por exemplo a ligantes correntes;
- É incombustível e não tóxico;
- A terra escavada para execução de fundações pode ser reaproveitada como material de construção.

No entanto a vantagem que mais se destaca é o baixo impacto ambiental que é associado a este material. O que torna a terra num material de construção sustentável é o facto de dispensar processos complexos e consumidores de recursos energéticos na sua produção e, também idealmente, da necessidade de percorrer grandes distâncias entre o local de produção e aplicação em obra, uma vez que a terra pode ser utilizada na própria obra. Uma outra vantagem que torna este material de construção sustentável é ser reciclável e reutilizável (se não alterada). Estas características são fundamentais para um processo denominado de desconstrução. O que se pretende com a desconstrução é que, quando uma edificação termine o seu período de vida e se se pretender demoli-la, os destroços provenientes de tal demolição possam ser reaproveitados para construções seguintes, podendo ser ou não tratados.

Além das vantagens já mencionadas que este material proporciona, este também permite uma arquitetura diferente daquela a que grande parte da população já se conformou. O tipo de construção

obtido por este material são edifícios mais rústicos, acolhedores, geralmente pertencentes a ambientes não urbanos.

Com o surgimento da indústria do cimento, toda a construção em terra foi caindo em desuso e perdeu interesse por parte do sector da construção. As paredes em alvenaria e estruturas em betão armado tomaram o seu lugar neste sector, colocando a construção em terra no esquecimento. No entanto, nas últimas décadas, este tipo de construções tem vindo a recuperar o seu lugar na indústria da construção. Os estudos realizados sobre a utilização da terra como material de construção têm vindo a progredir - tais como argamassas de terra, terra estabilizada, caracterização de amostras recolhidas de construções existentes, entre muitos outros. Tendo em conta que em Portugal existe um grande património de edifícios de terra, vários têm sido os estudos relativos a recolha de amostras desses mesmos edifícios em vários locais, alguns deles em Aveiro (Silveira et al. 2012), Costa Vicentina, Alentejo (Gomes et al. 2009), (Gomes et al. 2012 c) e Algarve (Mateus 2005).

Com o intuito de melhorar as características da terra como material de construção recorre-se quase sempre a processos de estabilização da mesma. Apesar de este processo ser utilizado no presente, é a cima de tudo uma prática de longa data. De uma forma geral, os principais objetivos da estabilização da terra são:

- Melhorar o comportamento mecânico;
- Melhorar a coesão entre as partículas que a constituem;
- Reduzir a porosidade e as variações de volume, nomeadamente a retração;
- Aumentar a resistência à erosão devido aos agentes meteorológicos.

As formas mais usuais e vernaculares de estabilização da terra envolvem adições de cal e/ou de fibras.

A compressão que se realiza na taipa é um exemplo de estabilização mecânica (Faria 2004 b). A cal é utilizada como estabilizador químico da terra devido à sua ação sobre as partículas de argila (Fernandes 2008). O efeito pretendido da cal sobre o material de terra é a redução dos vazios e a modificação da ligação entre as partículas. A reação da mistura de argila e cal resulta no aparecimento de uma nova estrutura que aglomera as partículas de terra.

Relativamente à adição de fibras, a mais utilizada no passado e mesmo no presente é a palha. No entanto, uma outra fibra bastante utilizada é a casca de arroz. A adição de fibras permite diminuir a retração e conseqüentemente a fissuração durante o processo de secagem de paredes de terra. Este facto pode ser explicado devido à redistribuição de esforços que ocorre devido à introdução das fibras, permitindo distribuir as tensões por todo o material. Apesar das vantagens que a adição das fibras proporciona, as mesmas também implicam desvantagens. Uma delas é a degradação que as fibras sofrem quando expostas a agentes meteorológicos pois apresentam grande sensibilidade à humidade e podem provocar contaminação biológica ao elemento construtivo no qual estão inseridas. Vários têm sido os autores a investigarem o papel da adição das fibras em solos. Estes estudos investigam não só os melhores tipos de fibras a serem inseridos em terra, mas também os tamanhos e posições das mesmas (Prabakara et al. 2002).

2.2 Construções em Terra em Portugal

Uma grande percentagem do património edificado português é constituído por construção de terra. A utilização deste simples material na construção de habitações provém de populações ancestrais e já perdidas no tempo, surgindo na necessidade de construir abrigo. Desde o Neolítico Antigo até ao final da Idade do Cobre (cerca de 5500 a 2000 a.C.), a terra era utilizada como material de construção em estruturas habitacionais e de uso doméstico de diversos sítios de *habitat* no Sul de Portugal (Bruno 2007).

Em Portugal até aos anos 50 do século XX, o processo construtivo mais utilizado essencialmente no sul do país foi a taipa. A presença deste tipo de construções é frequente, nomeadamente na Costa Vicentina (Gomes et al. 2009). O clima seco desta região é favorável a este tipo de construção, uma vez que esta, se não convenientemente protegida, é extremamente suscetível à água.

Outra zona de Portugal que possui uma grande percentagem de construções de terra é Aveiro. Aqui, e ao contrário da Costa Vicentina, o processo construtivo mais utilizado é a alvenaria de blocos de adobe.

Este tipo de construção recorre às matérias-primas locais. Deste modo, em virtude das propriedades dos materiais aplicados em cada caso (terra, agregados, ligantes, água e fibras), cada construção exige adaptações nos métodos construtivos tradicionalmente utilizados.

Tendo em conta estas duas técnicas construtivas (e que a terra utilizada para a taipa é geralmente mais seca e menos argilosa do que a utilizada no adobe), se no local da construção o solo não tiver argila suficiente para ser utilizado na produção de blocos de adobe, opta-se geralmente pela taipa.

Além destas duas técnicas, existe ainda outro processo construtivo tradicional, o tabique. Esta técnica consiste em aplicar terra sobre uma estrutura ligeira previamente concebida, geralmente de madeira. Esta estrutura mista possui uma capacidade resistente que é conferida pela madeira, que a distingue das outras duas técnicas mencionadas anteriormente, em que a terra é o material principal (Carvalho et al. 2008).

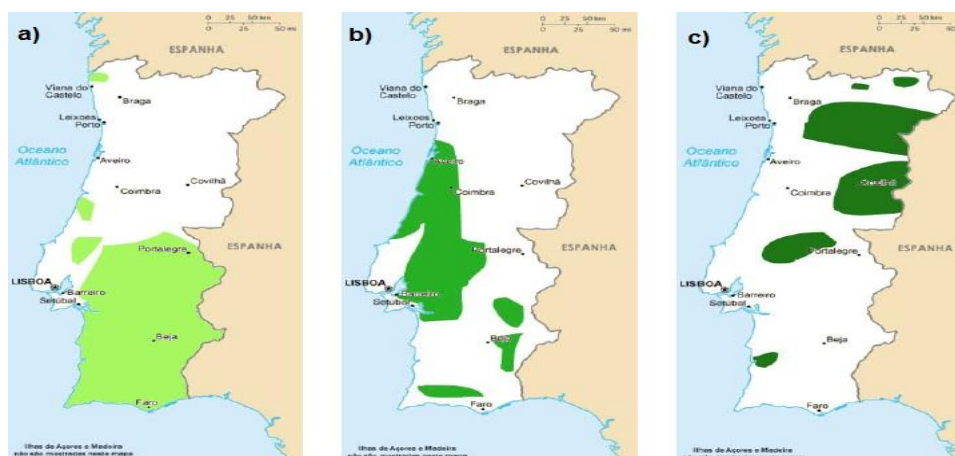


Figura 2.1 – Distribuição geográfica em Portugal das principais técnicas construtivas tradicionais em terra: a) Taipa, b) Adobe, c) Tabique (Carvalho et al. 2008)

Na Figura 2.1 é possível identificar quais as zonas de Portugal Continental que tiveram maior incidência da construção em terra. Como já mencionado, a taipa foi mais utilizada na zona sul do país (Alto e Baixo Alentejo e Algarve) e a construção em adobe na Beira Litoral, Ribatejo e Estremadura. O

tabique foi mais utilizado em Trás-os-Montes, Alto Douro e na Beira Alta. Os fatores envolvidos na determinação do processo construtivo de determinada região são o clima e fatores económicos: os climas favoráveis são os mais secos (baixa humidade relativa e precipitação) e os fatores económicas relacionam-se principalmente com o tipo de solo existente.

Um aspeto que tem sido alvo de várias investigações são as anomalias mais frequentes neste tipo de construções e possíveis causas de degradação. De acordo com o estudo realizado em quatro construções de taipa localizadas no Alentejo (Gomes et al. 2009) podem distinguir-se dois fatores causadores de anomalias: fatores naturais e fatores humanos. Dentro dos fatores naturais encontram-se os fatores climáticos, fenómenos naturais, humidade, desenvolvimento biológico e envelhecimento dos materiais. Já os fatores humanos incluem o abandono das habitações, introdução de materiais não compatíveis e uso indevido das mesmas. É de ter em conta que as degradações que se encontram nas construções de terra não têm origem num só fator mas sim numa conjugação de vários fatores. De acordo com este estudo, a principal causa de degradação de edifícios de terra é a humidade existente, pois diminui a coesão interna, a resistência mecânica e aumenta a potencialidade da degradação por ação de sais solúveis

2.2.1 Paredes de Taipa

A construção em taipa consiste na execução de paredes espessas e monolíticas através de processos de compactação. Recorre-se à utilização de moldes de madeira denominados de taipais que têm a função de moldar as paredes. O nome de “taipa” deriva desses mesmos taipais. A terra é colocada no ser interior, é compactada e posteriormente os moldes são deslocados ao longo do comprimento da parede em construção, servindo novamente de moldes do bloco de parede adjacente. O solo utilizado neste tipo de construção é um solo apenas húmido.

O solo a utilizar na produção de taipa deve possuir características e granulometria propícia a promover uma boa compacidade e coesão após a compactação. Deve também possuir boa capacidade de deformação, por forma a dar resposta a possíveis variações dimensionais resultantes de alterações térmicas ou de variações de teores de humidade.

Relativamente aos revestimentos a aplicar sobre uma alvenaria de taipa, estes nem sempre são adotados, sendo no entanto convenientes pelo menos ao fim de alguma exposição natural pois fornecem proteção ao suporte de terra. No património edificado português há vários exemplos de construções de taipa sem qualquer tipo de revestimento aplicado. Antigamente, por vezes não se aplicava o revestimento de reboco por questões económicas; por vezes este era aplicado apenas em algumas das paredes principais ou ainda só em partes destas paredes. Atualmente um dos motivos pelo qual se opta por não colocar revestimento (deixando o suporte à vista) é a vertente contemporânea da arquitetura das construções em terra, ou seja, um motivo meramente estético, de forma a visualizar-se a especificidade da parede (Faria 2005). Os revestimentos aplicados em paredes de taipa eram tradicionalmente argamassas de cal aérea e areia ou argila e areia.

Um estudo realizado sobre construções de taipa em Portugal (mais precisamente no barlavento algarvio) caracterizou amostras recolhidas dessas mesmas construções (Mateus 2005). Tais amostras

são constituídas pelo suporte (taipa) e pelo revestimento nele aplicado e foram retiradas de cinco construções distintas. De entre os ensaios efetuados, os mais relevantes para a presente dissertação são a absorção capilar, resistência à compressão e resistência superficial por esclerómetro pendular.

Tabela 2.1 – Resultados obtidos em amostras de taipa (Mateus 2005)

| Amostra | Rc [MPa] | | Absorção capilar [kg/(m ² .min ^{1/2})] | Esclerómetro pendular [escala Vickers] |
|----------------|--------------|-------|---|--|
| | Revestimento | Taipa | Revestimento | Revestimento |
| | | | Cc5* | |
| Sesmarias | 2,1 | 1,1 | 0,57 | 89 |
| Arão | 2,6 | 1,3 | 0,35 | 92 |
| Montes de Cima | 3,1 | 0,8 | 1,69 | 94 |
| Pincho | 2,0 | 1,3 | 0,67 | 89 |
| Porches | 4,1 | 2,7 | 0,89 | 99 |

*Cc5 – Coeficiente de capilaridade aos 5 minutos.

2.2.2 Paredes de Adobe

De acordo com informação do município de Aveiro, cerca de 25% das construções existentes na cidade são constituídas por alvenarias de blocos de adobe, e relativamente à totalidade do distrito, esta percentagem aumenta até aos 40% (Silveira et al. 2012). As construções em adobe tiveram sucesso nesta região devido às boas características que o solo possui naquela zona. As matérias-primas utilizadas nestas construções são areia grossa, solo argiloso e cal. Esta mistura poderia ser corrigida através de adições maiores ou menores de areia e de cal, ou mesmo de fibras com o intuito de controlar possíveis fendilhações aquando do processo de secagem ao ar. Tal como o nome indica, os blocos de adobe são nada mais do que blocos de terra crua moldados e posteriormente secos ao ar (Lourenço et al. 2001). A forma dos blocos pode variar desde cubos a paralelepípedos de secção quadrada ou retangular. O solo mais apropriado para este tipo de construção é um solo mais argiloso do que o solo utilizado na construção em taipa.

Um estudo realizado sobre as construções de terra em Aveiro teve como objetivo caracterizar o adobe tradicionalmente utilizado nesta zona (Silveira et al. 2012). Para tal, foram estudadas as propriedades mecânicas de blocos de adobe recolhidos de construções distribuídas no distrito de Aveiro. Os resultados obtidos das propriedades mecânicas encontram-se na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas de blocos de adobe (Silveira et al. 2012)

| Amostra | Ed [MPa] | Rc [MPa] | Rt [MPa] |
|---------------|----------|----------|----------|
| Casas e muros | 187 | 1,17 | 0,19 |

2.3 Argamassas Correntes

Uma argamassa é resultante de uma mistura de agregado(s), ligante(s) e água. A esta mistura podem ainda ser adicionados certos elementos tais como adições e adjuvantes, com a intenção de melhorar certas propriedades das argamassas em questão.

2.3.1 Ligantes

Os ligantes correntes que podem constituir uma argamassa dividem-se em duas famílias: os ligantes aéreos e os ligantes hidráulicos. Relativamente aos ligantes aéreos, estes endurecem unicamente com a presença do dióxido de carbono da atmosfera, como é o caso da cal aérea. No entanto, os ligantes hidráulicos têm a propriedade de endurecer debaixo de água e de resistir à sua ação (Margalha 2011).

2.3.2 Agregados

O componente que existe em maior quantidade numa argamassa são os agregados, nomeadamente areias. Estas são geralmente de areeiro ou de rio. De acordo com a sua origem e composição química, os agregados proporcionam diferentes características e comportamentos às argamassas em que são inseridos.

Os fatores que mais influenciam as características das argamassas são a origem dos agregados, a sua forma e dimensão, e claro, a sua granulometria. A origem dos agregados influencia as características mecânicas e químicas das argamassas. Relativamente à forma dos agregados, esta tem grande influência na resistência mecânica e na porosidade das argamassas. Argamassas com agregados mais angulares possuem maior resistência mecânica, uma vez que partículas angulares preenchem melhor os espaços vazios. Argamassas com agregados mais arredondados proporcionam poros maiores; no entanto esta característica pode ser contornada através da adição de outros agregados.

2.3.3 Adições e Adjuvantes

Relativamente a adições, estes apresentam-se geralmente em forma sólida (pó). Uma adição bastante conhecida são as pozolanas, que proporcionam às argamassas em questão aumentos na resistência e durabilidade. As pozolanas podem ter origem natural ou artificial. Pozolanas naturais são originadas em erupções vulcânicas; como exemplos de pozolanas artificiais podem citar-se as cinzas volantes, as cinzas de casca de arroz ou as argilas calcinadas.

Por outro lado, os adjuvantes apresentam-se geralmente em forma líquida. A utilização deste material não é fundamental na produção de uma argamassa; no entanto, por vezes tornam-se necessários para uma adequada utilização ou mesmo para conseguirem alterações de comportamento.

2.3.4 Água

A água introduzida no processo de amassadura de uma argamassa é fundamental pois influencia diversas propriedades e o seu comportamento. Esta permite um envolvimento dos agregados pelo ligante, para além de contribuir para o endurecimento. Uma das principais funções da água é proporcionar à argamassa maior ou menor trabalhabilidade, ou seja, melhor ou pior facilidade de aplicação (em estado fresco). Visto que a água introduzida em argamassas puras de cal aérea não reage como nas argamassas hidráulicas, as primeiras apresentam maior retração inicial e, conseqüentemente, maior fendilhação durante o processo de cura. No entanto, estas argamassas de cal aérea têm a capacidade e a necessidade de serem reapertadas após ocorrer parte significativa da retração inicial,

eliminando essas fendas (Faria et al. 2008). Algumas das principais propriedades afetadas pela quantidade de água existente numa argamassa são a retração (quanto mais água, em princípio maior a retração) e as resistências mecânicas. Conseqüentemente, a sua durabilidade também é afetada.

2.4 Exigências Funcionais das Argamassas

A palavra argamassa abrange um vasto campo de aplicações e, como tal, antes da escolha da argamassa a aplicar num edifício, é necessário saber qual o tipo de obra e a sua função. Ou seja, é imprescindível saber se a argamassa é para construção nova ou para reabilitação de um edifício e, ainda, qual a função que esta irá desempenhar – se vai ser aplicada no assentamento de alvenaria, se as juntas da alvenaria vão ficar à vista ou vão ser revestidas, se vai ser aplicada num reboco exterior ou interior, se num refechamento de juntas, se numa reparação localizada, por exemplo.

Com o passar do tempo, a constituição e forma das paredes exteriores dos edifícios foram-se modificando de região para região. Mas apesar disso, as paredes exteriores tinham características em comum (desde a antiguidade até à época do betão armado em toda a Europa): juntavam a função resistente com a função de proteção em relação aos agentes climáticos e às ações externas em geral; os materiais utilizados antigamente eram mais porosos e deformáveis do que os utilizados nos dias de hoje; a sua espessura proporcionava capacidades de resistência e proteção (Veiga 2003). Uma grande diferença na funcionalidade de paredes exteriores antigas das atuais é relativa ao acesso da água e à humidade. Na construção atual, umas das principais preocupações com as alvenarias é que estas não permitam entrada de água vinda do exterior ou pelo menos que, em conjunto com o revestimento, impeçam a progressão da água até ao interior, e como tal dimensionam-se as paredes exteriores com esse intuito. O mesmo não acontece com as alvenarias de construções antigas, em que é suposto que a água tenha acesso às paredes. A espessura e a porosidade das paredes impediam a permanência prolongada de água, tentando então promover a sua fácil e rápida saída para o exterior.

Quando se pretende intervir num edifício antigo, a primeira opção deverá ser, sempre que possível, a conservação. No entanto, a estratégia de intervenção mais apropriada é bastante difícil de determinar. Ao nível dos rebocos de paredes podem assim distinguir-se quatro grandes níveis possíveis de intervenções (Veiga 2003):

- Primeira: conservação do revestimento antigo através de operações de manutenção e de reparação pontual;
- Segunda: consolidação do revestimento existente, se o edifício ou o revestimento for de valor elevado;
- Terceira: substituição parcial em alguns paramentos, com recurso a revestimentos semelhantes aos antigos;
- Quarta: substituir a totalidade do reboco.

Estas opções devem ser escolhidas por ordem de severidade das anomalias, sendo que a primeira corresponde a anomalias pontuais e a última a anomalias com severidade elevada.

Em conservação, a ênfase prioritária deve ser sempre a durabilidade da alvenaria que a argamassa protege, ao contrário do que se passa na construção nova, em que a maior preocupação é a durabilidade da nova argamassa (Henriques et al. 2006). Assim, o principal objetivo num projeto de

conservação é a preservação física dos materiais e estruturas existentes. A argamassa escolhida deve contribuir para este objetivo durante todo o período em que esteja funcional e deve também ser passível de ser removida quando perder essa funcionalidade. Este último aspeto denomina-se de reversibilidade¹, e constitui um importante fator a ter em conta na definição das características mecânicas e físicas da nova argamassa.

A durabilidade de argamassas é garantida através de diversas características: resistência mecânica (aos choques), boa coesão interna, boa aderência ao suporte e entre camadas (mas não excessiva para não impedir a reversibilidade), boa resistência química (aos sais existentes nas alvenarias), bom comportamento face à água (absorção lenta e facilidade de secagem) e ainda resistência à colonização biológica. Relativamente a argamassas de cal, a sua durabilidade está fortemente relacionada com a sua estrutura porosa, pois esta controla a capacidade de transportar, reter e expulsar água por evaporação. No entanto, a durabilidade das argamassas não se prende exclusivamente com as suas características intrínsecas. Diversos fatores como as técnicas de preparação e aplicação, condições climáticas e de cura e a preparação do suporte são igualmente importantes (Veiga 2003).

Os objetivos da utilização de uma argamassa em edifícios existentes podem passar por rebocos de proteção de alvenarias (contra ações externas ou internas), refechamento de juntas (em que as argamassas sejam inexistentes ou não-funcionais), injeções (de caldas) em alvenarias com problemas estruturais, argamassas de assentamento (criação de juntas entre novos elementos) ou ainda, reparação estética de elementos de pedra (Henriques et al. 2006). Estas duas últimas funções de argamassas excluem-se do âmbito da conservação², passando a pertencer às ações de restauro³ ou reconstrução. De forma simplificada, podem resumir-se as funções e exigências principais de determinada argamassa da forma apresentada na Tabela 2.3 (Henriques et al. 2006).

Tabela 2.3 – Funções e exigências funcionais de argamassas (Henriques et al. 2006).

| Tipo de argamassa | Função | Exigências funcionais |
|-------------------------------|---|---|
| Rebocos exteriores | Proteção contra a ação da água (líquida ou vapor) | Baixa absorção de água e elevada permeabilidade ao vapor de água |
| Rebocos interiores | Proteção contra ações mecânicas | Boa dureza superficial |
| Refechamento de juntas | Proteção contra a água e estabilidade estrutural | Baixa absorção de água, elevada permeabilidade ao vapor de água e expansibilidade |
| Injeções | Estabilidade estrutural | Facilidade de injeção |

¹ Reversibilidade – possibilidade de um dado material ou solução construtiva poderem ser removidos no final da sua vida útil sem causar danos aos restantes materiais que com eles contactem (Henriques 1991).

² Conservação – conjunto de ações destinadas a prolongar o tempo de vida duma dada edificação histórica (Henriques 1991).

³ Restauro – conjunto de operações destinadas a restabelecer a unidade da edificação do ponto de vista da sua conceção e legibilidade originais, ou relativa a uma dada época (Henriques 1991).

Relativamente a argamassas utilizadas para rebocos exteriores, estas devem possuir as seguintes características:

- Devem possuir a menor absorção capilar de água possível (quer em termos de coeficientes de capilaridade quer em termos de valor assintótico);
- A água que inevitavelmente consegue penetrar na argamassa deve poder evaporar e para tal, a permeabilidade ao vapor de água é uma característica importante;
- Devem ter estabilidade dimensional, tanto numa fase inicial (retrações) como a longo prazo (variações dimensionais);
- Devem ter boa aderência ao suporte;
- Tanto quanto possível, as argamassas não devem libertar sais solúveis. No entanto, e devido aos sais que inevitavelmente existem em alvenarias, a resistência aos sais solúveis deve ser a maior possível;
- As resistências mecânicas devem conseguir suportar a ação anterior e outras, tais como ações de gelo/degelo e ações devido a choques;
- As argamassas devem fazer presa num período de tempo curto, por forma a impedir deteriorações devido a resistências mecânicas iniciais fracas.

Argamassas correntes têm sido escolhidas para intervenções em alvenarias de edifícios antigos, como, por exemplo, as argamassas de cimento. Estas não são a escolha mais apropriada para tal devido a vários aspetos, tais como: o aspeto final da superfície, a presença de sais solúveis no seu interior que posteriormente migram para o suporte, rigidez excessiva e capacidade limitada de permitir a secagem da parede sobre a qual está colocada. Por outro lado, as argamassas que mais se aproximam das vernaculares são as argamassas de cal aérea. Estas permitem assegurar a compatibilidade estética e funcional com os materiais pré-existentes. No entanto, estas argamassas têm vindo a apresentar problemas de durabilidade, principalmente quando expostas à chuva e, ainda mais, ao gelo (Veiga 2003).

Na escolha de uma argamassa para rebocos de edifícios antigos, as características a ter em conta podem ser agrupados em dois grupos (Henriques et al. 2008):

- Características que garantem a proteção da parede:
 - Absorção e evaporação de água;
 - Resistências mecânicas;
 - Libertação de sais solúveis;
 - Estabilidade dimensional.
- Características que previnem a degradação das argamassas:
 - Resistência aos sais solúveis;
 - Resistência ao gelo/degelo;
 - Evaporação de água;
 - Resistências mecânicas (incluindo tempo de presa).

Assim, é necessário ter em conta todos estes aspetos na escolha de uma argamassa de revestimento para um edifício antigo.

Algumas destas características possuem valores recomendados para que, quando cumpridos, possam ter melhor eficácia. Relativamente a argamassas a aplicar em edifícios antigos, como gama de valores que se pode ter em conta surge a apresentada na Tabela 2.4 (Veiga 2010). Esta gama de valores foi estabelecida com base em experiência na área sendo portanto meramente indicativa.

Tabela 2.4 – Requisitos estabelecidos para as características, aos 90 dias, das argamassas de revestimento para edifícios antigos (Veiga 2010)

| Função | Características mecânicas aos 90 dias | | | Comportamento com a água |
|------------------------|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------|---|
| | Rt [N/mm ²] | Rc [N/mm ²] | Ed [N/mm ²] | CC [kg/(m ² .min ^{1/2})] |
| Reboco exterior | 0,2-0,7 | 0,4-2,5 | 2000-5000 | <1,5; >1,0 |
| Reboco interior | 0,2-0,7 | 0,4-2,5 | 2000-5000 | - |
| Refechamento de juntas | 0,4-0,8 | 0,6-3,0 | 3000-6000 | <1,5; >1,0 |

A norma EN 998-1 (CEN 2010) define também algumas gamas de valores que as argamassas para rebocos devem possuir, não sendo estas específicas para edifícios antigos:

Tabela 2.5 - Classificação para as propriedades de argamassas no estado endurecido EN 998-1 (CEN 2010)

| Propriedades | Categoria | Valores |
|--------------------------------------|-----------|--|
| Resistência à compressão aos 28 dias | CS I | 0,4 a 2,5 MPa |
| | CS II | 1,5 a 5,0 MPa |
| | CS III | 3,5 a 7,5 MPa |
| | CS IV | ≥ 6 MPa |
| Absorção de água por capilaridade | W 0 | Não especificado |
| | W 1 | CC ≤ 0,40 kg/(m ² .min ^{1/2}) |
| | W 2 | CC ≤ 0,20 kg/(m ² .min ^{1/2}) |
| Condutibilidade térmica | T 1 | ≤ 0,1 W/m.K |
| | T 2 | ≤ 0,2 W/m.K |

Um fator que influencia fortemente a durabilidade e comportamento de uma argamassa de revestimento é a sua aplicabilidade, ou seja, a sua técnica de aplicação. Desta forma, é importante referir os seguintes aspetos (Veiga 2003):

- A quantidade de água introduzida no processo de amassadura deve ser minimizada, o que conduz a uma argamassa mais consistente. Embora se torne mais difícil de aplicar, resulta num revestimento mais compacto, com maior capacidade resistente, menor tendência para fissurar e menor absorção de água;
- É preferível que a amassadura seja realizada manualmente ou com berbequim, evitando a betoneira;
- Por forma a garantir maior compactidade e menor suscetibilidade à fendilhação, é importante apertar a argamassa contra o suporte;
- Um maior número de camadas, de menor espessura cada uma, diminui as tensões de retração, e também a fissuração. Consegue-se também melhorar a capacidade de impermeabilização;

- Uma forte exposição solar facilita o endurecimento da argamassa mas também poderá aumentar a fissuração. Por outro lado, uma fraca exposição solar atrasa a carbonação e compromete o comportamento a longo prazo.

2.5 Argamassas de Cal Aérea

A cal é um dos materiais de construção mais antigos. Anteriores a este foram utilizados, provavelmente, apenas a pedra, a terra, o gesso e a madeira (Margalha 2011). No sul de Portugal, recorre-se tradicionalmente ao uso da cal para revestimento de paredes de habitações. Ainda em muitas aldeias se utiliza a expressão caiar que consiste na aplicação de uma pintura com leite de cal anualmente (ou perto) nas paredes das habitações.

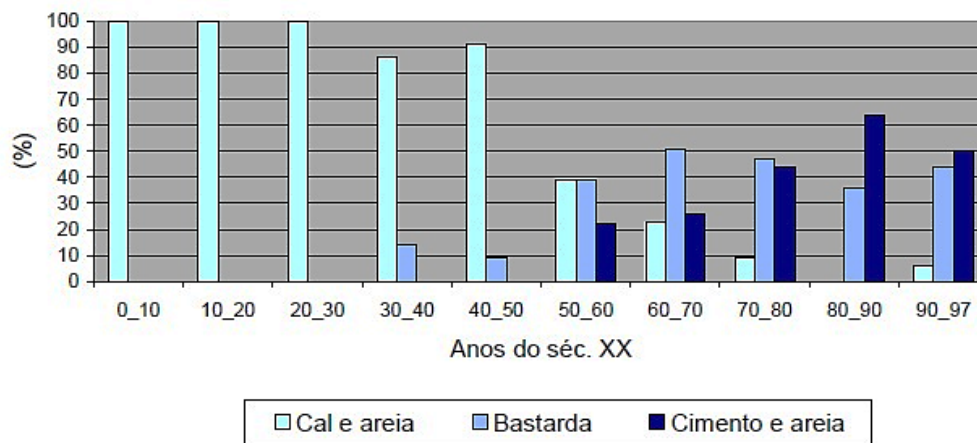


Figura 2.2 - Uso de argamassas tradicionais de cal, bastardas e de cimento no Alentejo (Margalha 2011)

Como já mencionado anteriormente, o surgimento da indústria do cimento alterou todo o setor da construção. No entanto, só começou a ser realmente utilizado no Alentejo a partir dos anos 50-60 do século XX (Margalha 2011). Uma das principais características que tornou a utilização do cimento na construção tão famosa foi a rápida capacidade de ganhar resistência em poucos dias após a sua aplicação.

Inicialmente o cimento era adicionado às tradicionais argamassas de cal aérea, formando assim as argamassas bastardas (que possuem dois tipos de ligantes na sua constituição). Como se pode ver pelo gráfico da Figura 2.2, a utilização da cal aérea foi-se dissipando a partir dos anos 60 e 70, colocando o cimento na preferência de escolha dos construtores na produção de argamassas.

Estas argamassas possuem características muito próprias podendo enumerar-se algumas delas. Comparativamente a argamassas de cimento (Faria et al. 2008):

- Possuem baixas resistências mecânicas e demoram bastante tempo a adquiri-las;
- Podem ter baixa aderência a alguns suportes;
- Como perdem muita água no processo de cura, possuem grande retração inicial, mas podem e devem ser reapertadas algumas horas após aplicadas, após ter ocorrido a retração de secagem;
- A sua deformabilidade é boa;
- Possuem grande absorção capilar mas grande facilidade de secagem;
- A resistência à ação mecânica de sais solúveis é baixa mas não brusca;

- Apresentam dificuldades em formar presa em ambientes muito húmidos, devido à fraca presença de CO₂.

As cals aéreas podem ter origem cálcica ou dolomítica, sendo a designação para ambas de CL e DL respetivamente (IPQ 2011). Estas não endurecerem na presença de água por não possuírem propriedades hidráulicas.

Todo o processo de produção de cal aérea passa por duas fases: calcinação e hidratação. O processo de endurecimento da cal denomina-se de carbonatação.

A cal aérea obtém-se através da cozedura de rochas cálcicas, mais propriamente de carbonato de cálcio (CaCO₃). Esta primeira etapa designa-se de calcinação, e ocorre entre os 800°C e 900°C (Margalha 2011). O carbonato de cálcio decompõem-se em dióxido de carbono (CO₂) que é libertado para o ar, e em óxido de cálcio (CaO), também conhecido com cal viva (Faria 2004a).

A segunda fase do processo é a hidratação da cal viva. Em contacto com água, o óxido de cálcio transforma-se em hidróxido de cálcio (Faria 2004a). O hidróxido de cálcio proveniente desta reação também é conhecido como cal apagada, cal extinta ou mesmo cal hidratada.

O processo de endurecimento da cal aérea denomina-se de carbonatação. Como já referido, a cal aérea precisa de estar em contacto com o ar (CO₂) para se realizarem as reações de carbonatação. A cal hidratada proveniente da fase anterior através da recarbonatação com o dióxido de carbono presente na atmosfera reconstitui a composição química da pedra de que é proveniente, ou seja, transforma-se novamente em carbonato de cálcio (Faria 2004a). Deste modo, o endurecimento da cal aérea rege-se pela lenta reação com o dióxido de carbono. Tendo em conta que o processo de endurecimento de cal aérea liberta água, na produção de argamassas com este tipo de ligante deve ser introduzida a menor quantidade de água possível. Este processo (de carbonatação) pode ser afetado por diversos fatores: concentração de CO₂ (quanto maior a concentração mais rápida é a reação); o aumento de temperatura; humidade relativa superior a 95% causa condensação nos poros do material e agrava a permeabilidade ao CO₂ (Pavlik et al. 2012).

Alguns dos resultados obtidos por outros autores relativamente a argamassas de cal aérea encontram-se nas Tabelas 2.6 (em que foram utilizadas as mesmas misturas de areias e argamassas submetidas a cura a 95% de humidade relativa) e 2.7 (em que foram utilizadas areias e curas distintas).

Tabela 2.6 – Resultados de argamassas com a mesma cal aérea e mistura de areias com 90 dias de idade (Branco 2013)

| Autor | Traço | Rel Ag/Lig | Esp. [mm] | Ed [MPa] | Rt [MPa] | Rc [MPa] | CC [kg/(m ² min ^{0,5})] | VA [kg/m ²] | IS [-] | TS [kg/(m ² h)] | P _{ab} [%] |
|--------------------|-------|------------|-----------|----------|----------|----------|--|-------------------------|--------|----------------------------|---------------------|
| Branco 2013 | 1:3 | 2,6 | 153 | 3191 | 0,24 | 0,41 | 1,14 | 17,8 | 0,27 | 0,16 | 31 |

Tabela 2.7 – Propriedades mecânicas de argamassas de cal aérea com distintas areias aos 90 dias (Faria 2004a, Veiga 2003)

| Autor | Traço | Ed [MPa] | Rt [MPa] | Rc [MPa] |
|---------------------|-------|----------|----------|----------|
| *Faria 2004a | 1:3 | 2300 | 0,33 | 0,65 |
| Veiga 2003 | | 4098 | 0,34 | 1,28 |

*Condições de cura: temperatura de 23 ± 3°C e humidade relativa de 50 ± 5%.

2.6 Argamassas de Terra

As chamadas argamassas de terra podem ser utilizadas tanto para assentamento de paredes, como no seu revestimento. Este tipo de argamassas era bastante utilizado na época da arquitetura vernácula portuguesa. Nesse tipo de arquitetura as argamassas de terra eram habitualmente usadas no assentamento de alvenarias de pedra, enquanto os rebocos de argamassas de terra eram aplicados em paredes interiores (Fernandes 2008). Nas paredes exteriores eram frequentes argamassas de cal ou mistas de cal e terra (Faria 2005).

Ao contrário das argamassas de cal e das argamassas de cimento, nos dias de hoje há muito pouca informação sobre argamassas com terra, tanto relativamente às suas propriedades, como aos seus comportamentos. Consequentemente, ao serem construídos ou reabilitados edifícios com paredes de terra, há um risco de eventuais anomalias prematuras. Em projetos de reabilitação de edifícios de terra, ao intervir-se de uma forma inadequada, podem surgir mais e mais graves problemas do que os previamente existentes. Um exemplo de uma má intervenção em construções de terra é a escolha de revestimentos de argamassas de ligantes hidráulicos (com base em cimento) (Faria 2004c). Na elaboração de um reboco para paredes de terra, não deve ser utilizado cimento; há quem defenda um teor de cimento máximo de 10% (Bouwens 2005), pois o cimento expande quando aquecido e a terra tem tendência a retrair. Estes movimentos diferenciais provocam fendilhações e consequentemente entrada de água.

Existem também no mercado, nacional e internacional, argamassas predoseadas com terra e começam a surgir projetos de normas, por exemplo alemãs, sobre argamassas de terra para rebocos e para assentamento de alvenarias.

A simplicidade destas argamassas provém de há muitas décadas, da época em que as habitações eram exclusivamente construídas à base de terra ou/e em que havia dificuldade de obtenção de ligantes correntes. Tanto argamassas de assentamento como argamassas de revestimento eram constituídas basicamente por terra existente nas proximidades, água, e eventualmente algumas adições como fibras ou mesmo cal. Não existe uma receita para estas argamassas, uma vez que dependem das características do solo, que varia muito de região para região. Uma das principais vantagens dos rebocos realizados com argamassas de terra é a sua elevada higroscopicidade, que lhe permite absorver e libertar vapor de água, equilibrando a humidade relativa dos ambientes interiores (Lima 2013).

Alguns estudos têm sido realizados sobre este tema, pretendendo avaliar o comportamento de argamassas de terra com eventuais adições de fibras, cal aérea ou cal hidráulica. Um desses estudos (Gomes et al. 2012b), que pretende desenvolver argamassas para a reparação de anomalias de paredes de taipa, avalia estes aspetos, e a formulação de argamassas apresenta-se na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Composição das argamassas (Gomes et al. 2012 b)

| Grupo | Designação da argamassa | Traço Vol. | Ligante | |
|---|-------------------------|-------------------------------------|----------------|----------------------|
| | | | Cal Aérea (%)* | Fibras cânhamo (%) * |
| Terra-padrão e areia | MRE | 1:3 (terra-padrão: areia grossa) | - | - |
| Terra-padrão e areia com fibras | MRE_F | | - | 5 |
| Terra-padrão e areia com cal aérea | MRE_AL5 | | 5 | - |
| | MRE_AL10 | | 10 | - |
| | MRE_AL15 | | 15 | - |
| Terra-padrão e areia com cal aérea e fibras | MRE_AL5_F | | 5 | 5 |
| | MRE_AL10_F | | 10 | 5 |
| | MRE_AL15_F | | 15 | 5 |

* Percentagem relativa à massa da terra-padrão.

Os resultados obtidos com estas argamassas encontram-se na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Resultados de diversos ensaios (Gomes et al. 2012 b)

| Argamassas | Esp. [mm] | Massa volúmica [kg/m ³] | Retração (%) | | CC [kg/(m ² .s ^{1/2})] | IS [-] | Ed [MPa] | Rt [MPa] | Rc [MPa] |
|------------|-----------|-------------------------------------|--------------|------|---|--------|----------|----------|----------|
| | | | Lin. | Vol. | | | | | |
| MRE | 170 | 1872 | 1,15 | 4,06 | 0,138 | 0,122 | 1065 | 0,17 | 0,51 |
| MRE_F | 170 | 1783 | 0,90 | 0,95 | 0,26 | 0,130 | 967 | 0,14 | 0,47 |
| MRE_AL5 | 172 | 1873 | 1,59 | 7,83 | 0,226 | 0,139 | 576 | 0,08 | 0,11 |
| MRE_AL10 | 172 | 1871 | 1,77 | 6,39 | 0,473 | 0,156 | 609 | 0,11 | 0,20 |
| MRE_AL15 | 170 | 1854 | 1,36 | 6,21 | 0,509 | 0,154 | 683 | 0,13 | 0,28 |
| MRE_AL5_F | 165 | 1787 | 0,48 | 4,18 | 0,208 | 0,154 | 532 | 0,06 | 0,25 |
| MRE_AL10_F | 163 | 1776 | 0,23 | 6,03 | 0,339 | 0,173 | 551 | 0,08 | 0,31 |
| MRE_AL15_F | 163 | 1770 | 0,27 | 6,02 | 0,465 | 0,184 | 597 | 0,12 | 0,45 |

É de notar que estas argamassas são maioritariamente constituídas por uma terra argilosa e areia grossa e, quando existe cal aérea, esta está presente em muito baixa percentagem; daí serem consideradas argamassas de terra. Tal como as argamassas de cal aérea, não são iguais às utilizadas nesta dissertação. No entanto podem ser utilizados para comparação de resultados.

2.7 Argamassas de Cal Aérea e Terra

Nos capítulos anteriores foram descritas argamassas de cal aérea e argamassas de terra, que se podem considerar “limites” das argamassas analisadas experimentalmente nesta dissertação. Durante a pesquisa bibliográfica realizada foi possível notar a enorme lacuna que existe sobre argamassas de cal aérea e terra. Assim sendo, poucos foram os artigos encontrados que descrevessem este tipo de argamassas.

Argamassas com introdução de terra poderão ser mais eficientes para reparações de anomalias em construções de terra do que as argamassas convencionais só de cal aérea e muito mais compatíveis que as de cimento. No entanto, também é possível que sejam apropriadas para outros tipos de aplicações, sobre outros tipos de suportes, como sejam alvenarias antigas argamassadas.

A campanha experimental que se apresenta de seguida procura contribuir para um melhor conhecimento relativo a algumas destas questões.

3 Planeamento da Campanha Experimental

3.1 Introdução

Tal como referido inicialmente, a presente dissertação pretende avaliar o comportamento de argamassas de cal aérea com substituições de terra. Ao retirar-se uma percentagem de agregado fino e introduzir outro tipo de material com diferente granulometria e características (neste caso a terra) as partículas reajustam-se, formando um novo agrupamento de partículas, desenvolvendo eventuais novas reações. Assim, toda a granulometria da mistura de agregados e ligante fica alterada. Estando a retirar um componente da argamassa relativamente fraco em termos de reação (agregado fino) e a substituí-lo por uma terra argilosa com algum poder aglutinante, algumas das propriedades das argamassas vão alterar-se; pretende-se avaliar em que medida e em que sentido ocorrem essas alterações.

Foram produzidas e ensaiadas cinco argamassas diferentes, cada uma delas com um traço diferente. Estas argamassas são constituídas por um ligante aéreo (cal aérea) e três areias distintas, com diferentes granulometrias, sendo da mais fina para a mais grossa as areias APAS 30, APAS 20 e APAS 12. As percentagens de massa de terra utilizadas são de 0, 5, 10, 15 e 25%, substituindo a respetiva massa de agregado fino, a areia APAS 30. Por exemplo, na argamassa com 5% de terra, retira-se 5% da massa da areia fina e introduz-se a massa equivalente de terra.

Para a campanha de ensaios em estado endurecido foram moldados provetes prismáticos para cada argamassa e realizados provetes de argamassa de revestimento em suporte de tijolo furado convencional. Efetuou-se também a aplicação de um reboco de duas das argamassas (a padrão, só de cal e uma com terra, que demonstrou boas características de aplicabilidade no estado fresco – no caso, a argamassa com 10% de substituição de agregado fino) sobre um murete de taipa localizado no exterior, no Campus da Caparica da FCT UNL, exposto às adversidades climáticas, conseguindo assim, aferir o comportamento como reboco em condições de cura mais aproximadas das reais (não são absolutamente reais uma vez que o murete contacta com o ambiente dos dois lados, enquanto numa situação real, uma das faces estaria em ambiente interior).

Algumas características dos suportes sobre os quais foram aplicadas as argamassas (no caso, o tijolo furado e o murete de taipa) foram avaliadas.

Por forma a fortalecer a informação sobre este tipo de argamassas com terra, todo o processo de amassadura com as diferentes percentagens de adição de terra foi mantido e repetido. Desta forma, foram obtidos resultados a duplicar de caracterização das argamassas no estado fresco (primeira fase e segunda fase de amassaduras).

Como grande parte dos ensaios realizados em estado endurecido são destrutivos para os provetes, as argamassas provenientes da primeira fase de amassadura foram ensaiadas aos 90 dias, enquanto as argamassas provenientes da segunda fase de amassadura serão ensaiadas em

estado endurecido a idade mais avançada. Estes ensaios só serão descritos e analisados em estudos posteriores à presente dissertação, uma vez que este período de tempo ultrapassa a sua data de entrega.

3.2 Etapas da Campanha Experimental

De modo a facilitar a organização da campanha experimental, esta foi dividida em quatro etapas distintas: caracterização dos suportes, caracterização dos constituintes das argamassas, ensaios às argamassas em estado fresco e ensaios às argamassas em estado endurecido.

3.2.1 Caracterização dos Suportes

Tendo em conta que a avaliação do comportamento das argamassas passa pela colocação das mesmas em dois tipos distintos de suporte (tijolo convencional e murete de taipa) tornou-se indispensável a sua caracterização. Assim, foram realizados ensaios, com base em normas ou especificações de ensaio indicadas na Tabela 3.1, por forma a melhor compreender os comportamentos futuros do conjunto suporte e argamassa.

Tabela 3.1 – Ensaios de caracterização de suportes

| Material | Ensaio | Norma/Especificação |
|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| Tijolo furado 20x30x7 (cm) | Condutibilidade térmica | Esp. Equipamento |
| | Absorção de água sob pressão | Fe Pa 39 LNEC |
| Murete de taipa | Condutibilidade térmica | Esp. Equipamento |
| | Dureza superficial por durómetro | ASTM D2240 (2000) |
| | Dureza superficial por esclerómetro | ASTM C805 (2008) |
| | Absorção de água sob pressão | Fe Pa 39 LNEC |

Nas Figuras 3.1 e 3.2 encontram-se várias vertentes do murete de taipa localizado no Campus da Faculdade e o aspeto de um tijolo convencional, respetivamente.

O alçado do murete utilizado tem frente orientada para Este. A construção deste foi realizada nos dias 2 e 3 de Junho de 2012. Visto que a construção se procedeu num período de tempo seco, todo o murete conseguiu secar completamente. O material utilizado na construção foi uma mistura de duas terras distintas compradas à empresa TranSobreda. Relativamente à composição das terras, é possível relatar que uma delas possui características de uma terra siltosa e outra de terra argilosa.



Figura 3.1 – Aspeto geral do murete de taipa



Figura 3.2 – Tijolo furado

3.2.2 Caracterização dos Constituintes das Argamassas

Os constituintes utilizados nas argamassas são: três areias de granulometrias distintas, cal aérea e terra argilosa. Antes da realização das argamassas em si, foi necessário proceder à sua caracterização (Tabela 3.2). A baridade das areias e da cal aérea já era conhecida.

Tabela 3.2 – Ensaios de caracterização dos constituintes das argamassas

| Material | Ensaio | Norma |
|----------------|------------------------|--------------------------|
| Terra argilosa | Análise granulométrica | NP EN 933-1 (IPQ 2000b) |
| | Baridade | NP EN 1097-3 (IPQ 2002a) |

3.2.3 Ensaios às Argamassas em Estado Fresco

Nesta fase da campanha experimental as argamassas realizadas com diferentes traços foram caracterizadas no seu estado fresco. Assim, para cada um dos cinco traços, foram realizados diversos ensaios (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Ensaios realizados às argamassas em estado fresco

| Material | Ensaio | Norma/Especificação |
|-----------------------------|-------------------------------|--|
| Argamassas em estado fresco | Consistência por espalhamento | EN 1015-3 (CEN 1999a) |
| | Retenção de água | Fe 32 UNL/DEC e prEN 1015-8 (CEN 1999) |
| | Teor em ar | EN 1015-7 (CEN 1998c) |
| | Massa volúmica | EN 1015-6 (CEN 1998b) |

3.2.4 Caracterização das Argamassas em Estado Endurecido

Os ensaios realizados nesta etapa incidiram sobre argamassas em estado endurecido, em provetes prismáticos, nos revestimentos com uma camada de argamassa realizados sobre os tijolos e em rebocos de duas camadas de argamassa realizados sobre o murete de taipa. As normas e especificações de ensaio com base nas quais foram realizados os ensaios estão indicadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Ensaio realizados às argamassas em estado endurecido

| Material | Ensaio | Norma/Especificação |
|--|--|---|
| Provetes prismáticos 40x40x160 (mm) | Variações dimensionais e massa volúmica aparente | EN 1015-10 (CEN 1999b) |
| | Condutibilidade térmica | Esp. Equipamento |
| | Módulo de elasticidade dinâmico | EN 14146 (CEN 2007) |
| | Resistência à tração por flexão | EN 1015-11 (CEN 1999b) |
| | Resistência à compressão | EN 1015-11 (CEN 1999b) |
| | Absorção de água por capilaridade | EN 1015-18 (CEN 2002) e EN 15801 (CEN 2009) |
| | Secagem | Test No. II.5 (RILEM 1980) |
| | Porosidade aberta e massa volúmica aparente | NP EN 1936 (IPQ 2008) |
| | Porosimetria de mercúrio | Rato 2006* |
| | Resistência aos sulfatos | NP EN 12370 (IPQ 2001) |
| Provetes em suporte de tijolo | Velocidade de propagação de ultra-sons | NP EN 12504-4 (IPA 2010) e Fe Pa 43 LNEC |
| | Dureza superficial por durómetro | ASTM D2240 |
| | Absorção de água sob baixa pressão | Fe Pa 39 LNEC |
| | Condutibilidade térmica | Esp. Equipamento |
| | Porosimetria de mercúrio | Rato 2006* |
| Reboco no murete de taipa | Ultra-sons | NP EN 12504-4 (IPQ 2010) e Fe Pa 43 LNEC |
| | Dureza superficial por esclerómetro | ASTM C805 |
| | Dureza superficial por durómetro | ASTM D2240 |
| | Absorção de água sob baixa pressão | Fe Pa 39 LNEC |
| | Porosimetria de mercúrio | Rato 2006* |

*Ensaio com base nos procedimentos descritos Rato 2006

4 Constituintes, Argamassas e Provetes

Neste capítulo são descritos detalhadamente todos os constituintes que foram utilizados na produção das argamassas: as areias, a terra, a cal aérea e a água adicionada. São também apresentados os valores já existentes e fornecidos de alguns dos constituintes. Finalmente são apresentados os procedimentos de realização das argamassas, preparação de provetes e condições de cura.

4.1 Constituintes das argamassas

4.1.1 Agregados Principais: Areias

Foram utilizados três tipos de areias siliciosas lavadas e graduadas de diferentes granulometrias: APAS12, APAS20 e APAS30. Na argamassa de referência foram utilizadas na proporção volumétrica de 1:1,5:1,5, respetivamente. Sendo a APAS 30 a areia com granulometria mais fina, foi este o agregado a ser substituído por percentagens crescentes de terra argilosa. Os valores característicos das areias (baridade e análises granulométricas individualizadas e da mistura das mesmas) foram determinados anteriormente por outros autores, no âmbito de trabalhos desenvolvidos dos projetos LIME-CONTECH e METACAL. Os valores das baridades das três areias e da mistura de areias encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Baridades das três areias e da mistura

| Material | Baridade [kg/dm ³] |
|----------|--------------------------------|
| APAS12 | 1,412 |
| APAS20 | 1,405 |
| APAS30 | 1,388 |
| Mistura | 1,463 |

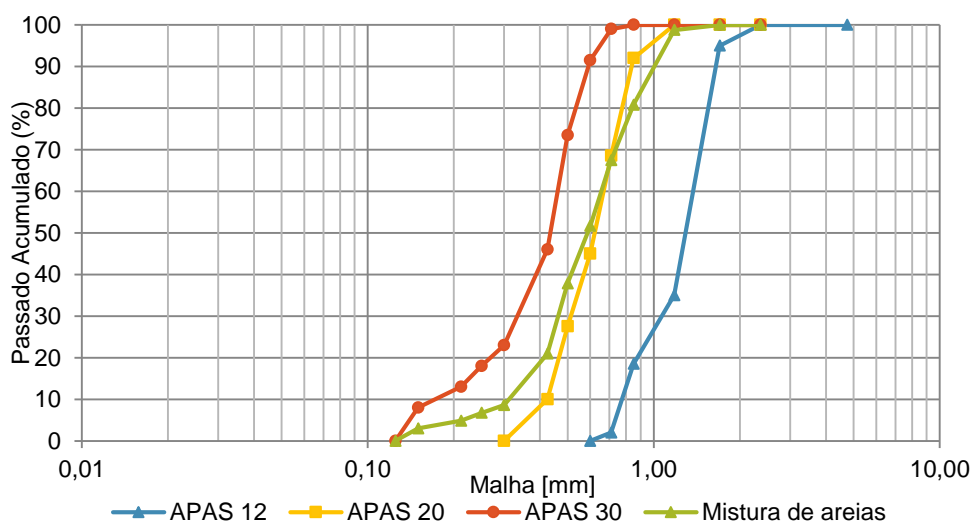


Figura 4.1 – Curva granulométrica das três areias individualizadas e da mistura

As curvas granulométricas de cada areia e da mistura de areias na proporção volumétrica de 25% de APAS12 para 37,5% de APAS 20 para 37,5% APAS 30 encontram-se na Figura 4.1.

Observando o conjunto das curvas é possível verificar a diferente granulometria das três areias, da esquerda para a direita (APAS 30, APAS 20, APAS12) respetivamente da mais fina para a mais grossa. Na Figura 4.2 é possível distinguir as três granulometrias dos três agregados.



Figura 4.2 – Três areias, da mais fina para a mais grossa (APAS30, APAS20 e APAS12)

4.1.2 Agregado Parcial: Terra

Como referido no ponto 1.2 a terra utilizada nesta dissertação foi também utilizada num estudo anterior (Gomes et al. 2012a), desenvolvido no âmbito de um doutoramento em curso. A terra argilosa foi disponibilizada pela Sorgila, e foi sujeita a uma moagem em moinho de maxilas, para desagregar torrões, e posteriormente homogeneizada como auxílio de um repartidor. No âmbito do estudo referido a terra foi caracterizada através da determinação da sua curva granulométrica por via húmida, baridade e composição mineralógica. Assim sendo, os valores obtidos nesse estudo foram utilizados nesta dissertação.

De acordo com Gomes et al. (2012) a baridade calculada da terra a utilizar é 1136,4 kg/m³. Este material foi também submetido a uma análise de difração de raio X de modo a determinar-se a sua composição mineralógica. Os resultados desta análise encontram-se na Tabela 4.2. A curva granulométrica por via húmida encontra-se na Figura 4.3.

Tabela 4.2 – Composição mineralógica da terra por análise de XRD (Gomes et al. 2012a)

| Compostos cristalinos identificados | Terra-padrão |
|-------------------------------------|--------------|
| Quartzo | +++ |
| Feldspatos | Vtg |
| Mica | Vtg |
| Clorite | ? |
| Caulinite | ++ |
| Geotite | + |
| Anatase | +/Vtg |

Notação: +++ proporção elevada; ++ proporção média; + proporção fraca; Vtg vestígios; ? Dúvidas na presença; - não identificado.

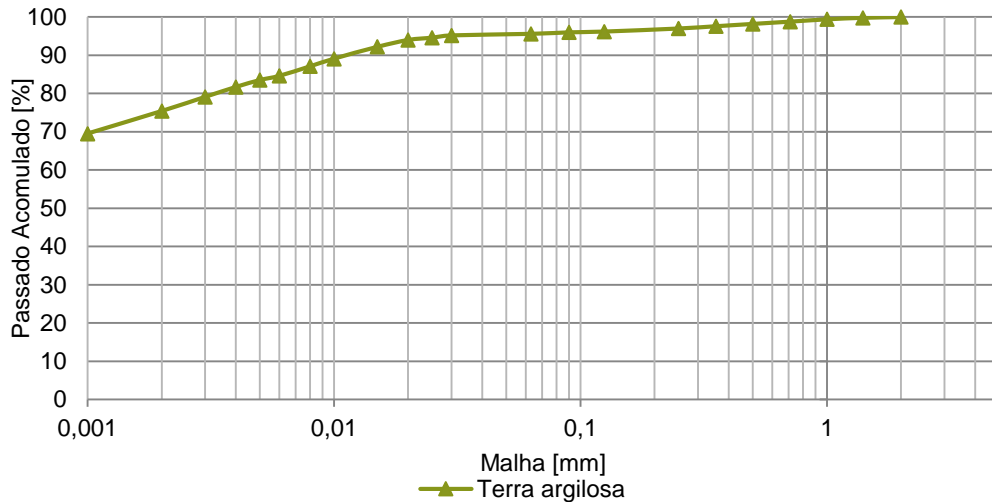


Figura 4.3 – Curva granulométrica da terra argilosa por via húmida (Gomes et al. 2012a)

Apesar de serem disponibilizados valores de referência característicos da terra, optou-se por repetir alguns deles. A baridade foi determinada novamente, assim como a análise granulométrica (desta vez por via seca). Ambos estes ensaios são descritos no ponto 5.2.

Embora tenha sido realizada a curva granulométrica de terra argilosa por via seca, este resultado não mostrou eficácia. A diferença entre uma análise granulométrica por via húmida e a seco reside no facto de a primeira proceder primeiramente à desagregação dos torrões encontrados no material em questão (neste caso a terra argilosa). Deste modo, uma análise granulométrica por via seca para este tipo de material não é apropriada, visto que este possui uma grande quantidade de torrões. Este facto foi verificado no manuseamento da terra, pois era possível desagregar os torrões facilmente. Na Figura 4.4 é possível observar esta heterogeneidade de granulometria da terra.

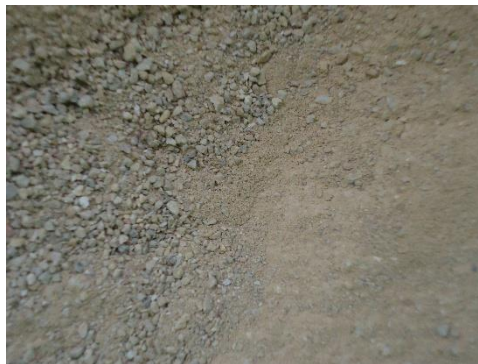


Figura 4.4 – Pormenor da terra argilosa

4.1.3 Cal Aérea

O ligante utilizado nas argamassas deste estudo é uma cal aérea hidratada em pó, da marca Lusical, que foi disponibilizada pelo produtor.

A composição química da cal aérea utilizada foi analisada pelo Mestre André Gameiro (em artigo submetido em 2012), no âmbito de uma bolsa do projeto METACAL. Esta composição encontra-se na Tabela 4.3. A baridade da cal aérea é $0,362 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 4.3 – Composição química da cal aérea (Gameiro et al. 2012 b)

| Material (%) | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | P ₂ O ₆ | L.O.I.* |
|--------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------|---------|
| Cal aérea | - | 0,01 | 0,15 | 0,01 | 3,09 | 76,74 | - | 0,02 | 0,04 | 0,01 | 20,45 |

*Loss on ignition (perda ao fogo)

Comparando os valores de composição química da cal aérea com os valores de referência mencionados na norma NP EN 459-1 (IPQ 2011) verifica-se que esta se encontra dentro dos parâmetros, respeitando assim a norma - classificada como CL90 (CL).



Figura 4.5 – Cal aérea hidratada em pó Lusical H100

4.1.4 Água

A água adicionada em cada argamassa foi proveniente da rede pública. É sabido que a quantidade de água introduzida no processo de amassadura de uma argamassa tem grande influência nas características físicas, na trabalhabilidade e na sua aplicação, especialmente neste tipo de argamassas com terra que são fortemente influenciadas pela água devido à presença de argila na sua constituição (Gomes et al. 2012c). Assim, a quantidade de água adicionada na amassadura de cada traço de argamassa foi escolhida cuidadosamente tendo em consideração um espalhamento de 150 ± 5 mm, verificando-se caso a caso qual a melhor quantidade.

4.2 Argamassas – Traços e Quantidades

Para cada percentagem de terra a adicionar, foram determinadas as quantidades dos constituintes alterados com esta modificação, ou seja, foi determinada a quantidade de agregado fino retirado e a quantidade de terra adicionada, tendo estas as mesmas massas. As quantidades dos restantes constituintes (outras duas areias e cal aérea) permaneceram inalteradas.

Inicialmente as percentagens de terra programadas eram 5, 10, 25 e 50%. No entanto, durante o procedimento de amassadura verificou-se que a argamassa com 25% de terra apresentava pouca trabalhabilidade. Deste modo optou-se por não se acrescentar mais terra, eliminando a percentagem de introdução de 50% e realizar uma argamassa intermédia com 15% de terra.

Com o intuito de acompanhar a quantidade de terra introduzida nas argamassas foi determinada a relação em massa água/terra. Esta relação encontra-se juntamente com as quantidades dos constituintes das argamassas na Tabela 4.4. Os traços ponderais e volumétricos encontram-se nas Tabelas 4.5.

Tabela 4.4 – Dosagens dos constituintes das argamassas

| Argamassa | Massa [g] | | | | | Água [ml] | Relação água/terra [-] |
|--------------|-----------|-------|--------|--------|-------|-----------|------------------------|
| | Ar 12 | Ar 20 | Ar 30 | Argila | CL | | |
| CL3 | 1129,6 | 1686 | 1665,6 | 0 | 386,1 | 975 | - |
| CL3_5t(ArF) | 1129,6 | 1686 | 1582,3 | 83,3 | 386,1 | 1000 | 12,0 |
| CL3_10t(ArF) | 1129,6 | 1686 | 1499,0 | 166,5 | 386,1 | 1000 | 6,0 |
| CL3_15t(ArF) | 1129,6 | 1686 | 1415,8 | 249,8 | 386,1 | 1000 | 4,0 |
| CL3_25t(ArF) | 1129,6 | 1686 | 1249,2 | 416,4 | 386,1 | 1075 | 2,6 |

Tabela 4.5 – Traços ponderais e volumétricos

| Argamassa | Traços ponderais | | Traços volumétricos | |
|--------------|------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------|
| | CL: t : Ar | CL: t : Ar12 : Ar20 : Ar30 | CL: t : Ar | CL: t : Ar12 : Ar20 : Ar30 |
| CL3 | 1:0:11,6 | 1:0:2,9:4,4:4,31 | 1:0:3 | 1:0:1,1:1,13 |
| CL3_5t(ArF) | 1:0,2:11,4 | 1:0,22:2,9:4,4:4,10 | 1:0,07:2,94 | 1:0,07:0,8:1,1:1,07 |
| CL3_10t(ArF) | 1:0,4:11,2 | 1:0,43:2,9:4,4:3,88 | 1:0,14:2,89 | 1:0,14:0,8:1,1:1,01 |
| CL3_15t(ArF) | 1:0,6:11,0 | 1:0,65:2,9:4,4:3,67 | 1:0,22:2,83 | 1:0,22:0,8:1,1:0,96 |
| CL3_25t(ArF) | 1:1,1:10,5 | 1:1,08:2,9:4,4:3,24 | 1:0,36:2,72 | 1:0,36:0,8:1,1:0,84 |

CL: Cal aérea; t: terra argilosa; Ar12: agregado APAS12, Ar20: agregado APAS20, Ar30: agregado APAS30

Para cada um dos traços em estudo (cinco traços com diferentes quantidades de terra) foram realizados 9 provetes prismáticos, em três moldes triplos, e uma aplicação em suporte de tijolo. Para ir de encontro a estas quantidades, foi necessário realizar duas amassaduras para cada uma das argamassas, de modo a que a quantidade produzida de argamassa fosse suficiente, tanto para os ensaios em estado fresco, como para a realização dos provetes (prismáticos e em suporte de tijolo convencional).

As designações atribuídas às diferentes argamassas tiveram em conta o traço volumétrico, a percentagem de terra substituída e a parcela que foi substituída, ou seja:

- **CL3:** Argamassa de cal aérea (ao traço volumétrico 1:3) de referência, ou seja, sem qualquer terra (também designada I1);
- **CL3_5t(ArF):** Argamassa de cal aérea (ao traço volumétrico 1:3) com 5% de massa de terra em substituição de igual parcela de areia fina (também designada I2);
- **CL3_10t(ArF):** Argamassa de cal aérea (ao traço volumétrico 1:3) com 10% de massa de terra em substituição de igual parcela de areia fina (também designada I3);
- **CL3_15t(ArF):** Argamassa de cal aérea (ao traço volumétrico 1:3) com 15% de massa de terra em substituição de igual parcela de areia fina (também designada I4);
- **CL3_25t(ArF):** Argamassa de cal aérea (ao traço volumétrico 1:3) com 25% de massa de terra em substituição de igual parcela de areia fina (também designada I5).

4.3 Produção e Preparação dos Provetes

Esta fase da campanha experimental é de extrema importância, pois tanto a produção em si das argamassas, como a preparação dos provetes, são passos cruciais, em que o mínimo erro pode alterar e influenciar os resultados finais.

4.3.1 Amassadura

Os procedimentos referentes a amassaduras de argamassas tiveram por base a norma europeia EN 1015-2 (CEN 1998a) embora com algumas alterações, e seguiram rigorosamente os procedimentos definidos no âmbito do projeto METACAL (Faria 2011). O primeiro passo da fase da amassadura das argamassas foi pesar os seus constituintes. Tal como referido, as argamassas são constituídas por cinco constituintes, excetuando a argamassa de referência que tem apenas quatro. Deste modo e, respeitando as quantidades definidas na Tabela 4.4, pesaram-se as três areias, a terra e a cal (por esta mesma ordem). Para tal foi utilizada uma balança com precisão de 0,1g (Figura 4.6 a). Depois do tabuleiro conter todos os constituintes da argamassa e de serem misturados (ainda no tabuleiro) com auxílio de uma pá (Figura 4.6 b), estes foram colocados no recipiente da misturadora mecânica do laboratório, previamente humedecido. Seguidamente, o recipiente (cuba) foi colocado na misturadora (Figura 4.7 a), sendo esta colocada em funcionamento, iniciando assim o processo de amassadura da argamassa. A velocidade de amassadura da misturadora manteve-se constante e durante os primeiros segundos de amassadura (aproximadamente 20 segundos) adicionou-se a água, de forma regular, previamente medida numa proveta, e com auxílio de um funil (Figura 4.7 b). Passados 150 segundos de amassadura, esta foi interrompida para se raspar manualmente a argamassa dos bordos e do fundo com o auxílio de uma espátula. Por fim, colocou-se a misturadora em funcionamento durante mais 30 segundos. Terminado este processo, retirou-se o recipiente da misturadora, envolveu-se a argamassa com uma colher de pedreiro e iniciaram-se os ensaios em estado fresco. O aspeto final da argamassa amassada encontra-se na Figura 4.7 c.



Figura 4.6 – Pesagem dos constituintes (a) e processo de mistura dos constituintes manualmente (b)



Figura 4.7 – Misturadora (a), introdução de água na cuba (b) e aspeto de uma das argamassas com terra após o processo de amassadura (c)

4.3.2 Prismas de Argamassa

Alguns dos ensaios a realizar nas argamassas em estado endurecido foram efetuados em provetes prismáticos. Para a execução destes, a argamassa foi colocada num molde próprio para tal, ficando assim com a forma prismática pretendida. Para cada traço de argamassa efetuado foram produzidos nove prismas (três moldes), cada um deles com dimensões de 40x40x160 (mm) (Figura 4.8). O processo de colocação de argamassa nos moldes exigiu alguns cuidados para que, após a cura, a desmoldagem dos provetes não implicasse dificuldades ou mesmo a sua destruição. Seguidamente são apresentados os procedimentos utilizados para esta atividade.

O primeiro passo foi a preparação dos moldes. Para tal, ainda com o molde desmontado, limpam-se as peças separadamente, e depois voltaram a montar-se. De seguida aplicou-se o óleo descofrante por todo o interior do molde por forma a facilitar a desmoldagem. Tendo o molde já preparado, colocou-se na máquina de compactação (Figura 4.9 a,b). Com o auxílio da colher de pedreiro, colocou-se a argamassa no interior do molde numa primeira camada (até um pouco mais de metade da altura do provete). Colocou-se a máquina de compactação em funcionamento, realizando 20 pancadas em 20 segundos ao molde com argamassa no seu interior. Após este processo, colocou-se mais argamassa, perfazendo um pouco mais da altura total do molde. Colocou-se a máquina de compactação novamente em funcionamento por mais 20 segundos (20 pancadas). Por fim, retirou-se o molde da máquina de compactação, e com a régua metálica rasou-se todo o molde ficando assim finalizado e pronto para ser colocado nas condições de cura (Figura 4.9 c).



Figura 4.8 – Molde dos provetes prismáticos



Figura 4.9 – Processo de compactação: a, b e c

Após 7 dias em cura numa sala condicionada (ambiente controlado), desmoldaram-se os provetes prismáticos (Figura 4.10). Para tal, bastou desmontar o molde com cuidado extremo, por forma a

não danificar o provete. Embora tenha sido adotado esse cuidado, e devido à fragilidade de certos provetes, alguns deles danificaram-se, partindo-se mesmo alguns deles (Figura 4.11).



Figura 4.10 – Processo de desmoldagem dos provetes prismáticos



Figura 4.11 – Provede prismático partido após a desmoldagem

4.3.3 Aplicação em Tijolo

Por forma a simular a aplicação de um reboco sobre uma alvenaria de tijolo, procedeu-se à aplicação das várias argamassas produzidas em camada sobre tijolos furados convencionais, com dimensões de 20x30x7 (cm).

Para a sua realização foi necessário a utilização de um molde de madeira retangular (com a forma do tijolo) que teve a função de moldar a argamassa com uma certa espessura no topo da superfície do tijolo (Figura 4.12 a). Foi ainda necessário um afastador, igualmente de madeira, e também com a forma do tijolo que teve o objetivo de proporcionar a devida altura de queda da argamassa sobre o tijolo em questão (Figura 4.12 b). Antes da colocação do molde de madeira, a superfície do tijolo foi devidamente humedecida para que o suporte (tijolo) não absorvesse água existente na argamassa, que poderia criar alterações na interface argamassa/tijolo. O molde de madeira foi colocado em torno da maior área retangular do tijolo, com uma sobrelevação de 2 cm. De seguida colocou-se o afastador, com uma altura de 75 cm (Figura 4.13 a). Com a colher de pedreiro introduziu-se a argamassa em estado fresco no interior fazendo com que esta caísse da altura definida no molde. Retirou-se o afastador e rasou-se o provete (Figura 4.13 b). Após alguns minutos retirou-se o molde de madeira de volta do tijolo e colocou-se todo o provete (tijolo com argamassa) na sala climática. O aspeto final do provete em suporte de tijolo encontra-se na Figura 4.13 c.



Figura 4.12 – Molde de madeira (a) e afastador (b)



Figura 4.13 – Aspeto do conjunto afastador e molde de madeira (a), rasagem do provete (b) e aspeto final do provete em suporte de tijolo (c)

4.3.4 Aplicação em Taipa

As aplicações de argamassa em tijolos convencionais têm como objetivo realizar ensaios com condições de cura controladas no interior do laboratório. No entanto, este suporte não é o ideal ou mais corrente para este tipo de argamassa. Considera-se que um suporte adequado para argamassas com terra poderá ser um suporte que tenha por base também a terra, podendo ser então taipa, BTC (blocos de terra comprimido), adobe ou tabique. Para esta dissertação optou-se por escolher um suporte de taipa para aplicação da argamassa em ambiente exterior.

Tendo em conta a área disponível no murete de taipa, foi necessário escolher duas das cinco argamassas em estudo para respetiva aplicação. Obrigatoriamente uma delas foi a argamassa de referência sem qualquer inserção de terra (CL3); a segunda argamassa escolhida foi a que contém 10% de terra em substituição de igual parcela de areia fina - CL3_10t(ArF). A escolha desta argamassa teve por base a observação do seu comportamento quando esta foi preparada anteriormente para a realização dos provetes, pois apresentou uma trabalhabilidade satisfatória.

A área do murete foi dividida em quatro zonas: duas delas são relativas a argamassas pertencentes a outra dissertação, nomeadamente a que foi realizada em paralelo com a presente (Jamú 2013). Deste modo, e tendo em conta que a área total é de 3,04 m², à argamassa CL3_10t(ArF) corresponde uma área de 0,73 m², e à argamassa CL3 corresponde uma área de 0,8 m². Estas duas áreas situam-se do lado norte da face nascente do murete (Figura 4.14).

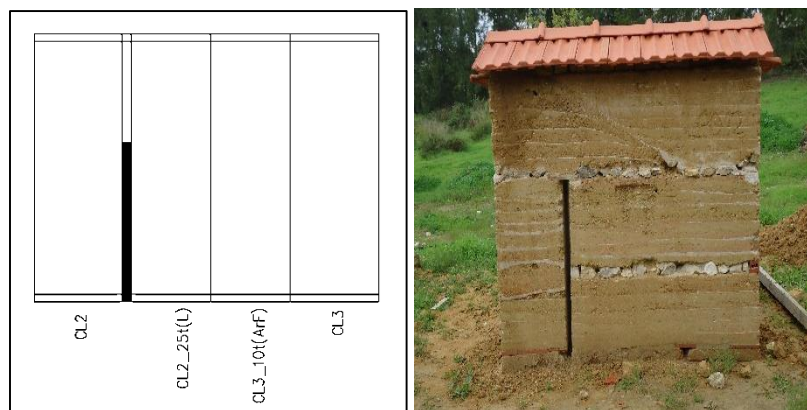


Figura 4.14 – Esquema da distribuição de argamassas

A aplicação do reboco teve início com a aplicação de um salpisco, tendo como função corrigir algumas irregularidades existentes no murete, e fortalecer a aderência da camada de base ao suporte. O salpisco foi constituído pela mesma argamassa; no entanto, realizada com maior quantidade de água. A camada de base do reboco foi aplicada uma semana após a aplicação do respetivo salpisco, com a mesma quantidade de água utilizada nas argamassas aplicadas nos restantes provetes. O processo de amassadura das argamassas aplicadas no murete foi efetuado através de uma amassadura com berbequim elétrico (Figura 4.15 a). O acabamento do salpisco foi propositadamente muito mais irregular do que o acabamento da camada de base do reboco, uma vez que o primeiro pretende criar aderência (Figura 4.16 b e c).

A colocação das argamassas sobre o murete foi realizada sempre pelo mesmo operador e de forma semelhante. Utilizou-se uma talocha e uma colher de pedreiro (Figura 4.15 c).

Um fator importante a ter em conta é a estação do ano em que foram aplicadas as argamassas - época de Inverno e, portanto, de maior precipitação e humidade relativa e temperaturas baixas. Estas condições impediram a secagem rápida das argamassas aplicadas sobre o murete. Foi possível verificar a existência de um determinado nível de água ascendente através do solo tanto no murete (sem as argamassas) como após a aplicação do reboco (Figura 4.15 b e 4.16 a).

Aquando da aplicação das argamassas, o operador notou alguma dificuldade de aplicação no que respeita à argamassa de referência só de cal aérea de traço 1:3. A mistura de areias utilizada não é muito rica em finos e o traço utilizado também não é muito rico em ligante, pelo que, tal como já tinha sido notado na realização das argamassas em laboratório, parece que a argamassa poderia beneficiar em termos de trabalhabilidade se tivesse mais finos. Já com a argamassa com terra (10%) não verificou tanta dificuldade. A argamassa de referência, por possuir um traço fraco, possui também fraca capacidade de aderência.



Figura 4.15 – Processo de amassadura com berbequim elétrico (a), níveis de humidade ascendente do solo no murete de taipa (b) e aplicação da argamassa (c)



Figura 4.16 – Aspeto geral do murete após aplicação do salpisco (a), acabamento do salpisco (b) e acabamento do reboco final (c)

4.4 Condições de Ambiente da Cura

Todos os provetes produzidos foram submetidos a determinadas condições de cura durante o tempo definido. O tipo de cura utilizado nos provetes em laboratório foi a aspersão diária nos 4 dias posteriores à moldagem e manutenção dos provetes em condições controladas de temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $65 \pm 5\%$ (Figura 4.17 a e b). Durante todo o tempo de cura todos os provetes ficaram colocados no interior de uma sala climática, onde estas condições foram aproximadamente mantidas (Figura 4.17 c). A aspersão da água realizou-se através de um borrifador, uma vez por dia, na face livre do molde, durante os quatro dias posteriores à amassadura. Estas condições foram válidas tanto para os provetes prismáticos como para os provetes em suporte de tijolo.



Figura 4.17 – Condições de cura (a) e (b), provetes em condições de cura na sala climatizada (c)

Uma vez que os rebocos foram aplicados em condições de tempo húmido, considerou-se que não foi necessário nem aspergir previamente o suporte, nem aspergir diariamente a superfície dos rebocos.

5 Procedimentos de Ensaios de Caracterização

5.1 Caracterização dos Suportes

Como já referido no ponto 3.1, uma das etapas da campanha experimental consistiu na caracterização dos suportes utilizados, nomeadamente o tijolo convencional e o murete de taipa.

5.1.1 Tijolo Furado

O tão conhecido tijolo é um produto cerâmico avermelhado e geralmente em forma de paralelepípedo e amplamente usado na construção civil. A cor avermelhada do mesmo provém do processo de cozedura na sua produção a partir de materiais argilosos. Os ensaios realizados para a caracterização do tijolo foram a determinação da condutibilidade térmica e ainda absorção de água sob baixa pressão através de tubos de Karsten.

5.1.1.1 Condutibilidade Térmica

A condutibilidade térmica (λ) é uma propriedade que caracteriza os materiais ou produtos termicamente homogêneos e que representa a quantidade de calor (expressa em W por unidade de área m^2) que atravessa uma espessura unitária (m) de um material, quando entre duas faces planas e paralelas se estabelece uma diferença unitária de temperatura ($1^\circ C$) (Pina dos Santos et al. 2006).

A determinação da condutibilidade térmica do material constituinte dos septos de um tijolo não é um ensaio preciso, pois esta propriedade é geralmente calculada em materiais homogêneos, com uma espessura maior, o que não acontece com um tijolo. O próprio equipamento de ensaio preconiza uma espessura mínima de 2 cm e o septo tem apenas 7,5 mm. No entanto, este ensaio foi realizado determinando assim a condutibilidade térmica aproximada do material cerâmico constituinte do tijolo. Para este ensaio utilizou-se o equipamento denominado ISOMET 2104 (Heat Transfer Analyser), que apresenta um erro de 0,001. A sonda utilizada foi uma sonda circular que, em contacto com o material em questão, inicialmente emite calor conseguindo assim determinar a condutibilidade térmica.



Figura 5.1 – Ensaio de condutibilidade térmica em tijolo convencional

5.1.1.2 Absorção de Água sob Baixa Pressão – Tubos de Karsten

Para a determinação da absorção de água sob baixa pressão foram utilizados três tubos de Karsten (Figura 5.2). Este ensaio teve por base a ficha de ensaio Fe Pa 39 do LNEC e o RILEM test nº

II4 (1980a). Foram registadas as quantidades de água absorvidas pelo suporte ao longo do tempo, nomeadamente aos 5, 10, 15, 30 e 60 minutos. Não houve necessidade de reenchimento de nenhum dos tubos. Assim, os resultados deste ensaio foram as quantidades de água absorvidas em determinados períodos de tempo (em ml) e o coeficiente de absorção [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$]

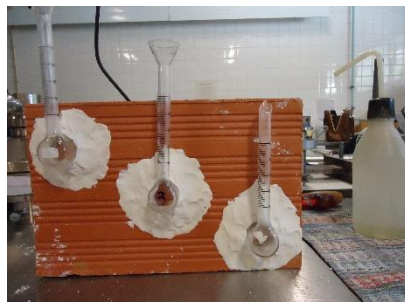


Figura 5.2 – Tubos de Karsten

5.1.2 Murete de Taipa

A caracterização do suporte foi convenientemente realizada através de ensaios tais como a determinação da condutibilidade térmica, resistência superficial por esclerómetro pendular e durómetro e absorção de água sob baixa pressão (Tubos de Karsten). Tendo em conta que o murete se encontra exposto às ações climáticas, o estado do tempo existente nos dias antes e mesmo durante os ensaios comprometem os resultados obtidos. Assim sendo, é fundamental ter em conta que os ensaios de caracterização foram realizados no mês de Dezembro, havendo portanto em grande parte do tempo, muita humidade, baixa temperatura e mesmo precipitação.



Figura 5.3 – Alçado Este (esquerda) e Sul (direita) do murete de taipa



Figura 5.4 – Alçado Poente (esquerda) e Norte (direita) do murete de taipa

5.1.2.1 Condutibilidade Térmica

A condutibilidade térmica do murete foi medida num total de 16 pontos. Os pontos foram colocados em grelha de 4x4 na área do murete, ou seja, 4 pontos em alinhamento vertical, 4 vezes. O equipamento utilizado para este ensaio foi o mesmo que se utilizou no ponto anterior (5.1.1.1) com diferença na sonda utilizada que neste caso foi tipo agulha, por forma a penetrar no suporte (Figura 5.5). Os resultados obtidos são expressos em W/m.K.



Figura 5.5 – Condutibilidade térmica realizada ao murete de taipa

5.1.2.2 Dureza Superficial - Durómetro

Para a determinação da dureza superficial do murete de taipa utilizou-se um durómetro Shore-A (DS_D), disponibilizado pelo Núcleo de Isolamentos e Revestimentos do LNEC. O ensaio consistiu em colocar o durómetro em contacto com a superfície em questão, lendo o valor mencionado no mostrador (através de ponteiro). O dia que coincidiu com a realização do ensaio foi um dia bastante chuvoso. Como tal, foram escolhidos pontos a ensaiar mais protegidos pelas telhas.

5.1.2.3 Dureza Superficial - Esclerómetro

A dureza superficial (DS_E) do murete de taipa foi também determinada através da utilização de um esclerómetro de pêndulo *Schmidt Hammer* do tipo PM, o indicado no caso de ensaios em revestimentos e alvenarias (Figura 5.6 a) e teve por base a norma ASTM C805 (2000). O funcionamento do esclerómetro de pêndulo é baseado no método do ressalto, isto é, o grau de dureza é avaliado através da medição do deslocamento de retorno de uma massa conhecida lançada contra o material em estudo. A escolha do equipamento teve por base a resistência do material que se pretende ensaiar. Este ensaio foi realizado em 12 pontos na totalidade do murete, colocados em forma de grelha de 3x4, ou seja, um alinhamento vertical de 3 pontos vezes 4. A medição em cada ponto foi repetida três vezes, por forma obter valores médios, uma vez que este ensaio é muito sensível ao operador que o realiza e à localização exata do ponto a ensaiar.



Figura 5.6 – Esclerómetro pendular, DS_E (a) e marca provocada pelo esclerómetro pendular após a realização do ensaio (b)

5.1.2.4 Absorção de Água sob Baixa Pressão - Tubos de Karsten

A capacidade de absorção de água é uma característica muito importante, e como tal, esta propriedade foi determinada para a caracterização do murete de taipa. Este ensaio é utilizado para a medição da quantidade de água absorvida sob baixa pressão por determinada superfície de um material poroso, após determinado período de tempo.

Sendo este material (taipa) formado por terra argilosa, areias, e alguma cal, era de esperar que a sua capacidade para absorver água fosse bastante elevada, e tal verificou-se. Um aspeto que dificultou bastante a realização deste ensaio foi a irregularidade de toda a superfície de taipa; tornando a colocação dos tubos de Karsten muito complicada, uma vez que a plasticina não adere bem a este material. Um outro facto que influenciou fortemente este ensaio foi a quantidade de água que o murete possuía no seu interior, devido à água ascendente do solo e mesmo proveniente de precipitação que ocorreu em dias anteriores. Os pontos escolhidos para a colocação dos tubos de Karsten foram determinados estrategicamente por forma a evitar zonas demasiado húmidas. Assim sendo, foram colocados quatro tubos em linha horizontal na zona mais perto do topo, e o mesmo para uma linha um pouco afastada da anterior, colocada em baixo.

Poucos foram os tubos que permaneceram colados à taipa durante uma hora (tempo necessário para a totalidade do ensaio). Assim sendo, para este ensaio neste material específico, atribui-se mais ênfase ao tempo necessário para absorver 4 ml de água. Esta característica foi avaliada através de medição do tempo que o material demora a absorver 4 ml de água contida num tubo de Karsten (Figura 5.7 c).



Figura 5.7 – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão no murete de taipa através de tubos de Karsten (a, b, c)

5.2 Ensaios aos Constituintes das Argamassas

Como já foi referido, a escolha das matérias-primas das argamassas é um ponto fulcral em todo o processo de produção. Além da escolha propriamente dita dos materiais a utilizar, é também de extrema importância conhecer as suas propriedades e características, e para tal, é necessário realizar ensaios de modo a conhecer estes aspetos.

Assim, numa fase inicial da campanha experimental, realizaram-se ensaios aos constituintes a utilizar na produção das argamassas por forma a caracterizar os mesmos. Tendo sido fornecidas as propriedades das areias (curvas granulométricas e baridades) apenas foi necessário determinar essas mesmas características relativamente à terra argilosa.

5.2.1 Análise Granulométrica

A análise granulométrica é um método que permite conhecer as quantidades de partículas de certa dimensão constituintes dos agregados. Assim, é possível compreender a influência que as dimensões dos agregados têm no comportamento de uma argamassa. Esta análise foi realizada com base na norma NP EN 933-1 (IPQ 2000b). Na realização da curva granulométrica foram utilizados peneiros com aberturas desde 0,038 mm a 4,75 mm. Seguidamente apresenta-se o procedimento que foi adotado.

O primeiro passo passou por colocar a terra numa estufa, durante 48 horas a 60°C, de modo a que esta ficasse totalmente seca. Após as 48 horas pesou-se a quantidade de terra pretendida na balança. Encaixaram-se os peneiros uns nos outros verticalmente, de modo a que a abertura da malha diminuísse de cima para baixo. Colocou-se a amostra previamente pesada no topo dos peneiros (Figura 5.8 a). O conjunto dos peneiros já com a amostra no seu interior foi colocado na máquina de vibração (Figura 5.8 b). Por ação maioritariamente da vibração horizontal induzida pela máquina mas também devido à gravidade, a terra foi passando nos sucessivos peneiros, ficando no entanto, retidas as partículas no peneiro imediatamente abaixo da sua dimensão. O processo de vibração da máquina foi mantido durante 5 minutos.

Após este período de tempo separaram-se novamente todos os peneiros, pesando-se na balança as massas retidas em cada um deles. Assim ficaram conhecidas as quantidades de material com determinada dimensão existentes na terra (Figura 5.8 c).

Os resultados deste ensaio são as percentagens de material retido em cada peneiro. Tendo em conta que a quantidade inicial de terra (o conjunto) corresponde a 100%, vem que a percentagem retida em determinado peneiro é:

$$\% \text{ Material retido no peneiro} = \frac{\text{Massa retida no peneiro}}{\text{Massa total inicial}} \times 100\% \quad (\text{Equação 5.1})$$

Sabendo a percentagem retida em cada peneiro, foi possível determinar as percentagens acumuladas. Por fim determinou-se a curva granulométrica. Este processo repetiu-se três vezes de modo a tentar obter um valor o mais exato possível.



Figura 5.8 – Colocação da terra nos peneiros (a) e colocação dos peneiros na máquina (b), várias granulometrias da terra argilosa (c)

5.2.2 Baridade

Assim como a curva granulométrica, a baridade foi determinada apenas na terra de acordo com a norma NP EN 1097-3 (IPQ 2002a). Através do conhecimento da baridade do material seco de uma argamassa (agregados), foi possível converter os traços que são definidos volumetricamente em massa. Para a determinação da baridade foi necessário um recipiente cilíndrico e um funil.

O procedimento teve início com a pesagem do recipiente cilíndrico. O material a ensaiar (terra) encontrava-se seco, assim como no ensaio da curva granulométrica. Colocou-se o tabuleiro por baixo da haste de metal do equipamento, com o objetivo de evitar perdas de material. Por cima deste colocou-se o recipiente cilíndrico. Com a colher de pedreiro colocou-se a terra dentro do funil (tapando o fundo para o material não cair) de modo a que este ficasse cheio (Figura 5.9 a). Seguidamente abriu-se o fundo do funil, deixando assim, por ação da gravidade, a terra cair sobre o recipiente cilíndrico colocado anteriormente por baixo (Figura 5.9 b). Utilizando a régua metálica rasou-se a quantidade em excesso do recipiente cilíndrico (Figura 5.9 c). Por último procedeu-se à pesagem do conjunto de terra e recipiente cilíndrico na balança.

Além do ensaio propriamente dito mencionado anteriormente, foi necessário determinar o volume do recipiente cilíndrico (Figura 5.10). Para tal, divide-se a massa de água contida no recipiente pela sua densidade a 23°C (0,9976 kg/dm³):

$$\text{Volume do recipiente} = \frac{\text{Massa de água contida no recipiente cilíndrico [kg]}}{\text{Densidade da água [kg/dm}^3\text{]}} \text{ [dm}^3\text{]} \quad (\text{Equação 5.2})$$

O volume obtido foi de 0,749 dm³. Sabendo o volume do recipiente é possível determinar a baridade:

$$\text{Baridade} = \frac{(m_3 - m_0)}{V} \text{ [kg/dm}^3\text{]} \quad (\text{Equação 5.3})$$

Em que:

m_3 - massa do recipiente cheio com o material [kg];

m_0 - massa do recipiente [kg];

V – volume do recipiente [dm³].

O cálculo da baridade foi realizado três vezes, de modo a obterem-se resultados mais exatos. Para efeitos de cálculo utilizou-se a média dos três valores.



Figura 5.9 – Colocação da terra no funil (a), abertura do funil (b) e rasagem do recipiente (c)



Figura 5.10 – Determinação do volume do recipiente

5.3 Ensaios às Argamassas em Estado Fresco

Esta etapa do processo experimental consistiu nos ensaios realizados às argamassas ainda no seu estado fresco, ou seja, no próprio dia da amassadura das mesmas. Esta fase experimental tem muita importância, pois permite caracterizar certas propriedades e comportamentos das argamassas, assim como avaliar a trabalhabilidade das mesmas.

5.3.1 Consistência por Espalhamento

Esta propriedade é uma das mais utilizadas por forma a avaliar as propriedades das argamassas no seu estado fresco e está fortemente relacionada com a sua trabalhabilidade. No entanto, a trabalhabilidade é uma característica difícil de quantificar uma vez que está relacionada com a facilidade de manuseamento e aplicação de uma argamassa. De acordo com a norma EN 1015-3 (CEN 1999 a), com base na qual foi realizado o ensaio, a consistência é uma medida da fluidez ou do teor de humidade de uma argamassa, permitindo avaliar a deformabilidade da argamassa fresca quando sujeita a determinado tipo de ensaio. Segundo esta norma, o ensaio de consistência por espalhamento tem por objetivo verificar a consistência e, de certa forma, a trabalhabilidade de uma argamassa no seu estado fresco.

Considerou-se adotar uma gama de valores de 150 ± 5 mm. No entanto, teve-se sempre em conta a trabalhabilidade real no manuseamento da argamassa fresca. Os principais equipamentos utilizados neste ensaio foram a mesa de espalhamento (Figura 5.11 a), molde troncocónico, pilão e craveira.

Antes de se iniciar o ensaio, a mesa de espalhamento e o molde foram limpos e humedecidos. Colocou-se o molde o mais centrado possível na mesa de espalhamento. Após a amassadura da argamassa a ensaiar, colocou-se esta no interior do molde com o auxílio da colher de pedreiro (Figura 5.11 b). A colocação da argamassa no molde foi realizada em duas camadas. Após a colocação da primeira camada (até um pouco mais de metade do molde), foram realizadas 20 pancadas com o pilão (Figura 5.11 c) por forma a eliminar os vazios (tanto quanto possível). As pancadas com o pilão foram repetidas após a colocação da segunda e última camada de argamassa. Por fim rasou-se o molde com auxílio da régua metálica (Figura 5.12 a). De seguida retirou-se o molde troncocónico de volta da argamassa (Figura 5.12 b). Foram dadas 15 pancadas em 15 segundos com a rotação da manivela da mesa de espalhamento. Por último, mediu-se o diâmetro da argamassa espalhada, tentando sempre escolher dois diâmetros opostos (Figura 5.12 c).

O resultado deste ensaio exprime-se através da média das duas medições que se efetuaram em cada argamassa.



Figura 5.11 – Mesa de espalhamento (a), argamassa colocada no molde (b), pancadas com o pilão na argamassa colocada no molde (c)



Figura 5.12 – Molde rasado com argamassa (a), formato da argamassa após ser retirado o molde (b), medição do diâmetro da argamassa com craveira (c)

5.3.2 Retenção de Água

A retenção de água de uma argamassa é uma característica fundamental, pois condiciona o desempenho dos constituintes que constituem a argamassa e as condições de aplicação (Faria 2004 a). Quando uma argamassa é aplicada, parte da água é evaporada ou absorvida pelo suporte. Assim, a capacidade de retenção de água de uma argamassa de revestimento é muito importante, pois influencia a sua durabilidade.

O presente ensaio teve por base a ficha de ensaio FE 32 UNL/DEC e a norma prEN 1015-8 (CEN 1999). Os resultados do ensaio são enunciados em percentagem de água retida na argamassa.

Foi necessário um molde metálico cilíndrico com 100 mm de diâmetro e 25 mm de altura, um peso de 2 kg, uma placa de vidro de secção quadrada, gaze de algodão e papéis de filtro circulares.

Começou-se por determinar a massa do molde vazio, mv , e de 8 folhas de papel de filtro, mf . De seguida encheu-se o molde metálico com argamassa a ensaiar (após todo o processo da respetiva amassadura) com a colher de pedreiro. Com auxílio da régua metálica rasou-se o molde (Figura 5.13 a). Determinou-se a massa do conjunto, molde e argamassa, mc . Cobriu-se a superfície da argamassa com gaze de algodão (Figura 5.13 b) e ainda por cima desta colocaram-se oito papéis de filtro (Figura 5.13 c). Por cima deste conjunto, colocou-se o vidro (Figura 5.14 a) e inverteu-se o molde sobre uma superfície plana. Sobre o molde (já invertido) colocou-se o peso tomando nota do tempo (Figura 5.14 b). Ao fim de 10 minutos retirou-se o peso e colocou-se o molde na posição inicial. Retirou-se o vidro, os papéis de filtro e as gazes. Por fim, determinou-se a massa do conjunto de oito papéis de filtro, mh (Figura 5.14 c).

Com base na equação 5.4 calculou-se a massa de água utilizada na argamassa colocada no molde:

$$ma = \frac{ag \times (mc - mv)}{\sum_{i=1}^n ci + ag} \quad \text{(Equação 5.4)}$$

Em que:

ma : massa de água utilizada na argamassa colocada no molde;

ag : massa de água utilizada na amassadura da argamassa;

ci : massa de cada um dos outros constituintes da argamassa;

mc : massa do molde com a argamassa;

mv : massa do molde vazio.

Com base na equação 5.5 calculou-se a percentagem de água retida:

$$R = \frac{ma - (mh - mf)}{ma} \times 100 (\%) \quad \text{(Equação 5.5)}$$

Em que:

ma : massa de água utilizada na argamassa colocada no molde;

mh : massa dos oito papéis de filtro passados os 10 minutos;

mf : massa dos oito papéis de filtro.



Figura 5.13 – Molde com argamassa (a), molde com argamassa e gaze por cima (b), molde com argamassa, gaze e oito papéis de filtro (c)



Figura 5.14 – Vidro colocado no topo (a), peso de 2 kg colocado no topo do conjunto invertido (b), pesagem dos oito papéis de filtro passados os 10 minutos (c)

Possivelmente deveriam ter sido utilizados mais papéis de filtro (por exemplo 20), duas gazes e o tempo deveria ter sido 5 minutos (em vez de 10 minutos).

5.3.3 Teor em Ar

A determinação do teor em ar das argamassas teve por base a norma EN 1015-7 (CEN 1998). Após todo o processo de amassadura da argamassa a ensaiar, esta foi colocada no interior do recipiente próprio para tal, pertencente ao equipamento para determinação do teor em ar (Figura 5.15 a). A argamassa foi colocada em duas camadas, e no fim da colocação de uma camada realizou-se a compactação, através de quatro pancadas em cada um dos quatro lados do recipiente. Após este processo, rasou-se o recipiente com auxílio da régua metálica. Com o pano húmido limpou-se muito bem todo o recipiente por fora e nos bordos de cima, pois se existirem vestígios de argamassa nos contornos não é possível selar a camara (e não é possível realizar o ensaio). De seguida colocou-se a tampa do equipamento sobre o recipiente, fixando-a com os grampos (Figura 5.15 b). Mantendo as duas válvulas abertas, com o esguicho introduziu-se água por uma das válvulas até que esta saísse pela outra válvula sem nenhuma bolha. Este processo permite a expulsão do ar da argamassa. Bombeou-se ar para o reservatório superior até que o ponteiro do manómetro parasse um pouco abaixo do zero, ajustando depois este para o zero. Fecharam-se as duas válvulas e pressionou-se a válvula de escape até que o ponteiro estabilizasse. Por fim, leu-se o valor do teor de ar incorporado indicado pelo ponteiro (Figura 5.15 c). Os resultados deste ensaio são diretamente os valores retirados do equipamento.



Figura 5.15 – Molde com argamassa (já rasado) e equipamento apropriado (a), equipamento colocado no topo do recipiente (b), leitura do valor (c)

5.3.4 Massa Volúmica

Para a determinação da massa volúmica foi utilizado o mesmo recipiente do ensaio anterior (teor em ar) que possui um volume de 1 dm^3 . Sabendo o peso do recipiente bastou preenchê-lo totalmente (e rasar) com a argamassa a ensaiar e pesar esse conjunto. Fazendo a diferença da massa do conjunto da massa do recipiente obteve-se a massa de argamassa. Por último, dividiu-se a massa de argamassa pelo volume do recipiente. O valor da massa volúmica tem unidade de kg/dm^3 . Este ensaio foi determinado tendo por base a norma EN 1015-6 (CEN 1998 b).



Figura 5.16 – Recipiente utilizado na determinação da massa volúmica

5.4 Ensaios às Argamassas em Estado Endurecido

Após a caracterização das argamassas em estado fresco e passado determinado tempo em cura, seguiram-se os ensaios em estado endurecido. Estes ensaios são de extrema importância uma vez que com eles é possível obter valores que caracterizam o comportamento destas argamassas de terra quando confrontadas com determinada ação.

5.4.1 Provetes Prismáticos

Os ensaios em estado endurecido em provetes prismáticos foram realizados apenas aos 90 dias. Não foram realizados ensaios aos 28 dias pois considerou-se que, a esta idade, nas argamassas de cal aérea, as reações de carbonatação estariam ainda insuficientemente desenvolvidas, e assim sendo, os resultados que se obteriam não correspondiam a um estado endurecido próximo do final.

Depois de serem medidas as variações dimensionais dos provetes e a condutibilidade térmica, estes seguiram para os ensaios de módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tração por flexão, resistência à compressão, absorção de água por capilaridade, secagem, porosidade aberta e massa volúmica, porosimetria de mercúrio e resistência aos sulfatos, realizados nesta mesma ordem, embora alguns em simultâneo. A sequência adotada para estes ensaios é fundamental, pois alguns deles são destrutivos para os provetes. Assim, o primeiro ensaio a ser realizado foi o módulo de elasticidade dinâmico (não destrutivo) e de seguida a resistência à tração por flexão (destrutivo). Deste segundo ensaio, resultam duas metades (aproximadamente), em que uma delas seguiu para o ensaio de resistência à compressão, e a outra para o ensaio de capilaridade. Da metade que sofre o ensaio de resistência à compressão, e após o ensaio, surgem outras três. Destas, uma foi para a realização dos ensaios de porosidade aberta e massa volúmica aparente, outra foi para o LNEC para uma análise de difração por raio X e análise TG-DTG que será realizada posteriormente a esta dissertação e, a terceira, para o ensaio de porosimetria. A outra metade que serviu para o ensaio de capilaridade, posteriormente foi utilizada no ensaio de secagem e resistência aos sulfatos. A Figura 5.17 apresenta um esquema para melhor se entender esta sequência de ensaios.

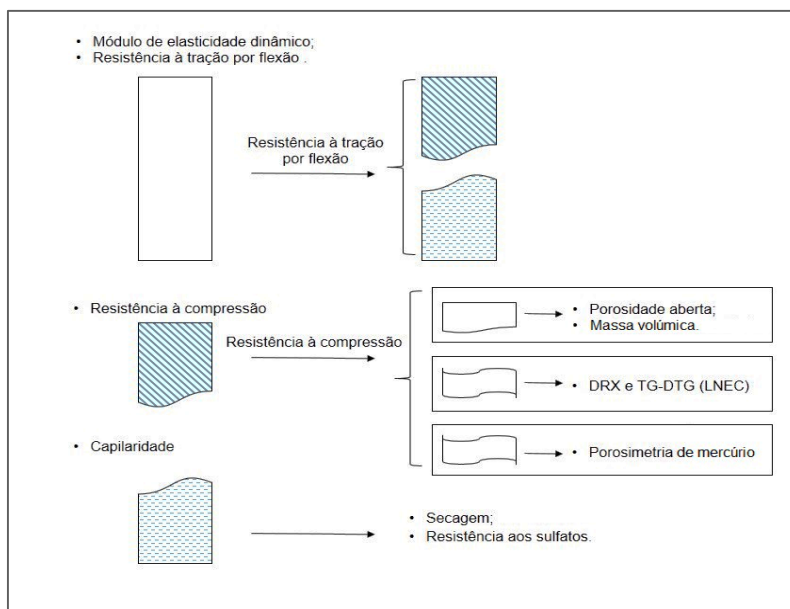


Figura 5.17 - Esquema da sequência de ensaios.



Figura 5.18 – Provetes prismáticas (40x40x160 mm)

5.4.1.1 Variações Dimensionais e Ponderais – Massa Volúmica Aparente

Apesar dos ensaios no estado endurecido dos provetes prismáticos só serem realizados aos 90 dias, as medições para avaliar as variações dimensionais e ponderais foram exceção, e foram medidas a várias idades. Assim, estas propriedades foram medidas aos 7, 28 e 90 dias de idade. Para este ensaio foram utilizados os provetes da primeira e segunda fase de amassadura, em que o total da massa volúmica corresponde à média ponderal de ambas. Tendo as dimensões a cada idade, é possível determinar a massa volúmica aparente. As dimensões dos provetes que foram medidas foram designadas de “L” (comprimento do provete), “a” (largura da base) e “b” (altura) (Figura 5.19). A dimensão “a” foi medida em dois locais distintos do provete, nomeadamente em ambas as extremidades, sendo o valor resultante a média desses dois valores. Deste modo, de todas as medições efetuadas resultam valores de “L”, “a” e “b”, com as quais se obtém o volume do provete a cada idade; avaliando também a massa do provete, obtém-se a sua massa volúmica. As dimensões “L”, “a” e “b” foram medidas com craveira (Figura 5.20) e a massa com uma balança de precisão 0,001 g.

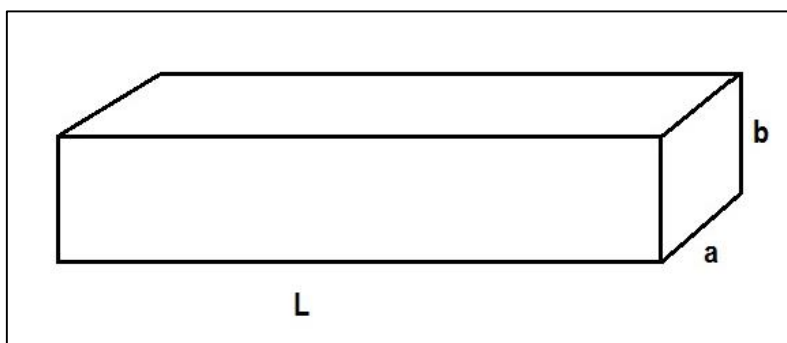


Figura 5.19 – Esquema do provete prismático 40x40x160 mm



Figura 5.20 – Medição de “a” com craveira (a), craveira (b) e (c)

5.4.1.2 Módulo de Elasticidade Dinâmico

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico dos provetes teve por base a norma NP EN 14146 (IPQ 2007), que define métodos de ensaio para pedras naturais através da medição da frequência de ressonância fundamental.

Esta propriedade mecânica quantifica a capacidade de uma argamassa absorver deformações. Deste modo, a partir do módulo de elasticidade é possível caracterizar uma argamassa relativamente à sua resistência à fendilhação e compatibilidade com o suporte (a nível de deformabilidade).

O presente ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos e Durabilidade da Secção de Construção e Hidráulica do DEC/FCT UNL, utilizando o equipamento “ZEUS Resonance Meter” (ZRM 001), apropriado para determinação do módulo de elasticidade dinâmico (Figura 5.21). O dia deste ensaio coincidiu com o dia das medições das dimensões (L,a,b e massa) dos provetes prismáticos. Estas foram necessárias para a determinação do módulo de elasticidade. Seguidamente descreve-se o procedimento adotado.

O provete foi colocado no suporte próprio do equipamento, com um topo em contacto com a fonte emissora de ultrassons e o outro colocado em contacto com a unidade de receção. No programa de cálculo do equipamento foram introduzidas as dimensões do provete a ensaiar (L,a,b e massa). Após inseridos estes dados, o equipamento calcula automaticamente o módulo de elasticidade dinâmico E_d [MPa]. Este cálculo depende de várias propriedades: do comprimento do provete L [mm], da frequência de ressonância longitudinal calculada f_0 [Hz], do peso volúmico do provete ρ [N/m³] (calculado a partir da sua massa e do seu volume) e da aceleração da gravidade [9,80665 m/s²].

O módulo de elasticidade dinâmico é determinado com base na seguinte fórmula:

$$E_d = (2 \times L \times f_0) \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} \text{ [MPa]}$$

(Equação 5.6)

A medição foi repetida no mínimo quatro vezes para cada provete, alternando o topo em contacto com o emissor e as faces de apoio. Para a obtenção do módulo de elasticidade de cada argamassa foi realizada a média dos três provetes de cada traço. Tratando-se de um ensaio não destrutivo, os provetes seguiram para os restantes ensaios de caracterização.

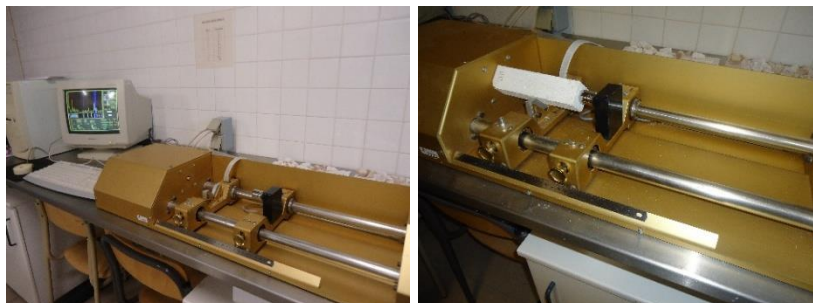


Figura 5.21 – Equipamento utilizado para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico

5.4.1.3 Resistências Mecânicas

Outro ensaio de caracterização de grande importância são os ensaios de determinação de resistência à tração por flexão e de resistência à compressão. Ambos os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos e Durabilidade da Secção de Construção e Hidráulica do DEC/FCT UNL, e também pelo mesmo equipamento (com as devidas alterações).

5.4.1.3.1 Resistência à Tração por Flexão

O presente ensaio de determinação da resistência à tração por flexão teve por base a norma EN 1015-11 (CEN 1999 c). Este foi realizado no seguimento do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico, e também no mesmo local.

O equipamento necessário para este ensaio foi uma máquina universal Zwick/Rowell, com uma célula de carga de 2kN (Figura 5.22 a). Como o nome do ensaio indica, a tração no provete é induzida por uma flexão imposta por ação em três pontos: pela extremidade da célula de carga e por dois apoios acessórios do aparelho. O procedimento realizado no ensaio é descrito seguidamente.

Cada provete a ensaiar foi devidamente colocado sobre os apoios adequados do aparelho (Figura 5.22 b). Esta colocação foi muito cuidadosa e o mais rigorosa possível, pois é importante para este ensaio que o provete esteja devidamente posicionado. Foi tido o cuidado de colocar o provete de forma a que a face mais rugosa ficasse disposta lateralmente. Deste modo, tanto o contacto com a célula de carga, aplicada a meio vão do provete, como o contacto com os apoios, foi feito com as superfícies mais lisas, evitando assim irregularidades nas faces de contacto. Além disso, foi tido também o cuidado de colocar o provete o mais possível perpendicularmente com a célula de carga. De seguida, deu-se início ao carregamento provocado por uma célula de carga de 2 kN, através do software do equipamento. Este carregamento deu-se a uma velocidade constante de 0,2 mm/min. O software de cálculo do equipamento demonstrou graficamente (em tempo real) a força aplicada [N] em função do tempo decorrido [s], e ao mesmo tempo determinou a força máxima (F_f) aplicada imediatamente antes da rotura do provete.

Determinada a respetiva força máxima, e utilizando a fórmula seguinte (que consta na norma EN 1015-11c), determinou-se a resistência à tração por flexão:

$$R_t = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \text{ [MPa]}$$

(Equação 5.7)

Em que:

l - Distância entre apoios, em milímetros (100 mm);

b - Lado da secção quadrada do provete, em milímetros (40 mm).

No final do ensaio, as duas metades provenientes foram recolhidas cuidadosamente; uma delas seguiu diretamente para o ensaio de resistência à compressão, e a outra foi para a estufa, e posteriormente sujeita ao ensaio de capilaridade.

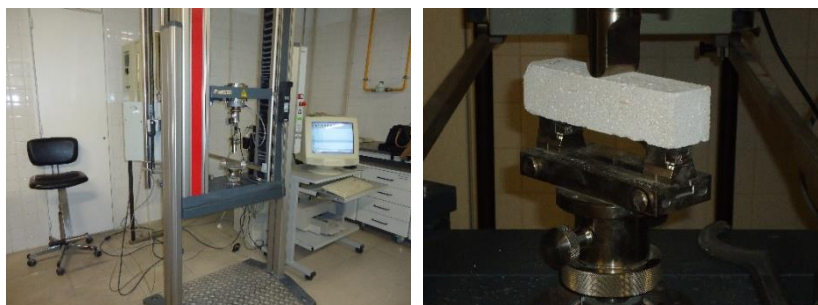


Figura 5.22 – Equipamento utilizado na determinação da resistência à tração (a); provete devidamente colocado no dispositivo de ensaio (b)

5.4.1.3.2 Resistência à Compressão

A determinação da resistência à compressão foi também realizada de acordo com a norma EN 1015-11 (CEN 1999c). Como já referido, o equipamento para este ensaio é o mesmo do anterior, Zwick/Rowell, utilizando neste caso uma célula de carga de 50 kN.

A metade do provete a ensaiar foi cuidadosamente colocada com a face rugosa na lateral, no devido dispositivo auxiliar que permite o contacto entre os “pratos” do equipamento e o provete (Figura 5.23 a).

No software do equipamento, deu-se início ao carregamento. No decorrer do ensaio (do carregamento), o software do equipamento determina e demonstra em tempo real um gráfico que representa a força aplicada/tempo e a força aplicada máxima de compressão (F_c , em N) que ocorre imediatamente antes da rotura (Figura 5.23 b). Dividindo esta força pela área da secção (S) onde é aplicada a carga (40x40 (mm)), foi possível obter a resistência à compressão (R_c) em MPa. No final do ensaio, cada metade de provete ensaiado dividiu-se em três, perfazendo um topo liso, e outras duas amostras centrais (rugosas) (Figura 5.23 c). A amostra representada pelo topo liso foi utilizado para o ensaio de porosidade aberta. Relativamente às duas restantes, ambas foram guardadas em sacos de plástico, secas em estufa e devidamente fechadas, para minimizar a evolução da cura. Uma das amostras foi para o ensaio de porosimetria de mercúrio e a outra irá ser utilizada para posterior caracterização no LNEC.



Figura 5.23 – Provete colocado no equipamento (a), provete após atingir a rotura (dividido em três) (b) e (c)

5.4.1.4 Absorção de Água por Capilaridade

Este ensaio tem como objetivo avaliar a resposta dos provetes quando expostos a condições de molhagem. Para tal determina-se o coeficiente de capilaridade (CC), que corresponde ao declive inicial da curva de absorção capilar e o valor assintótico (VA) dessa mesma curva. O coeficiente de capilaridade traduz a rapidez de absorção de água, enquanto o valor assintótico traduz a quantidade máxima de água absorvida. O ensaio foi realizado com base nas normas EN 1015-18 (CEN 2002) e EN 15801 (CEN 2009).

Após o ensaio de resistência à tração por flexão, as metades (utilizadas para este ensaio) foram colocadas numa estufa a 60°C por forma a ficarem em condições de massa constante. O ensaio foi realizado na sala condicionada do DEC/FCT-UNL, a uma temperatura e humidade relativa controladas de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ respetivamente (sala de cura). No dia do ensaio, e com o decorrer do tempo e das medições efetuadas, é importante que a curva de absorção capilar seja traçada em simultâneo

para que seja possível acompanhar o declive inicial da mesma até que estabilize. A estabilização pode demorar várias horas, neste caso demorou seis horas.

Após as 48 horas na estufa, os provetes foram retirados e pesados, obtendo a massa seca dos mesmos. A preparação dos provetes começou por envolver os mesmos em película aderente de polietileno, que tem a função de assegurar que a absorção de água ocorra apenas pela base (e não pelas faces laterais). Ao mesmo tempo tem função de garantir que o fluxo ascensional seja unidirecional e não tenha perdas pelas faces laterais. Com auxílio de uma tesoura, as bordas da película em redor da base foram devidamente cortadas. Este processo foi realizado com muito cuidado tentando que os provetes não perdessem partículas. De seguida foi colocada gaze na base do provete. Esta foi fixada por um elástico atado em redor do provete. É importante que a malha da gaze seja pequena o suficiente para não ocorrerem perdas de massas no decorrer do ensaio, mas também não pode ser demasiado pequena pois tem de assegurar a normalidade do fluxo de absorção de água pela base do provete (Figura 5.24 a).

Para este ensaio foi necessária uma caixa plástica. Dentro desta caixa foi colocado um tijolo. Esta manteve-se fechada sempre que possível e assim pôde ser mantida humidade no interior desta. No fundo do tabuleiro (colocado sobre o tijolo) foi colocada uma rede sintética (para sobre-elevar a base dos provetes e facilitar a absorção de água pela sua base) e uma lâmina de água com 5 mm de altura acima da rede (Figura 5.24 b). A manutenção desta lâmina de água é bastante importante, ou seja, tem de ser acrescentada água sempre que for necessário. Os provetes foram colocados na caixa (em contacto com a água) e foram realizadas pesagens das respetivas massas aos 5, 10, 15 e 30 minutos, e depois de hora a hora até a curva de absorção de água ter atingido o início do patamar de estabilização. Este processo demorou 6 horas. Cada pesagem foi realizada com cuidado para que, ao retirar-se o provete da caixa, a água não atingisse os restantes. A balança onde se realizaram as pesagens tem uma precisão de 0,001 g (Figura 5.24 c).

De acordo com a norma EN 15801 (CEN 2009) o ensaio termina quando a diferença de massa entre duas pesagens sucessivas de 24 horas seja inferior a 1% ou, se este não for obtido, dá-se por concluído o ensaio ao fim de 8 dias. Verificou-se a primeira condição, durando a totalidade do ensaio 5 dias.

A curva de absorção de água por capilaridade foi determinada através do traçado de um gráfico que exprime a quantidade de água absorvida por área da base (M) [kg/m^2] em função da raiz quadrada do tempo [$min^{1/2}$], sendo o primeiro definido por:

$$M = \frac{m_i - m_0}{S} [kg/m^2]$$

(Equação 5.8)

Em que:

m_i – massa inicial do provete no instante t_i [kg];

m_0 – massa do provete seco (com gaze) [kg];

S – área da superfície do provete em contacto com a água [0,04x0,04 m].

Relativamente ao coeficiente de capilaridade (CC) este obtém-se através da regressão linear (declive da reta) da fase inicial da curva de capilaridade. Esta fase inicial é muito relativa, pois para

cada curva (de cada provete) os pontos representativos da fase inicial são diferentes, ou seja o coeficiente de capilaridade é determinado individualmente. Assim, o coeficiente de capilaridade é determinado através do declive (m) da reta $y = m \times x + b$. Outro valor a determinar é o valor assintótico [kg/m²]. Aquando o ensaio foi possível observar que os provetes que continham mais terra (nomeadamente os de 15 e 25%) absorviam água mais rapidamente (Figura 5.25 b).



Figura 5.24 – Aspeto do provete após a preparação (a), caixa de plástico com lâmina de água onde foi realizado o ensaio (b), pesagem dos provetes (c)



Figura 5.25 – Provetes a absorver água (alguns minutos de ensaio) (a), pormenor de um provete de terra (b), vista geral dos provetes em ensaio (c)

5.4.1.5 Secagem

Na continuidade do ensaio de absorção de água por capilaridade seguiu-se o ensaio de secagem. O seu procedimento foi baseado no Test No. II.5 “Evaporation curve” da RILEM (1980b), na norma NORMAL 29/88 (1991) e em Brito et al. (2011). Este ensaio foi realizado na mesma sala que o anterior (Figura 5.26), mantendo as condições (temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $65 \pm 5\%$).

É extremamente importante conhecer a facilidade com que as argamassas perdem a água absorvida, sendo este um fator de grande importância para a avaliação da sua durabilidade (especialmente tendo em conta a aplicação destas argamassas).

O ensaio perdurou até se constatar que as massas dos provetes estavam bastante semelhantes (o mais próximo possível) das massas iniciais. Estas massas iniciais correspondem às massas dos provetes no início do ensaio de capilaridade. Os provetes mantiveram toda a sua preparação realizada anteriormente (gaze e película aderente) pois assim a secagem também foi garantida apenas pelo topo superior.

Como já referido, o início deste ensaio coincidiu com o final do ensaio de capilaridade e deste modo, a massa final do primeiro corresponde à massa inicial do segundo. As várias medições realizadas durante todo o ensaio foram realizadas numa balança de precisão 0,001g. No primeiro dia de ensaio foram efetuadas medições de hora a hora até se perfazerem sete horas. No segundo dia foram

realizadas três medições às 24, 26 e 29 horas (após o início do ensaio). Posteriormente foram apenas realizadas pesagens de 24 em 24 horas até que a massa dos provetes se aproximasse das suas massas iniciais. Este processo demorou 576 horas (24 dias).

Em simultâneo com o decorrer do ensaio foi determinada a curva de secagem de cada provete. Esta traduz o teor em água [%] (W_i , quantidade de água existente em função da área do topo) em função do tempo i [h], em que a primeira é definida através da seguinte fórmula:

$$W_i = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100 \text{ [%]}$$

(Equação 5.9)

Em que:

m_i – massa do provete no instante t_i [kg];

m_0 – massa do provete seco [kg].

Para melhor se complementar o ensaio foram ainda determinados outros dois parâmetros: a taxa de secagem (TS) e o índice de secagem (IS).



Figura 5.26 – Aspeto dos provetes prismáticos durante o ensaio de secagem

A taxa de secagem (TS) foi determinada através do declive com a horizontal do troço reto inicial da curva de secagem. Este troço inicial depende de caso para caso e assim, para cada provete (cada curva de secagem) foi escolhido o melhor intervalo de tempo, que foi semelhante para todos (24 horas).

Outro parâmetro avaliado com este ensaio foi o índice de secagem (IS). Este foi calculado através de um método simplificado de integração numérica, a regra do trapézio (Brito 2011; Faria 2012 b), através da seguinte expressão:

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [(t_i - t_{i-1}) \times \frac{W_{i-1} + W_i}{2}]}{W_{m\acute{a}x} \times t_f}$$

(Equação 5.10)

Em que:

t_i – tempo de ensaio i [h];

t_f – tempo final do ensaio [h];

W_i - quantidade de água no interior do provete no instante i [% relativamente à massa seca];

$W_{m\acute{a}x}$ - quantidade de água inicial [% relativamente à massa seca].

5.4.1.6 Condutibilidade Térmica

A condutibilidade térmica (λ) de um material é importante pois se a argamassa em estudo for aplicada no reboco de uma habitação, poderá contribuir, com a sua espessura, para que esta proporcione um conforto térmico no interior. É uma propriedade característica de cada material que traduz a forma como este se deixa atravessar pelo calor. Desta forma, pode ser definido como a quantidade de calor que atravessa a unidade de espessura do material, por unidade de área, por unidade de diferença de temperatura, $W/m \cdot ^\circ C$ (Henriques 2007).

Para a determinação da condutibilidade térmica foi apenas necessário o equipamento apropriado para tal, denominado ISOMET 2104 (Heat Transfer Analyser), utilizando uma sonda de superfície API 210412, sendo o procedimento de ensaio baseado no manual do equipamento. Este ensaio foi realizado nos provetes prismáticos aos 90 dias e, para cada traço, foram realizadas três medições para cada provete individual.

Antes de se iniciar o ensaio, o provete em questão foi colocado sobre uma placa de XPS por forma a garantir a homogeneidade da condição de fronteira inferior, em todos os ensaios (Figura 5.27). De seguida, colocou-se a sonda por cima a face oposta à face rugosa e deu-se início ao ensaio, selecionando a opção Thermal Conductivity do equipamento. O tempo decorrente da medição térmica foi aproximadamente de 15 a 20 minutos. Além do resultado pretendido com este ensaio (condutibilidade térmica, λ [$W/m \cdot K$]), o equipamento determinou ainda o calor específico por volume, c_p [$J/m^3 \cdot K$] e a difusibilidade térmica, a [m^2/s].



Figura 5.27 – Condutibilidade térmica em provete prismático

Como se pode verificar pela Figura 5.27 a sonda é ligeiramente maior do que o provete que está a analisar. Assim sendo, os resultados deste ensaio não correspondem totalmente à realidade mas permitem comparar valores entre os provetes idênticos das argamassas e com argamassas de outros estudos analisadas através de provetes com a mesma geometria.

5.4.1.7 Porosidade Aberta e Massa Volúmica Aparente

A determinação da porosidade aberta e da massa volúmica aparente foram determinadas no mesmo ensaio e com base na norma NP EN 1936 (IPQ 2008). Para tal, foram utilizados os topos dos provetes provenientes do ensaio de resistência à compressão. Apesar de o ensaio ser baseado na norma, foram feitas algumas adaptações.

Os topos resultantes dos provetes do ensaio de resistência à compressão foram colocados num tabuleiro e inseridos numa estufa ventilada a 60°C durante cerca de uma semana.

No dia anterior ao ensaio de porosidade aberta retiraram-se os provetes da estufa para se proceder à sua preparação. Tal preparação consistiu em envolver cada um dos provetes em tecido de nylon, fechando os topos com fio de pesca. Terminada esta preparação, os provetes foram colocados novamente na estufa para o dia seguinte.

No dia do ensaio retiraram-se novamente os provetes da estufa e estes foram pesados numa balança de precisão de 0,001g, obtendo assim as massas m_1 [g]. Finalizadas as medições os provetes foram colocados no exsicador que se encontrava ligado a um tubo de introdução de água e a uma bomba de vácuo (Figura 5.28 a). Tapou-se o exsicador, por forma a ser garantida a estanquicidade e ligou-se a bomba de vácuo, reduzindo a pressão no interior (Figura 5.28 b). Estas condições foram mantidas durante 24 horas. Passadas as 24 horas foi introduzida água no exsicador através do tubo que a ele está ligado. A quantidade de água foi a necessária para que os provetes ficassem totalmente submersos (Figura 5.28 c). Este processo foi realizado de forma lenta (durante aproximadamente 15 minutos) para que a água conseguisse preencher todos os vazios dos provetes. Estas condições foram mantidas por mais 24 horas. Depois de decorridas as 24 horas, a bomba de vácuo foi desligada, ficando assim até ao dia seguinte (mais 24 horas).

No último dia do ensaio, foram realizadas as medições das massas. Cada provete foi retirado do exsicador e imediatamente pesado em imersão (pesagem hidrostática, m_2) utilizando um suporte acoplado debaixo de uma balança, colocado dentro de água (Figura 5.29 a). Esta pesagem foi efetuada de três em três provetes, e quando a pesagem destes terminava eram colocados sobre um pano molhado para absorver a água em excesso. Finalizada a pesagem hidrostática de três provetes, estes foram pesados, perfazendo assim a massa saturada m_3 (Figura 5.29 c).

Através das várias pesagens (m_1 , m_2 e m_3) foi possível determinar a massa volúmica aparente e a porosidade aberta. Assim, a massa volúmica aparente (MP_{ap}) determinou-se através da seguinte fórmula:

$$MP_{ap} = \frac{m}{V} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times 10^3 [kg/m^3] \quad \text{(Equação 5.11)}$$

Em que:

m – massa do provete;

V – volume total do provete;

m_1 – massa seca do provete [g];

m_2 – massa hidrostática do provete [g];

m_3 – massa saturada do provete [g].

A porosidade aberta determinou-se com a seguinte fórmula:

$$P_{ab} = \frac{v}{V} = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100 [\%] \quad \text{(Equação 5.12)}$$

Em que:

v – volume de vazios do provete.



Figura 5.28 – Provetes inseridos no exsiccador (a), aspecto geral do equipamento montado (b), provetes submersos em água no interior do exsiccador (c)



Figura 5.29 – Balança onde é realizada a pesagem hidrostática (a), aspecto geral das duas balanças (b), pesagem saturada (c)



Figura 5.30 – Provetes após o ensaio

5.4.1.8 Porosimetria de Mercúrio

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) permite uma melhor compreensão sobre a estrutura porosa da argamassa em questão. Este foi realizado aos provetes prismáticos a 90 dias de idade. Os provetes utilizados foram os provenientes do ensaio de resistência à compressão.

Na análise MIP o volume de metal líquido que penetra na amostra é medido em função da pressão aplicada. O volume total de mercúrio necessário para encher todos os poros acessíveis é considerado o volume total de poros.

A medição da porosimetria realizou-se através do porosímetro “Autopore IV 955”. Este equipamento dispõe de duas portas de baixa pressão e uma porta de alta pressão, à qual está associado a um software de cálculo que também regista valores obtidos.

Na preparação das amostras para o ensaio, os provetes foram desgastados uniformemente em todo o seu contorno por forma a obterem as dimensões apropriadas para caberem no equipamento (Figura 5.31 a).

Antes de se dar início ao ensaio, os provetes (já preparados) foram colocados em estufa a 40°C por forma a atingirem massa constante. Posteriormente foram retirados da estufa e introduzidos no exsiccador com sílica gel, para atingirem a temperatura ambiente em condições de humidade controlada. Depois de pesado introduziu-se o provete na cápsula do penetrómetro de ensaio, colocando no bordo desta uma pequena quantidade de massa de selagem, selando de seguida a cápsula. Determinou-se a massa do conjunto (penetrómetro e amostra). O ensaio em si iniciou-se em modo de baixa pressão. Após a colocação do penetrómetro na respetiva porta, a pressão no interior do sistema de ensaio foi reduzida até ao valor de 100 μmHg . Seguidamente introduziu-se o mercúrio preenchendo na totalidade o volume circundante da amostra e a haste do penetrómetro. Deu-se então início ao processo de intrusão do mercúrio nos poros da amostra, aumentando a pressão em 15 patamares pré-definidos. Terminada a fase da baixa pressão (pressão atmosférica) retirou-se o penetrómetro e repetiu-se a pesagem do conjunto (penetrómetro amostra mercúrio). Iniciou-se então o processo da alta pressão colocando o penetrómetro na porta correspondente, passando por 67 patamares de incremento de pressão e 27 patamares de extrusão. Durante todo este processo o software regista o volume de mercúrio introduzido. No final do ensaio o software informático efetuou automaticamente os cálculos necessários relativos à intrusão incremental e cumulativa de mercúrio e as determinações de características da amostra como porosidade aberta, $P_{ab.}$, massa volúmica e diâmetro de poros.



Figura 5.31 – Preparação dos provetes (a), pormenor do equipamento (b), conjunto do equipamento (c)

5.4.1.9 Resistência aos Sulfatos

O ensaio da resistência aos sulfatos foi realizado com base na norma NP EN 12370 (IPQ 2001), que especifica o método de ensaio para avaliação da resistência relativa aos danos causados pela cristalização de sais em pedras naturais. Com base em estudos anteriores (Faria 2004a), a solução de imersão foi corrigida por forma a esta ser menos agressiva (destrutiva) para as argamassas de cal. Deste modo, foi utilizada uma concentração da solução de imersão de 3,09% do sulfato de sódio anidro. O procedimento adotado no ensaio é descrito seguidamente.

Antes do início do ensaio todos os provetes foram secos. Para tal foram colocados numa estufa durante 48 horas a 105°C por forma a ficarem com massa constante. Passadas as 48 horas retiraram-se os provetes da estufa e esperou-se cerca de 30 minutos para estes arrefecerem à temperatura ambiente. Entretanto foi preparada uma solução não saturada de sulfato de sódio anidro a 3,09% obtida através da adição de 32,9 g de sulfato de sódio (Na_2SO_4) por litro de água (Figura 5.32 b). Esta solução foi utilizada ao longo de todos os ciclos do ensaio. Foi então colocada numa caixa de plástico (Figura

5.32 a) a solução de imersão, que foi pesada em duas dosagens (cada uma com 10 litros de água e 329 gramas de sulfato de sódio anidro). Passados os aproximadamente 30 minutos referidos (provetes arrefecidos), estes foram pesados individualmente (massas iniciais) numa balança de precisão 0,001g. De seguida colocaram-se os provetes no interior da caixa por forma a ficarem submersos na solução, dando início aos ciclos do ensaio (Figura 5.32 c). Foram garantidas as distâncias mínimas mencionadas na norma: 8 ± 2 mm de altura de solução acima dos provetes, 10 mm de espaçamento entre provetes e 20 mm de espaçamento entre os provetes e as paredes da caixa onde estes se encontravam. Os provetes permaneceram imersos na solução durante 2 horas. Ao fim das 2 horas de imersão os provetes foram retirados da caixa, distribuídos num tabuleiro e colocados novamente na estufa a 105°C por 24 horas. Passadas as 24 horas de estufa os provetes foram retirados da mesma, deixando-se arrefecer por 30 minutos. Seguidamente pesaram-se e colocaram-se novamente em imersão.

Este procedimento de permanência de 24 horas em estufa, 30 minutos de arrefecimento, pesagem, colocação dos provetes em solução durante 2 horas, e recolocação dos mesmos na estufa por mais 24 horas, perfaz um ciclo do ensaio. Os ciclos repetiram-se 25 vezes. Este ensaio decorreu diariamente, com exceção dos fins-de-semana, nos quais os provetes permaneceram no interior da estufa.

Aquando o ensaio foi possível verificar que os provetes com maior percentagem de terra (25%) expeliam muitas bolhas de ar nos primeiros segundos de imersão de solução (Figura 5.33).



Figura 5.32 – Caixa onde é realizado o ensaio (a), preparação da solução (b), provetes colocados na caixa em imersão na solução (c)

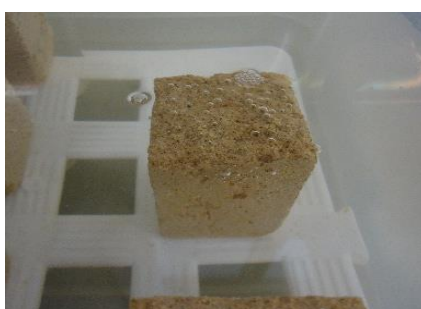


Figura 5.33 – Pormenor de um provete (25% de terra) imerso na solução

5.4.2 Provetes em Suporte de Tijolo

Os provetes em suporte de tijolo foram ensaiados, não destrutivamente, aos 28 e aos 90 dias (sendo os ensaios em ambas as idades semelhantes). Como já mencionado as dimensões dos tijolos utilizados para a realização destes provetes a ensaiar são de 20x30x7 (cm) e a espessura de argamassa colocada é cerca de 2 cm (Figura 5.34).



Figura 5.34 – Reboco em tijolo

5.4.2.1 Dureza Superficial – Durómetro

A determinação da dureza superficial de uma argamassa colocada sobre um tijolo pode ser determinada através de um durómetro Shore A (Figura 5.35 a) e teve por base a norma ASTM D2240 (2000). Este equipamento mede a resistência à penetração de um pino pressionado contra o material em estudo. A simplicidade deste ensaio permite a realização de diversas medições sobre a argamassa, que neste caso foram 10. O resultado final é obtido através da média de todos os 10 valores obtidos para cada tijolo. O durómetro fornece valores que se encontram entre 1 e 100 e a unidade destes mesmos valores é graus Shore-A. Este ensaio foi realizado aos 28 dias, e um pouco mais tarde dos 90, nomeadamente aos 131 dias de idade, devido à indisponibilidade do equipamento.

Antes do início da realização do ensaio com o durómetro, todos os tijolos foram limpos na sua superfície com uma pequena vassoura, de forma a eliminar vestígios de material solto e que poderiam influenciar os resultados. O ensaio consistiu apenas em encostar o durómetro à superfície da argamassa e retirar o valor mencionado no mostrador do equipamento (Figura 5.35 b).



Figura 5.35 – Durómetro, DS_D (a), realização do ensaio (b)

5.4.2.2 Velocidade de Propagação de Ultra-sons

O presente ensaio seguiu a ficha de ensaio LNEC FE Pa 43 (2010) e tem por objetivo determinar a compacidade das argamassas. Esta propriedade é medida através da velocidade de propagações das ondas ultrassónicas através do material em estudo. Este ensaio foi realizado aos provetes em suporte de tijolo aos 28 e 90 dias.

O material necessário para este ensaio foi apenas a máquina apropriada emissora de ultra-sons e um gel (Figura 5.36 b). A colocação do gel permitiu melhorar o contacto entre os emissores e o provete. Para a realização do ensaio foram escolhidos seis pontos no material a ensaiar, todos eles

com distâncias semelhantes entre eles por forma a homogeneizar os resultados obtidos para os diversos provetes. Os pontos foram designados de “A” a “F” (Figura 5.36 a), e as medições foram realizadas da seguinte forma:

- Colocou-se um dos transdutores no ponto A, e o outro no ponto B (Figura 5.36 c). Mantendo os transdutores na mesma posição, efetuou-se a medição. Repetiu-se este processo três vezes;
- Mantendo o ponto A fixo, colocou-se o transdutor antes colocado no ponto B, agora no ponto C, repetindo-se as medições;
- Este processo repetiu-se até ficar fixo o ponto A e o ponto F e, após esta última medição, fixou-se o ponto F, colocando o outro transdutor no ponto B;
- Realizaram-se medições até aos pontos F e E.

Os resultados retirados da máquina dos ultra-sons saíram em tempo e, conhecendo a distância entre o emissor e o recetor, posteriormente são convertidos em velocidades de atravessamento [m/s].



Figura 5.36 – Folha com os pontos utilizados no ensaio (a), equipamento necessário (b), realização do ensaio (c)

Tendo em conta que com este ensaio é possível obter o módulo de elasticidade dinâmico, este foi também realizado aos provetes prismáticos (aos 90 dias).

$$Ed = \frac{V^2 \times \rho \times (1 + \nu) \times (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \text{ [MPa]}$$

(Equação 5.13)

Em que:

V – Velocidade de propagação de ultra-sons [km/s];

ρ – Massa volúmica do provete em questão [kg/m³];

ν – Coeficiente de Poisson [-].

Para a determinação da massa volúmica dividiu-se a massa do provete pelo seu volume (a x b x L). O coeficiente de Poisson utilizado foi de 0,2.

5.4.2.3 Condutibilidade Térmica

O ensaio foi efetuado aos provetes em suporte de tijolo tanto aos 28 como aos 90 dias. Realizaram-se 6 medições por tijolo, e o resultado final é a média desses mesmos 6 valores, em W/m.K. O procedimento utilizado foi semelhante ao do ponto 5.4.1.6 (para os provetes prismáticos). Com a diferença nos pontos de determinação.



Figura 5.37 – Conjunto de tijolo e equipamento (a), realização do ensaio (b)

5.4.2.4 Absorção de Água sob Baixa Pressão - Tubos de Karsten

Uma outra característica muito importante numa argamassa no estado endurecido é a sua capacidade de absorver água. Por forma a avaliar esta característica realizou-se o ensaio de absorção de água sob baixa pressão através da utilização de tubos de Karsten. De igual forma ao ensaio anterior, e tendo em conta que esta propriedade é muito importante na caracterização do comportamento das argamassas em estudo, este ensaio não destrutivo foi realizado aos 28 e aos 90 dias nos provetes de argamassas sobre tijolo.

Os documentos que foram base deste ensaio são a ficha de ensaio Fe Pa 39 do LNEC e o Test nºII4 da RILEM (1980a). O equipamento necessário para a realização deste ensaio foi: um cronómetro, plasticina, esguicho e os tubos de Karsten (Figura 5.38 a).

Colocou-se o tijolo a ensaiar sobre o pano. Com a plasticina fizeram-se pequenos círculos com aproximadamente o mesmo tamanho da abertura do tubo de Karsten. Colocou-se a plasticina em redor da abertura do tubo. Encostando o tubo com a plasticina ao tijolo com muito cuidado, pressionou-se para assegurar a colagem, tentando sempre que fosse para o interior da abertura do tubo a menor quantidade possível de plasticina, pois assim alterava a área de absorção. Encheu-se o primeiro tubo com água, até aos 0 ml, e deu-se início à contagem do tempo. Passado 1 minuto encheu-se o segundo tubo, e passados 2 minutos encheu-se o terceiro tubo. Assim, o segundo tubo ficou com uma discrepância do primeiro de 1 minuto e o terceiro com 2 minutos do primeiro. Sempre que a quantidade de água no tubo atingia os 4 ml absorvidos voltava-se a encher o mesmo com o esguicho. As medições das quantidades de água realizaram-se aos 5, 10, 15, 30 e 60 minutos.

Os resultados obtidos com este ensaio permitem avaliar a capacidade de absorção de uma argamassa através de duas formas: através da quantidade de água absorvida em determinado período de tempo, e o tempo necessário para argamassa absorver 4 ml de água. É também possível determinar o coeficiente de absorção de água, que traduz a quantidade de água absorvida numa determinada área durante determinado período de tempo.

$$C_{\text{absorção}} = \frac{X \times 10^{-3}}{d^2 \times \left(\frac{\pi}{4} \times 10^{-6} \sqrt{t}\right)}$$

(Equação 5.14)

Em que:

$C_{\text{absorção}}$: coeficiente de absorção de água sob baixa pressão numa superfície [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{t}^{0.5})$];

X: quantidade de água absorvida [ml];

d: diâmetro do respetivo tubo em contacto com o suporte [mm];

t: duração da leitura [minutos].

Este coeficiente foi determinado para duas propriedades: coeficiente de absorção total durante 1 hora de ensaio ($C_{\text{abs.1h}}$), em que X corresponde à quantidade de água absorvida em 1 hora ($t = 60$ minutos); e o coeficiente de absorção do tempo necessário para absorver 4 ml de água ($C_{\text{abs.4ml}}$), em que o t corresponde ao tempo necessário para absorver 4 ml de água ($X = 4$ ml).

Mesmo sem observar os resultados, aquando do ensaio foi possível observar que os rebocos que possuíam maior quantidade de terra absorviam água com maior velocidade. A velocidade de absorção de água das argamassas com 25% de terra foi bastante superior às restantes. Nestes casos visualizou-se que o tijolo ficava molhado na parte de trás.

Um outro aspeto a ter em conta é a sensibilidade deste ensaio face à qualidade da plasticina utilizada, pois a aderência dos tubos ao suporte depende desta propriedade.

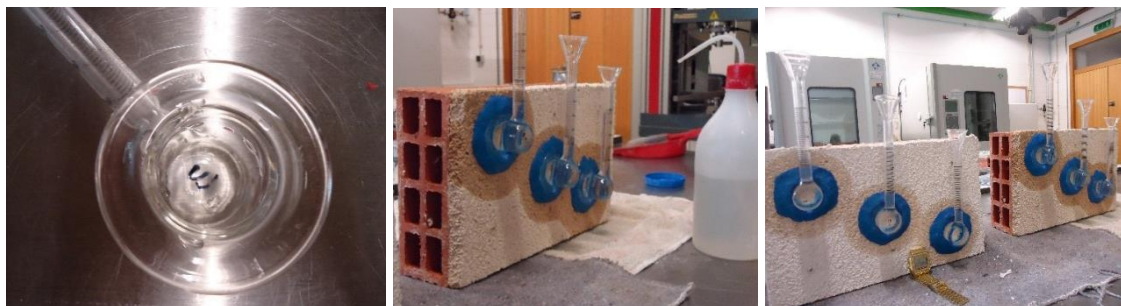


Figura 5.38 - Tubo de Karsten (a), tijolo com os tubos colocados e esguicho (b), aspeto geral do ensaio realizado em dois tijolos simultaneamente (c)



Figura 5.39 - Reboco após a queda de dois dos tubos (a), reboco com baixo teor de terra (b), reboco com alto teor de terra (c)

5.4.2.5 Porosimetria de Mercúrio

A determinação da porosimetria nos provetes em suporte de tijolo foi realizada do mesmo modo que aos provetes prismáticos 5.4.1.8. As amostras a ensaiar foram retiradas do reboco aplicado no tijolo com auxílio de uma rebarbadora (Figura 5.40) à idade de 90 dias.



Figura 5.40 – Remoção de amostra do reboco aplicado no tijolo para o ensaio de porosimetria

5.4.3 Ensaio ao Reboco sobre Murete de Taipa

Após 90 dias da aplicação das argamassas de reboco sobre o suporte que tinha sido previamente caracterizado, realizaram-se os ensaios de caracterização. Estes ensaios pretenderam caracterizar as propriedades e comportamento das argamassas aplicadas em suporte de taipa.

Como já referido, o estado do tempo é de extrema importância nesta fase do trabalho, pois influência fortemente os resultados obtidos. Por forma a controlar este aspeto, foram recolhidas informações relativas a dados meteorológicos ocorrentes nos dias posteriores à aplicação das argamassas e na semana antes dos ensaios aos 90 dias (Anexo A.2).



Figura 5.41 – Aspeto do reboco aplicado no murete de taipa aos 90 dias

5.4.3.1 Velocidade de Propagação de Ultra-sons

A determinação da velocidade de propagação de ultra-sons foi realizada de igual modo aos provetes em suporte de tijolo (ponto 5.4.2.2). No entanto, difere nos pontos escolhidos.



Figura 5.42 – Pontos utilizados no ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons

Como se pode ver na Figura 5.42 foram escolhidos quatro pontos (A, B, C e D, representados em alinhamento horizontal). As distâncias ensaiadas foram AB, AC e AD, e foram efetuadas medições em quatro níveis de cada argamassa aplicada.

5.4.3.2 Dureza Superficial - Esclerómetro pendular

O presente ensaio encontra-se descrito no ponto 5.1.2.3. Foram efetuadas várias medições em três zonas distintas de cada argamassa.



Figura 5.43 – Esclerómetro pendular aplicado no reboco

5.4.3.3 Dureza Superficial – Durómetro

Devido à indisponibilidade do durómetro, este ensaio foi realizado antes de serem atingidos os 90 dias de idade do reboco (15 dias antes). Foram realizadas cinco medições para cada argamassa, de acordo com metodologia descrita em 5.1.2.2.

5.4.3.4 Absorção de Água sob Pressão - Tubos de Karsten

O presente ensaio encontra-se devidamente descrito nos pontos 5.1.2.4 e 5.4.2.4. Foram utilizados dois tubos de Karsten para cada argamassa.



Figura 5.44 – Pormenor de dois tubos de Karsten aplicados no reboco

5.4.3.5 Porosimetria de Mercúrio

Para a determinação da porosimetria das argamassas aplicadas no murete de taipa foram retiradas quatro amostras (com auxílio de um serrote), uma de cada argamassa, na zona de cima mais protegida e na zona de baixo, mais próxima do solo (Figura 5.45). Estas amostras foram devidamente preparadas e ensaiadas como já foi descrito em pontos anteriores. A idade deste ensaio foi aos 118 dias (um pouco mais avançada do que os 90 dias).



Figura 5.45 – Remoção de amostras as argamassas aplicadas no murete de taipa

6 Apresentação e Análise de Resultados

No presente capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos em todos os ensaios efetuados aos suportes, aos constituintes e às argamassas. Na Tabela 7.2 estão compilados os principais resultados obtidos nos diversos ensaios realizados às argamassas.

6.1 Caracterização dos Suportes

6.1.1 Murete de Taipa

Como referido no ponto 5.1.2 (nos respetivos ensaios) os pontos onde se realizaram os ensaios foram escolhidos cuidadosamente. Como tal, os resultados obtidos são expressos como resultados nesses mesmos pontos.

6.1.1.1 Condutibilidade Térmica

Os pontos onde foram realizados os ensaios de condutibilidade térmica estão mencionados na Tabela 6.2.

Tabela 6.1 – Esquematização dos pontos no murete (condutibilidade térmica)

| | | | |
|---|---|---|---|
| A | E | I | M |
| B | F | J | N |
| C | G | K | O |
| D | H | L | P |

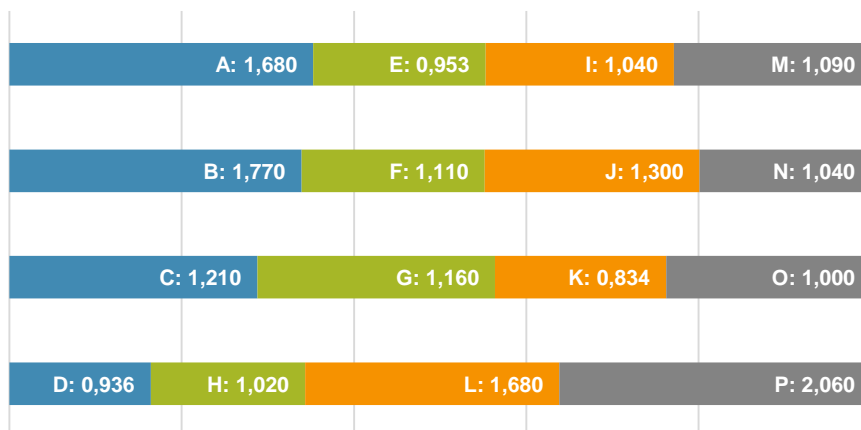


Figura 6.1 – Valores de condutibilidade térmica do murete de taipa

A média da condutibilidade térmica do murete é de $1,243 \pm 0,346$ W/m.K. Tendo em conta que as argamassas da presente dissertação foram aplicadas na metade direita (lado Norte) do murete, os pontos que mais interessam são os do “I” ao “P”. As médias dessas duas colunas encontram-se na Tabela 6.3.

Tabela 6.2 – Médias de condutibilidade térmica de alguns dos pontos

| Pontos | λ [W/m.K] | | |
|--------|-------------------|-------|-------|
| | Cada ponto | Média | DP |
| I | 1,040 | 1,214 | 0,316 |
| J | 1,300 | | |
| K | 0,834 | | |
| L | 1,680 | | |
| M | 1,090 | 1,298 | 0,441 |
| N | 1,040 | | |
| O | 1,000 | | |
| P | 2,060 | | |

6.1.1.2 Dureza Superficial – Durómetro e Esclerómetro Pendular

Através destes dois equipamentos (durómetro e esclerómetro pendular) foi possível avaliar a dureza superficial do murete de taipa.

Relativamente ao ensaio através do durómetro, e tendo em conta as condições climáticas aquando a realização deste ensaio, foram apenas ensaiados 10 pontos (escolhidos o mais abrigados possível). A média destas medições é de $71,5 \pm 11,8$ graus shore-A.

A distribuição de pontos adotada para o ensaio com esclerómetro pendular foi a que se encontra esquematizada na Tabela 6.4.

Tabela 6.3 – Esquematização dos pontos do murete (esclerómetro pendular)

| | | | |
|---|---|---|---|
| A | D | G | J |
| B | E | H | K |
| C | F | I | L |

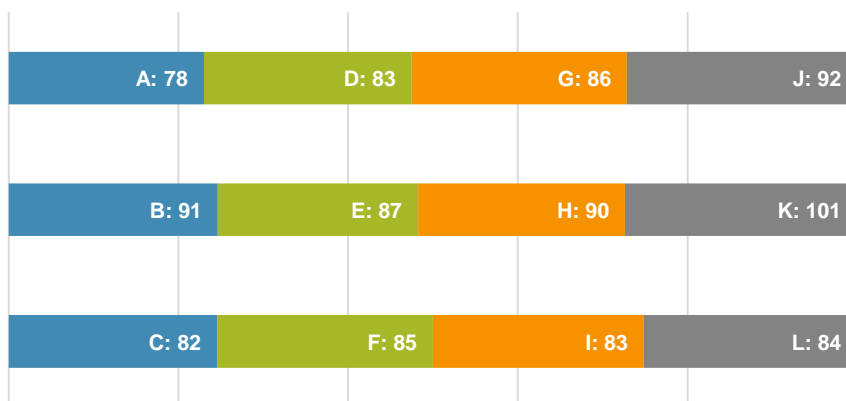


Figura 6.2 – Dureza superficial (através de esclerómetro) do murete de taipa

A média da totalidade do murete é de 87 ± 6 escala Vickers. As médias do lado norte são as dos pontos “G” ao “L”. Estes valores encontram-se na Tabela 6.5.

Tabela 6.4 – Médias de dureza superficial de alguns dos pontos

| Pontos | DS _E [escala Vickers] | | |
|--------|----------------------------------|-------|-----|
| | Cada ponto | Média | DP |
| G | 86 | 86 | 2,9 |
| H | 90 | | |
| I | 83 | | |
| J | 92 | 92 | 6,9 |
| K | 101 | | |
| L | 84 | | |

6.1.1.3 Absorção de Água sob Baixa Pressão – Tubos de Karsten

Tendo em conta a dificuldade encontrada na realização deste ensaio, os resultados foram tratados em termos das quantidades de água absorvidas aos 5 minutos, dos períodos de tempo necessários para se absorver 4 ml de água e os respetivos coeficientes de absorção (pois a maioria dos tubos caíram muito antes de se atingir a totalidade de uma hora de ensaio). Foram utilizados 8 tubos de Karsten em dois alinhamentos superiores (mais perto do topo). Não foram colocados mais perto do solo pois, como havia chovido nos dias anteriores, o murete encontrava-se bastante molhado (especialmente na zona mais próxima do solo) e a plasticina não aderiu. A esquematização encontra-se na Tabela 6.6.

Tabela 6.5 – Esquematização da colocação dos tubos de Karsten

| | | | |
|-------|-------|-------|-------|
| Tubo1 | Tubo2 | Tubo3 | Tubo4 |
| Tubo5 | Tubo6 | Tubo7 | Tubo8 |

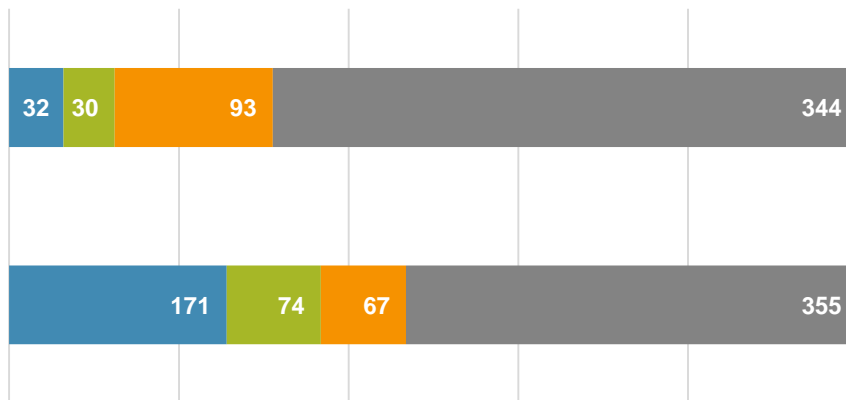


Figura 6.3 – Períodos de tempo necessários para absorção de 4 ml de água no murete de taipa

A média do coeficiente de absorção de 4 ml de água é de $7,19 \pm 2,97 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$ e a média do coeficiente de absorção de 5 minutos é de $8,70 \pm 6,69 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$. Os tubos que mais importam são os tubos 3, 4, 7 e 8. As médias destes encontram-se na Tabela 6.7.

Tabela 6.6 – Absorção de água sob baixa pressão do murete de taipa

| Tubos | Qt.abs.5min [ml] | | | $C_{\text{abs.5min}} [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})]$ | | $C_{\text{abs.4ml}} [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})]$ | | Tempo _{4ml} [segundos] | | |
|---------------|------------------|--------------|------|---|--------------|--|-------------|---------------------------------|---------------|-----|
| | Cada tubo | Média | DP | Cada tubo | Média | Cada tubo | Média | Cada tubo | Média | DP |
| Tubo 3 | 11,9 | 13,25 | 1,35 | 11,20 | 12,46 | 6,76 | 7,36 | 93 | 80,00 | 13 |
| Tubo 7 | 14,6 | | | 13,73 | | 7,96 | | 67 | | |
| Tubo 4 | 3,6 | 3,55 | 0,05 | 3,22 | 3,35 | 3,34 | 3,50 | 344 | 349,50 | 5,5 |
| Tubo 8 | 3,5 | | | 3,49 | | 3,66 | | 355 | | |

6.1.2 Tijolo Furado – Condutibilidade Térmica e Absorção de Água sob Baixa Pressão

A caracterização deste suporte encontra-se descrita no ponto 5.1.1 e os resultados obtidos apresentam-se seguidamente.

A condutibilidade térmica obtida aproximadamente na caracterização do tijolo furado encontra-se na Tabela 6.1, onde também constam a quantidade de água total absorvida (1 hora de ensaio) e o respectivo coeficiente de absorção. A Figura 6.1 apresenta o valor médio e desvio padrão da quantidade de água absorvida sob baixa pressão pelo tijolo.

Tabela 6.7 – Caracterização do tijolo furado

| Tijolo furado | λ [W/m.K] | | $C_{abs.T}$ [kg/(m ² .min ^{0,5})] | Qt.-abs.1h [ml] |
|---------------|-------------------|-------|--|-----------------|
| | Média | DP | | |
| | | 0,596 | 0,083 | 0,69 |

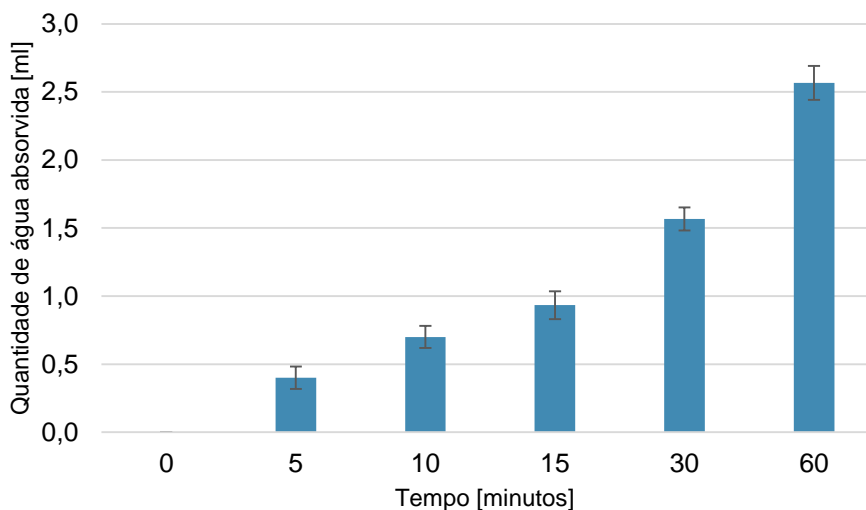


Figura 6.4 – Quantidade de água absorvida do tijolo

6.2 Constituintes das Argamassas

O presente ponto irá apresentar todos os resultados obtidos relativamente à caracterização dos constituintes utilizados, nomeadamente a terra.

6.2.1 Análise Granulométrica

Relativamente à análise granulométrica da terra, todo o processo foi repetido três vezes, por forma a obter valores mais reais. As massas de cada amostra foram 1,0650 kg, 1,0376 kg e 1,0359 kg. A curva granulométrica (Figura 6.5) é obtida através da média destas três medições. No anexo A.4. apresentam-se os valores das percentagens retidas acumuladas nos respetivos peneiros.

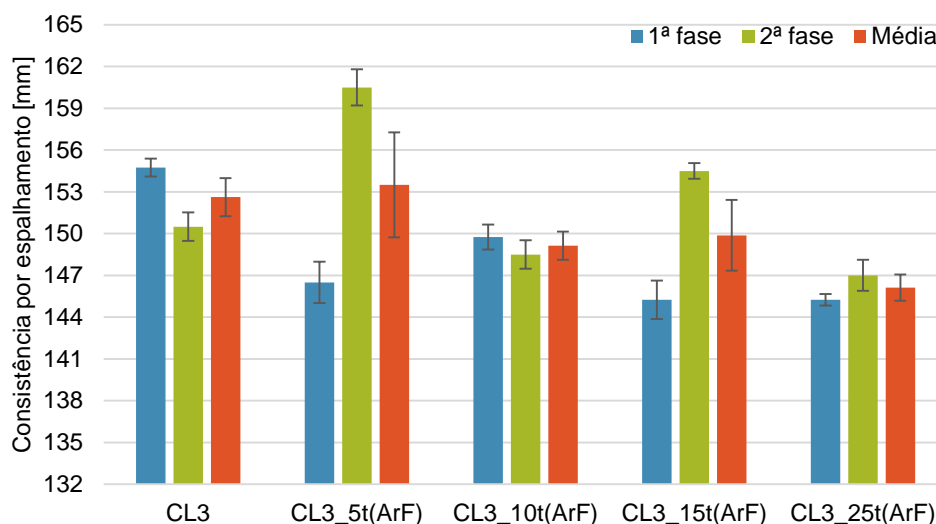


Figura 6.6 – Resultados da consistência por espalhamento

Analisando a Figura 6.6 (através das médias) é possível notar uma tendência decrescente no espalhamento das argamassas com terra. Relativamente às duas primeiras, o valor do espalhamento aumenta ligeiramente. Aquando das amassaduras foi possível verificar, tanto visualmente com manualmente (com a colher de pedreiro), que a trabalhabilidade das argamassas era bastante diferente à medida que se introduzia terra. A argamassa de referência (CL3) tinha um aspeto mais fluido, com falta de finos, contrariamente à argamassa com 25% de terra (CL3_25t(ArF)), que apresentava uma baixa trabalhabilidade pois tinha um aspeto muito “barrento”.

Um fator a ter em conta e que influencia fortemente este ensaio foi o operador que o realizou. Houve um operador diferente na primeira e segunda fase de amassadura, nas amassaduras das argamassas CL3_5t(ArF) e CL3_15t(ArF); muito possivelmente daí as diferenças significativas entre elas (da primeira para a segunda fase de amassadura). Assim, é expectável que se todos os ensaios de espalhamento tivessem sido realizados pelo mesmo operador, os resultados destas argamassas na 2ª fase de amassadura seriam um pouco mais baixos do que os obtidos.

Na Figura 6.7 encontra-se o andamento do espalhamento com a relação água/argila.

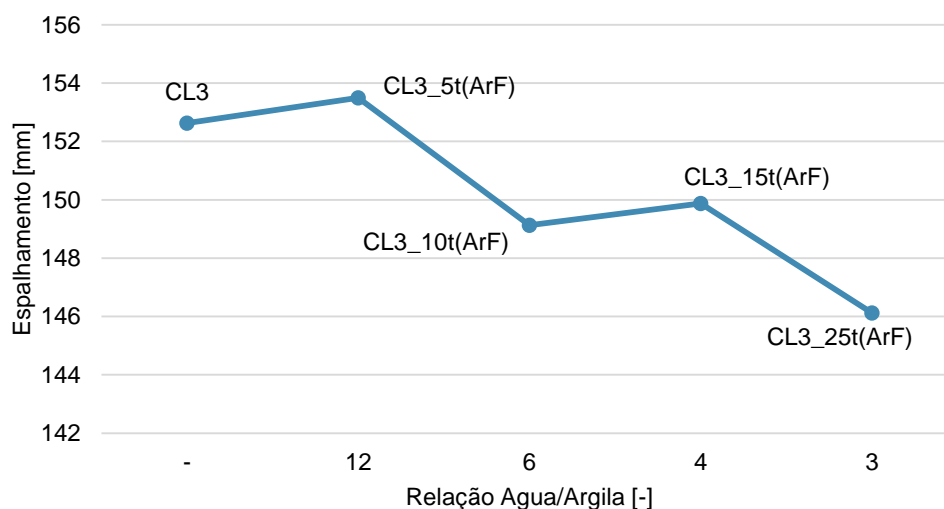


Figura 6.7 – Espalhamento e relação água/argila

6.3.1.2 Retenção de Água

Os resultados obtidos da capacidade de retenção de água das argamassas em estudo encontram-se na Figura 6.8. Na Figura 6.9 encontram-se também estes resultados juntamente com a relação água/argila.

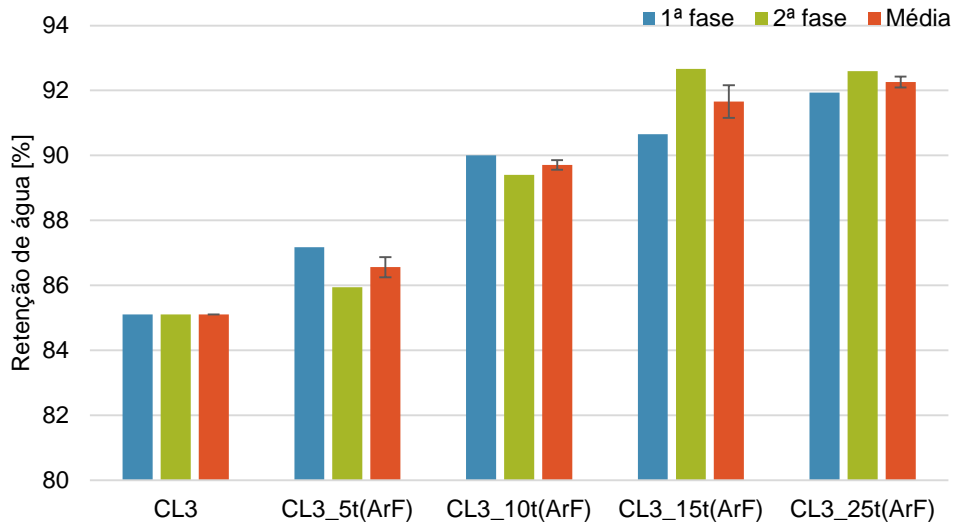


Figura 6.8 – Retenção de água

Como se pode verificar pela Figura 6.8, a capacidade de retenção de água das argamassas em questão aumenta linearmente com o aumento da percentagem de terra. Ou seja, o valor mais baixo corresponde à argamassa de referência (CL3) e o mais alto à argamassa com 25% de terra (CL3_25t(ArF)), sendo os valores de 85,1% e 92,3% respetivamente. Tendo em conta que a terra utilizada é bastante argilosa, estes resultados eram de esperar, pois um material argiloso possui uma elevada capacidade de absorção de água.

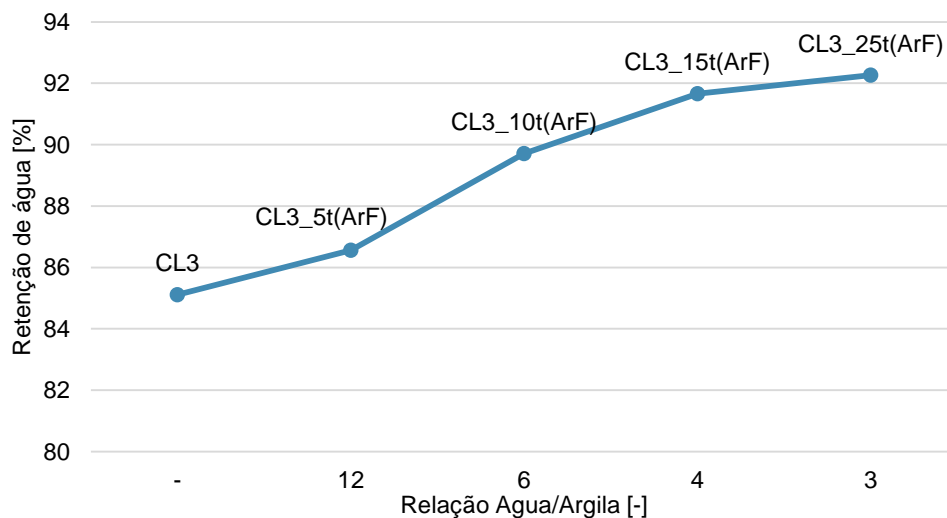


Figura 6.9 – Retenção de água e relação água/argila

6.3.1.3 Teor em Ar

Os resultados obtidos na determinação do teor em ar das argamassas em estudo encontram-se na Figura 6.10.

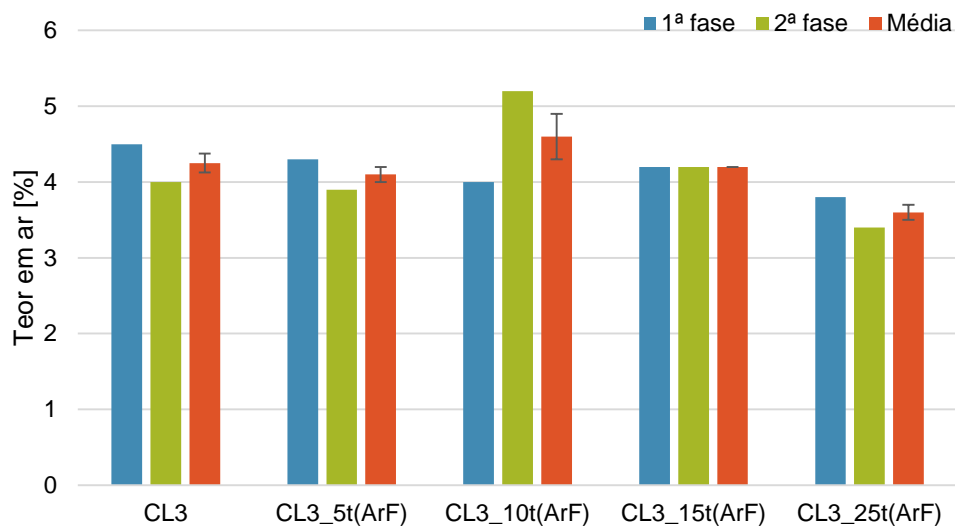


Figura 6.10 – Teor em ar

De acordo com a figura anterior, o teor em ar é muito semelhante entre argamassas; é apenas ligeiramente superior para a argamassa com 10 % de terra (CL3_10t(ArF)) e inferior para a argamassa com mais percentagem de terra (CL3_25t(ArF)), sendo os valores 4,6 e 3,6 % respetivamente.

6.3.1.4 Massa Volúmica

Na Figura 6.11 e 6.12 encontram-se os resultados obtidos de massa volúmica das cinco argamassas em estado fresco.

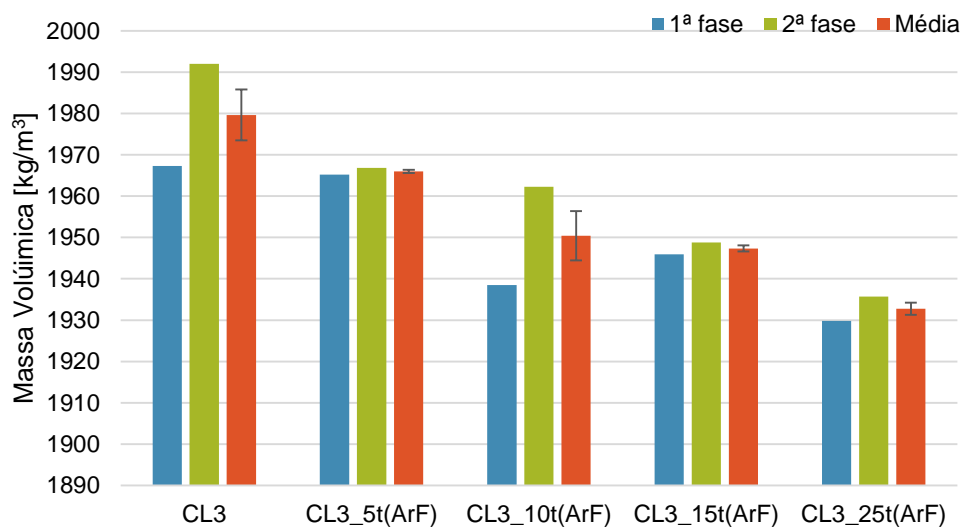


Figura 6.11 – Massa volúmica no estado fresco

Analisando a Figura 6.11 verifica-se que a massa volúmica diminui com o aumento da percentagem de terra. Deste modo, a argamassa que possui maior massa volúmica é a de referência, com um valor de 1980 kg/m³ (CL3), e a que possui menor valor é a argamassa com 25% de terra (CL3_25t(ArF)), com valor de 1933 kg/m³. A diminuição da massa volúmica é explicada pelo facto de substituir um material (APAS30) de baridade 1,388 g/cm³ por um material com menor baridade (terra argilosa), nomeadamente de 1,084 g/cm³.

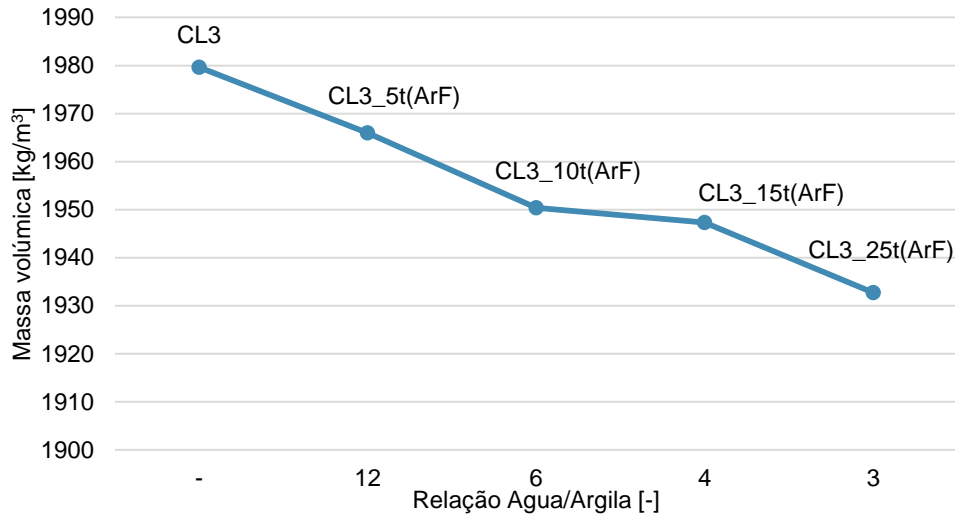


Figura 6.12 – Massa volúmica e relação água/argila

6.3.2 Argamassas em Estado Endurecido

O ponto 5.4 da campanha experimental engloba todos os ensaios realizados às argamassas em estado endurecido, independentemente da idade e tipo de provete. Assim, seguidamente são mencionados os resultados obtidos nesta fase.

6.3.2.1 Provetes Prismáticos

Em geral e sempre que nada é dito em contrário, para os ensaios de caracterização foram ensaiados três provetes de cada traço, dando um total de quinze provetes ensaiados. Nestes ensaios não foram utilizados provetes da segunda fase de amassadura e portanto os resultados são expressos por barras representativas da primeira fase. Os resultados obtidos para os provetes prismáticos encontram-se resumidos na Tabela 7.2.

6.3.2.1.1 Variações Dimensionais e Ponderais – Massa Volúmica Aparente

As medições das variações dimensionais foram realizadas aos 7, 28 e 90 dias. Foram medidos todos os provetes de ambas as amassaduras, ou seja, para este ensaio específico foram submetidos todos os provetes produzidos.

A determinação das variações dimensionais e ponderais dos provetes prismáticos não foi um ensaio muito preciso, uma vez que as medições efetuadas com a craveira não fornecem valores com muito detalhe. No entanto, as medições foram realizadas em bastantes provetes (18 de cada traço, sendo 9 de cada fase de amassadura), tornando assim os valores mais reais. Na Tabela 6.8 e Figura 6.13 encontram-se as massas volúmicas de cada argamassa, em termos de média de ambas as fases de amassadura (e os respetivos desvios padrão).

Tabela 6.8 – Massa volúmica aparente dos provetes prismáticos a várias idades

| Argamassas | Massa volúmica aparente [kg/m ³] | | | | | |
|---------------------|--|----|---------|----|---------|----|
| | 7 Dias | | 28 Dias | | 90 Dias | |
| | Média | DP | Média | DP | Média | DP |
| CL3 | 1747 | 15 | 1711 | 3 | 1719 | 1 |
| CL3_5t(ArF) | 1727 | 21 | 1683 | 18 | 1708 | 1 |
| CL3_10t(ArF) | 1733 | 34 | 1677 | 2 | 1699 | 8 |
| CL3_15t(ArF) | 1753 | 8 | 1682 | 5 | 1692 | 10 |
| CL3_25T(ArF) | 1747 | 27 | 1673 | 3 | 1698 | 7 |

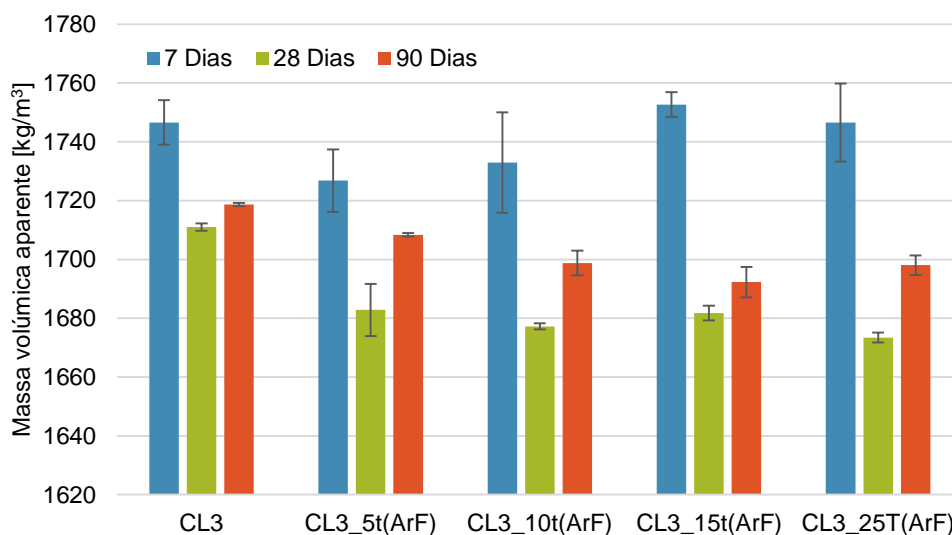


Figura 6.13 – Massa volúmica aparente de provetes prismáticos a várias idades

Apesar da incerteza do ensaio, verifica-se que a massa volúmica diminui bastante entre os 7 e os 28 dias, e que posteriormente aumenta dos 28 para os 90 dias (para todas as argamassas). A perda de massa (dos 7 para os 28 dias) está relacionada com a perda de água inicial nos primeiros dias de cura. O processo de cura das argamassas é regido pela reação química: $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{calor}$. Esta reação é acompanhada por um ganho de massa e volume das partículas sólidas, pois o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) possui uma densidade de 2,21 g/cm³ (e massa molar de 74 g/mol) e o carbonatado de cálcio (CaCO_3) possui uma densidade de 2,71 g/cm³ (e massa molar de 100 g/mol) (Pavlík et al. 2012). Ou seja, quanto maior massa volúmica tiver a argamassa, mais avançado está o processo de carbonatação.

6.3.2.1.2 Módulo de Elasticidade Dinâmico

Tendo em conta que o módulo de elasticidade quantifica a capacidade de uma argamassa absorver deformações, é bastante importante ter em conta esta grandeza na escolha de determinada argamassa (dependendo da sua função). Se uma argamassa possui um módulo de elasticidade elevado irá deformar menos do que uma argamassa que possua um valor baixo. Assim, se se pretender escolher uma argamassa para reabilitação de um edifício antigo, a escolha deve ser bastante cuidadosa, uma vez que as alvenarias antigas possuem alguma deformabilidade. Tendo em conta que as presentes argamassas poderão ser utilizadas para reabilitação de alvenarias de terra (taipa, adobe, etc.) não é benéfico que estas possuam módulo de elasticidade elevado, sendo as alvenarias de terra

bastante deformáveis. Deste modo, por forma a garantir compatibilidade de materiais (suporte e argamassa de revestimento) as argamassas não deverão ter um módulo de elasticidade muito elevado. Na Figura 6.14 encontram-se os valores obtidos de módulo de elasticidade dinâmico por ambos os métodos. Pelo método dos ultra-sons foi apenas ensaiado um provete e assim sendo, não existe média e desvio padrão.

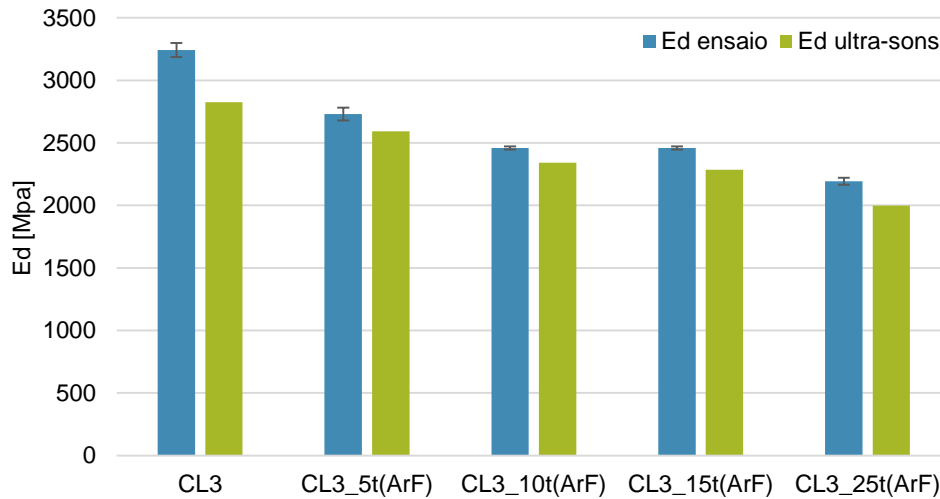


Figura 6.14 – Módulo de elasticidade dinâmico por ambos os métodos (provetes prismáticos aos 90 dias)

Verifica-se que ambos os métodos apresentam tendências semelhantes, querendo isto dizer que esta propriedade pode ser determinada tanto pelo equipamento como pela velocidade de propagação de ultra-sons. Para análise de resultados o método escolhido foi o do equipamento apropriado, pois foi realizado em três provetes de cada argamassa, contrariamente ao outro método.

Analisando a Figura 6.14 verifica-se que, com o aumento da percentagem de terra nas argamassas, o seu módulo de elasticidade diminui. O valor mais alto corresponde à argamassa de referência (CL3) e o mais baixo à argamassa com 25% de terra (CL3_25t(ArF)), sendo os valores de 3243 e 2193 MPa respetivamente.

6.3.2.1.3 Resistências à Tração por Flexão e à Compressão

Os resultados obtidos de resistência à tração por flexão e resistência à compressão encontram-se nas Figuras 6.15 e 6.16.

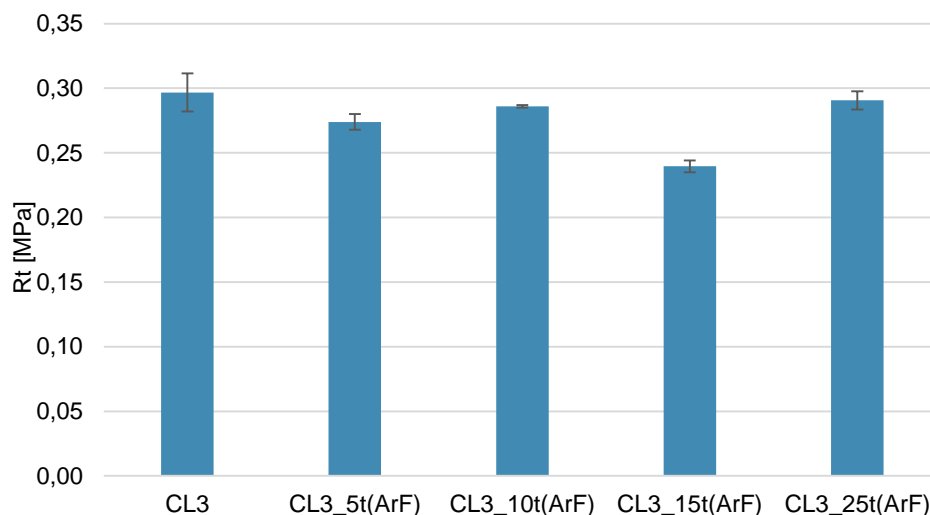


Figura 6.15 – Resistência à tração por flexão

Não se verifica uma tendência óbvia para a resistência à tração (Figura 6.15). O valor mais alto corresponde à argamassa de referência (CL3), mas muito semelhante aos valores das argamassas com 10 e 25% de terra, e o mais baixo à argamassa com 15% de terra (CL3_15t(ArF)), sendo de 0,3 e 0,24 MPa respectivamente. Das quatro argamassas que possuem terra, as percentagens correspondentes às maiores resistências à tração são assim as de 10 e 25%.

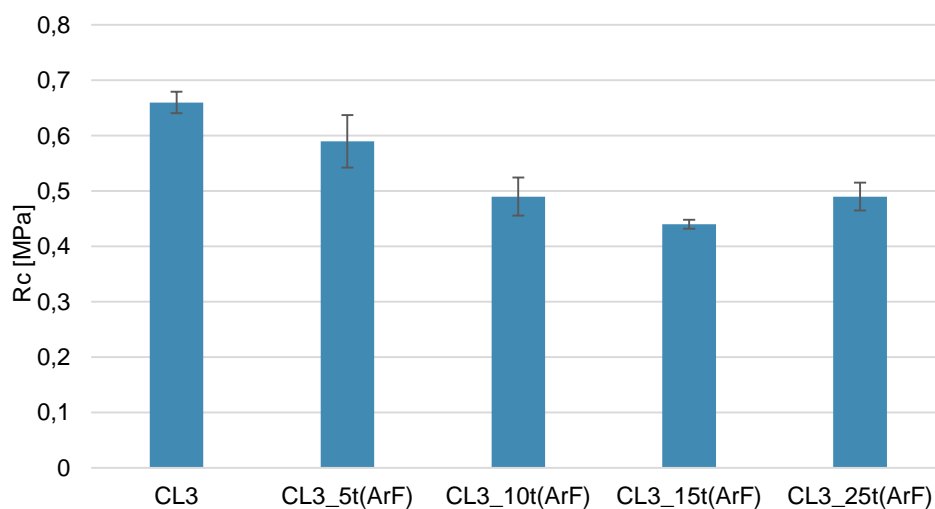


Figura 6.16 – Resistência à compressão

Analisando os valores da resistência à compressão (Figura 6.16) é possível constatar que diminui com o aumento da percentagem de terra, excetuando a argamassa com maior percentagem. Nesta última, o valor aumenta ligeiramente comparativamente à argamassa com 15%. Assim, o valor mais alto corresponde à argamassa de referência (CL3) e o valor mais baixo à argamassa com 15% de terra (CL3_15t(ArF)), sendo os valores de 0,66 e 0,44 MPa, respectivamente. Das quatro argamassas que possuem terra, a que apresenta maior valor de resistência à compressão é a argamassa que contém apenas 5% de terra.

6.3.2.1.4 Absorção de água por Capilaridade

Como foi explicado no ponto 5.4.1.4 os resultados obtidos com este ensaio são dois: coeficiente de capilaridade e o valor assintótico. Estes, encontra-se na Tabela 7.2 e também na Figura 6.19.

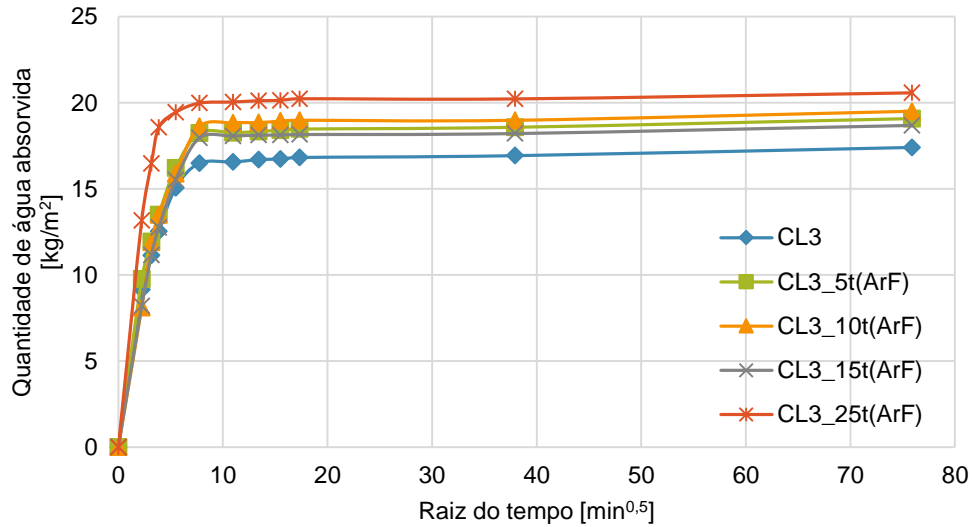


Figura 6.17 - Curvas de absorção capilar

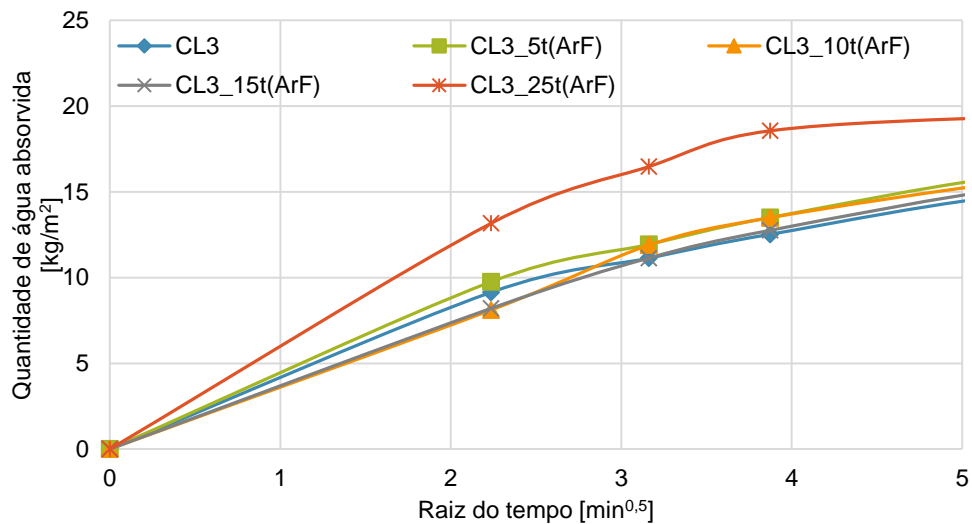


Figura 6.18 - Pormenor da fase inicial das curvas de absorção capilar

Analisando a curva de absorção capilar da Figura 6.17 verifica-se que a argamassa que possui menor valor assintótico é a CL3, sendo a CL3_25t(ArF) a que absorve maior quantidade. Ou seja, a argamassa que absorve mais água é a argamassa com maior percentagem de terra (25%), tal como era esperado. A argamassa que possui menor capacidade de absorção de água é a argamassa de referência (CL3).

Relativamente aos coeficientes de capilaridade, estes foram calculados numericamente entre os 0 e os 5 minutos para todas as argamassas. A verificação destes valores pode ser feita através da observação dos declives iniciais das curvas de absorção capilar. Ou seja, ao maior valor de coeficiente de capilaridade pertence o maior declive de reta. Tal pode ser verificado na Figura 6.18 em que os declives são (por ordem crescente) CL3_10t(ArF), CL3_15t(ArF), CL3, CL3_5t(ArF) e por último CL3_25t(ArF).

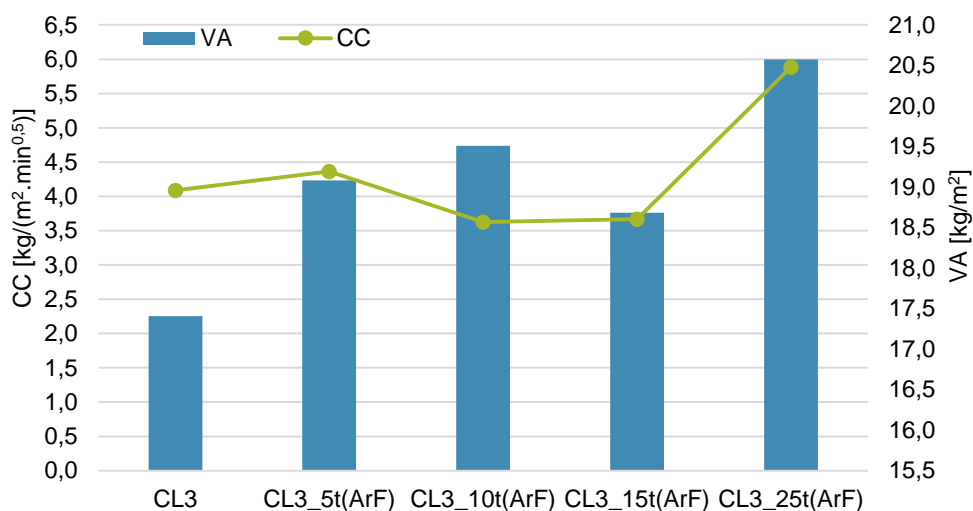


Figura 6.19 – Coeficiente de capilaridade e valor assintótico aos 90 dias

Na Figura 6.19 encontram-se o coeficiente de capilaridade e o valor assintótico. Resumindo, a argamassa com maior percentagem de terra (25%) é a que possui maior capacidade de absorção de água assim como em maior velocidade. A argamassa com menor capacidade de absorção de água (valor assintótico) é a argamassa de referência (CL3) e a que possui menor velocidade de absorção (coeficiente de absorção) é a argamassa com 10% de terra CL3_10t(ArF).

6.3.2.1.5 Secagem

Foi determinada a curva de secagem de cada provete, que traduz o teor em água (Wt em %) em função do tempo (em horas), que se apresenta na Figura 6.20.

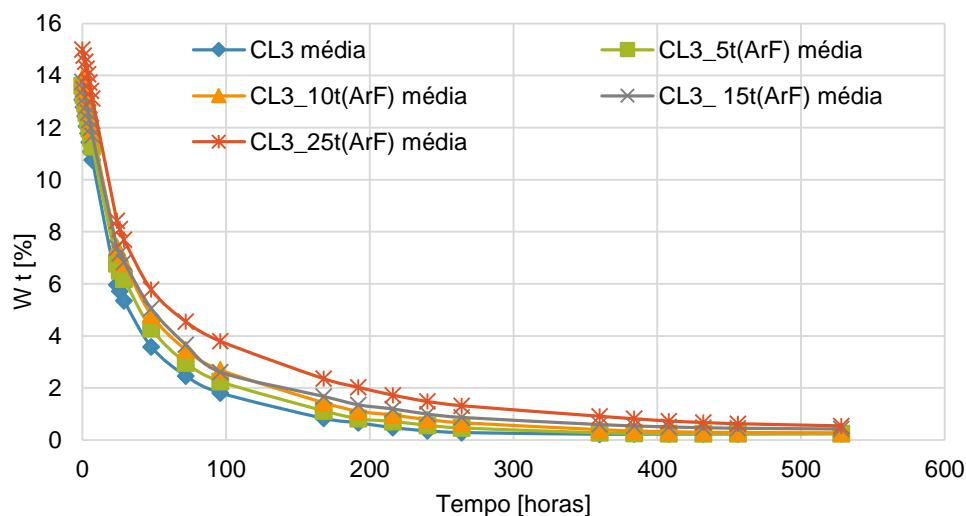


Figura 6.20 – Curvas de secagem

Os valores da taxa de secagem mencionados na Tabela 7.2 foram calculados algebricamente. No entanto estes valores podem ser deduzidos visualmente através dos declives dos troços iniciais na curva de secagem. Assim, a argamassa que possui maior declive obtém maior valor de taxa de secagem.

As duas grandezas mencionadas na Tabela 7.2 encontram-se graficamente na Figura 6.21. A argamassa que possui maior velocidade de secagem (taxa de secagem) é a argamassa de referência (CL3), e a que possui menor velocidade é a argamassa com 15% de terra (CL3_15t(ArF)). Relativamente ao índice de secagem, a argamassa que possui maior valor é a argamassa com maior percentagem de terra (CL3_25t(ArF)) e a que possui menor valor é a de referência (CL3).

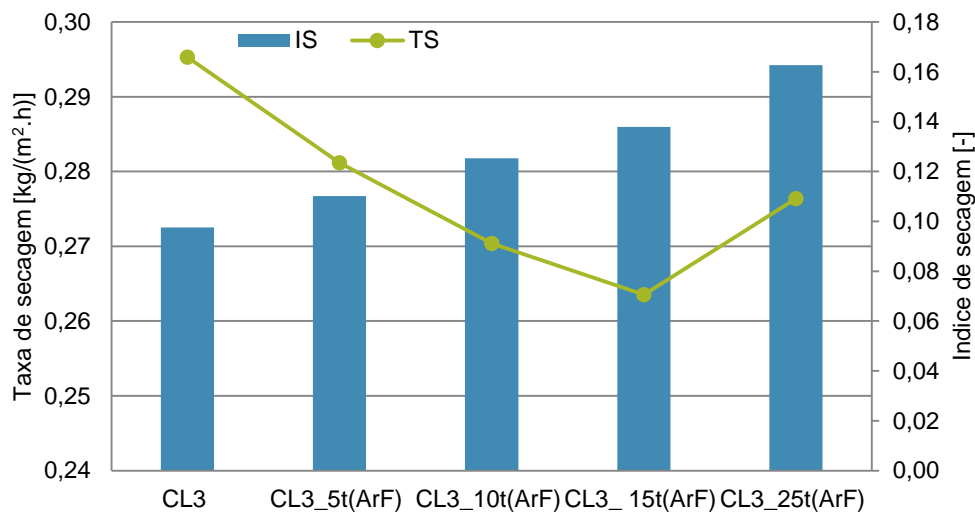


Figura 6.21 – Taxa de secagem e índice de secagem aos 90 dias

Tendo em conta que de forma geral são mais favoráveis argamassas que apresentem menores valores de índice de secagem e maiores valores de taxa de secagem (com maior facilidade de secagem global e maior velocidade de secagem inicial), a argamassa de referência é preferível pois verifica estes requisitos. Já a argamassa com maior percentagem de terra (25%) possui piores valores. Este facto pode ser explicado devido à presença de argila nas argamassas com maiores percentagens de terra. A argila possui uma elevada facilidade de absorção de água (e rápida) mas, por outro lado, tem mais dificuldade em secar essa água absorvida (e mais devagar).

6.3.2.1.6 Condutibilidade Térmica

Os resultados obtidos de condutibilidade térmica para as cinco argamassas encontram-se representados na Figura 6.22.

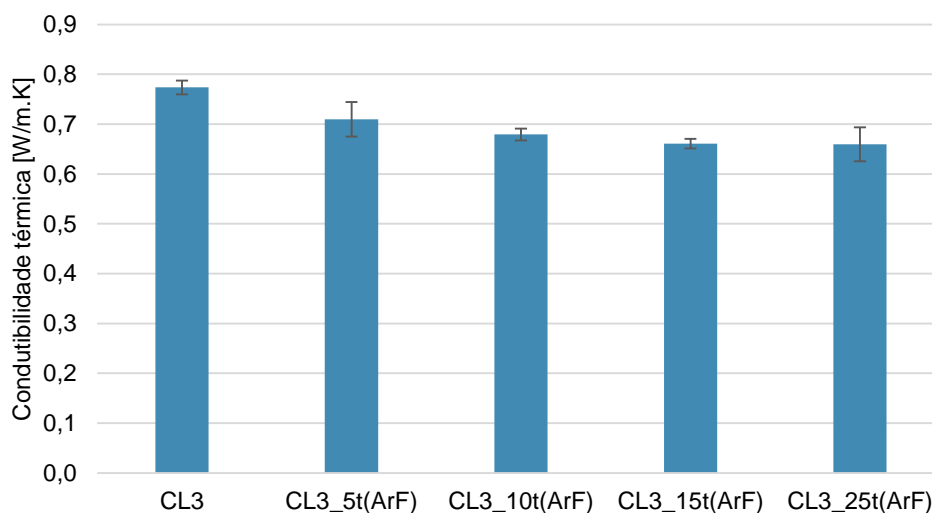


Figura 6.22 – Condutibilidade térmica dos provetes prismáticos (90 dias)

É possível observar na Figura 6.22 uma tendência decrescente na condutibilidade térmica com o aumento do teor de terra argilosa, sendo este aspeto positivo.

6.3.2.1.7 Porosidade Aberta e Massa Volúmica

Como já referido o ensaio da porosidade aberta e da massa volúmica realizaram-se em simultâneo. No final deste ensaio verificou-se que um dos provetes da argamassa com 15% de terra (CL3_15t(ArF)) obteve um valor de porosidade aberta fora da gama de valores correntes de argamassas de cal aérea. Como tal, esse valor foi excluído, passando a haver para este traço apenas dois provetes (e não três como os restantes).

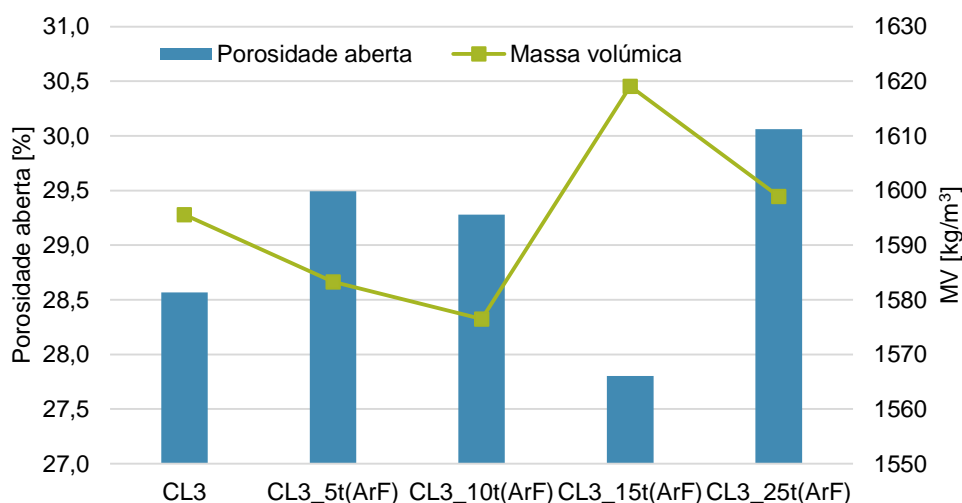


Figura 6.23 – Porosidade aberta e massa volúmica, provetes prismáticos aos 90 dias

Analisando a Figura 6.23 não é possível verificar uma tendência. O valor mais elevado de porosidade aberta corresponde à argamassa com maior percentagem de terra (CL3_25t(ArF)) de 30 %. Os valores mais baixos correspondem à argamassa de referência (CL3) e à argamassa com 15 % de terra (CL3_15t(ArF)), com 29 e 28% respetivamente.

6.3.2.1.8 Porosimetria de Mercúrio

Através do ensaio de determinação da porosimetria por intrusão de mercúrio foi possível avaliar a microestrutura interna de cada argamassa ensaiada. Para este ensaio foram apenas analisadas uma amostra de provetes prismáticos de argamassa de cada traço, perfazendo no total cinco amostras.

Devido à estrutura porosa das argamassas existe um erro associado a este ensaio: como existem poros de maiores dimensões que apenas são acessíveis através de poros de menores dimensões, os resultados obtidos de alguns poros (nomeadamente dos maiores) não correspondem ao que realmente existe. *“Considerando que a pressão necessária para a intrusão dos poros menores é superior à que seria exercida para os poros maiores, estes últimos serão representados como tendo uma dimensão equivalente à dos primeiros. É pois razoável assumir que os resultados da porosimetria de mercúrio apresentam valores de diâmetro de poros inferiores aos que na verdade existem”* (Rato 2006). Na Figura 6.24 encontram-se a mais carregado as intrusões incrementais das argamassas e a menos carregado as intrusões cumulativas.

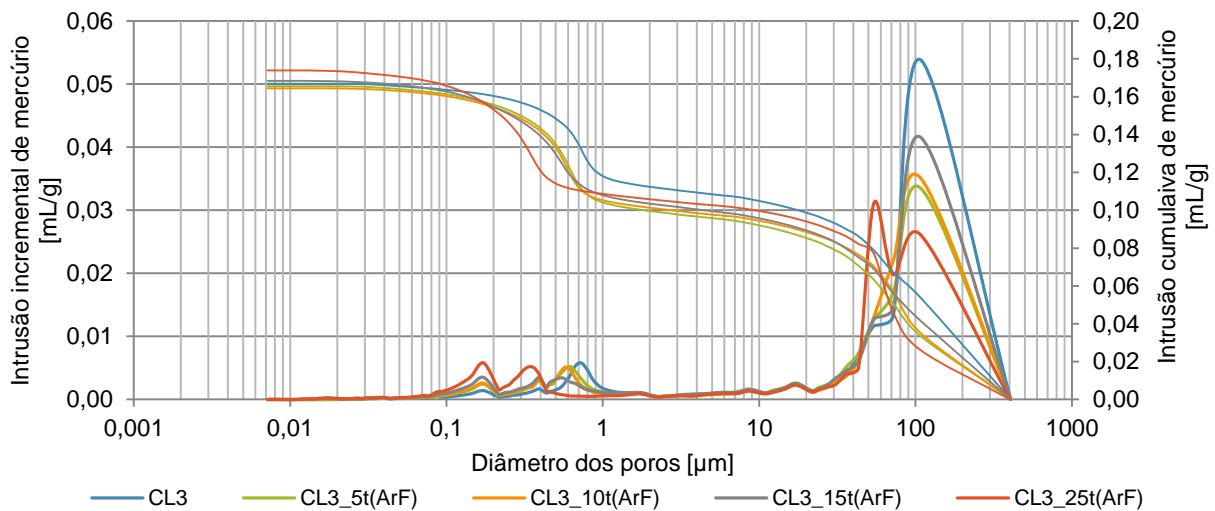


Figura 6.24 – Porosimetria de mercúrio em provetes prismáticos (90 dias)

Analisando a Figura 6.24 é possível observar, de forma geral, que todas as argamassas possuem dimensões de poros mais ou menos parecidas.

A argamassa de referência é aquela que apresenta maior quantidade de poros na ordem dos 72 aos 107 μm (gama de macroporos). Ainda nesta gama de valores (e de forma decrescente de quantidade de poros), encontram-se as argamassas com 15, 10, 5 e 25% de terra. A argamassa CL3_25t(ArF) além desta gama de poros, possui também um volume elevado de poros de diâmetro na ordem dos 54 μm . Esta situação pode ter duas explicações: existe efetivamente uma quantidade de poros com estas dimensões (54 μm) ou, mais provavelmente, existem poros de maiores dimensões que apenas são acessíveis por estes poros menores. Assim, o ensaio a esta argamassa deveria ter sido repetido.

Além dos diâmetros mencionados, as argamassas possuem ainda outra gama de diâmetros, mais baixa (na ordem dos 0,17 μm e algumas até 0,7 μm) e em menor quantidade (gama de poros capilares). Nesta gama de poros mais finos, a argamassas com 25% de terra é aquela que apresenta maior volume de poros, seguindo-se as argamassas com 15, 10, 5 e 0% de terra.

Resumindo, as argamassas com terra apresentam menor quantidade de poros na gama de macroporos e menor dimensão de poros na gama capilar.

O presente ensaio fornece também a porosidade aberta (Tabela 6.9). Pela Figura 6.24 estes valores podem ser verificados pois as argamassas com maior porosidade aberta são aquelas que possuem maior valor de mercúrio cumulativo.

Tabela 6.9 – Porosidade aberta por intrusão de mercúrio

| Argamassas | P _{ab} [%] |
|--------------|---------------------|
| CL3 | 32,0 |
| CL3_5t(ArF) | 32,0 |
| CL3_10t(ArF) | 32,5 |
| CL3_15t(ArF) | 32,7 |
| CL3_25t(ArF) | 33,6 |

6.3.2.1.9 Resistência aos Sulfatos

Na Figura 6.25 encontra-se a evolução do ensaio de resistência aos sulfatos, nomeadamente através de variações em massa (%) das cinco argamassas estudadas. Além da avaliação da variação de massa em cada ciclo imersão/secagem, este ensaio permite avaliar a evolução da integridade das argamassas através da sua análise visual.

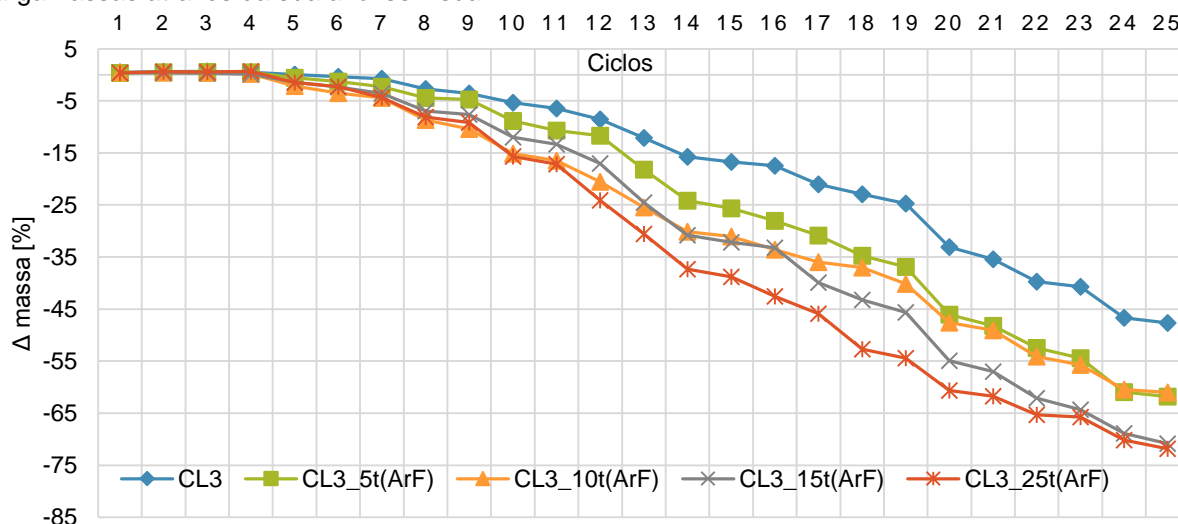


Figura 6.25 – Resistência aos sulfatos (90 dias)

Analisando a Figura 6.25 constatou-se, tanto visualmente como analiticamente, que as argamassas com maior quantidade de terra perderam mais massa (mas não bruscamente). Na Figura 6.26 encontram-se os valores das variações de massas das argamassas aos 25 ciclos.

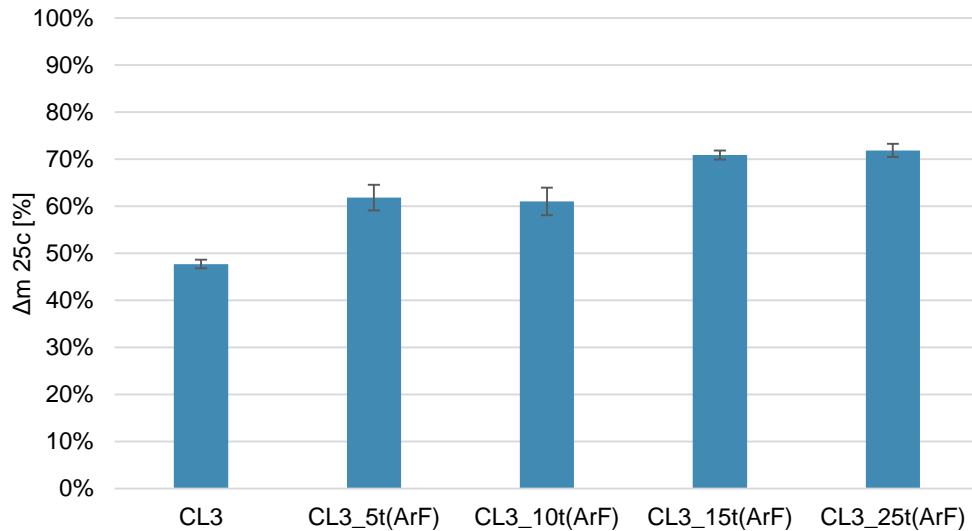


Figura 6.26 - Variação de massa das argamassas aos 25 ciclos do ensaio de resistência aos sulfatos

Analisando o conjunto, verifica-se que a substituição de areia fina por terra fragiliza ligeiramente a resistência aos sulfatos das argamassas de cal. Das argamassas de terra, aquela que perdeu mais massa (71,84%) foi a de 25% de terra e a que perdeu menos massa (60,98%) foi a de 10% de terra.

6.3.2.2 Provetes em Suporte de Tijolo

Os provetes em suporte de tijolo foram ensaiados aos 28 e 90 dias de idade e os resultados encontram-se na Tabela 7.2. Todos os ensaios realizados analisaram apenas uma argamassa de cada traço.

6.3.2.2.1 Dureza Superficial – Durómetro

Tal como referido no ponto 5.4.2.1 este ensaio foi aos 28 e 131 dias devido à ausência do equipamento (durómetro). Aquando a realização do ensaio verificou-se a grande sensibilidade que este possui devido à irregularidade da superfície dos rebocos ensaiados.

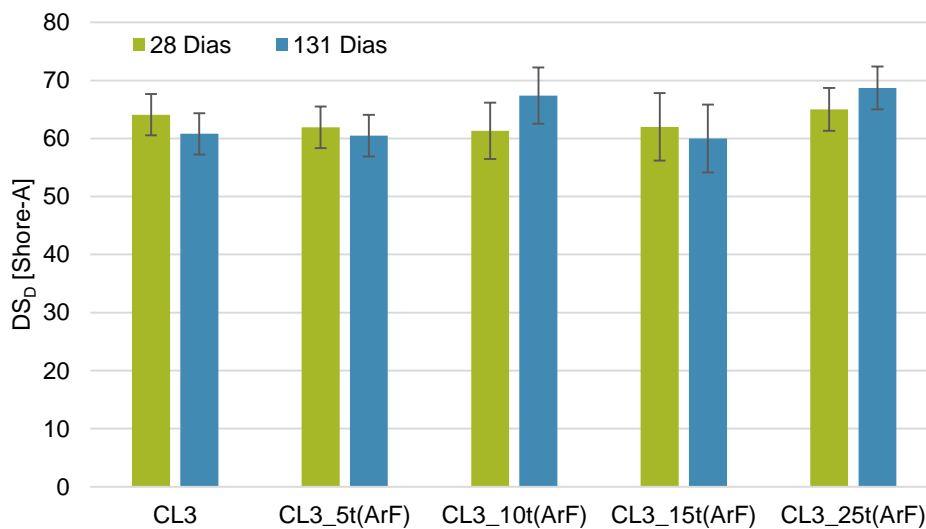


Figura 6.27 - Dureza superficial aos 28 e 131 dias sobre tijolo

Observando a Figura 6.27 não se notam tendências. No entanto o maior valor pertence à argamassa com maior percentagem de terra (CL3_25t(ArF)), tanto para os 28 como para os 131 dias. Os valores mais baixos pertencem à argamassas com 10% e à de 15% de terra, para os 28 e 131 dias respetivamente.

6.3.2.2 Velocidade de Propagação de Ultrassons

Este ensaio foi realizado por forma a avaliar a homogeneidade e compacidade de determinado material e detetar anomalias e defeitos tais como fissuras, grandes vazios ou perda de coesão no caso de argamassas. Na presença de vazios e porosidade elevada, o tempo de percurso entre transdutores é maior, o que resulta numa velocidade de propagação dos ultra-sons mais baixa. Assim, argamassas mais porosas apresentam velocidades de propagação mais baixas.

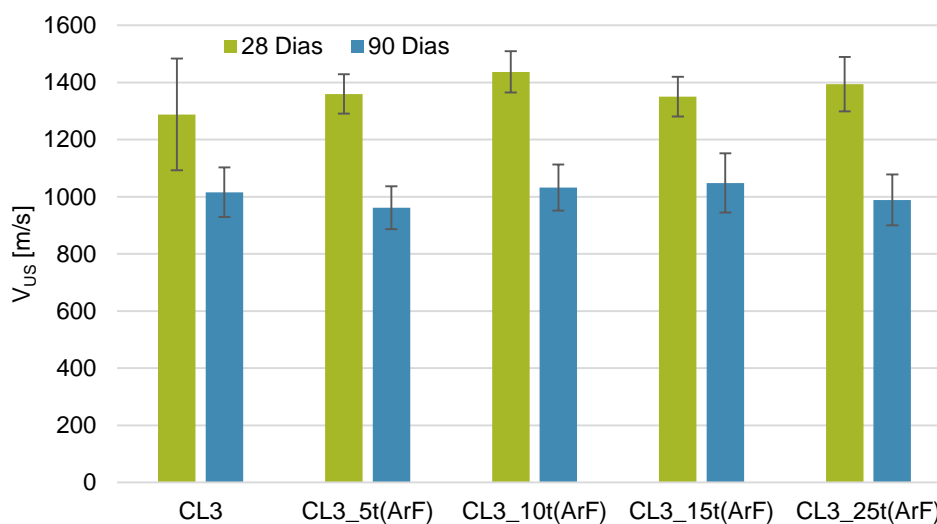


Figura 6.28 - Velocidade de propagação de ultra-sons sobre tijolo

Um facto que salta logo à vista observando a Figura 6.28 é a diferença de resultados entre as duas idades. As velocidades diminuem bastante dos 28 para os 90 dias.

Para os 28 dias a argamassa que possui velocidade mais baixa é a de referência (CL3) e a que possui velocidade mais alta é a que contém 10% de terra (CL3_10t(ArF)). Para os 90 dias a argamassa que possui velocidade maior é a argamassa de 15% de terra (CL3_15t(ArF)) e a que possui menor velocidade passa a ser a que contém 5% de terra (CL3_5t(ArF)).

6.3.2.2.3 Condutibilidade Térmica

A determinação da condutibilidade térmica foi efetuada aos 28 e 90 dias de idade. Esta propriedade é bastante importante num material de construção pois o conforto térmico é um aspeto a ter em conta numa habitação. Deste modo, quanto mais baixo este valor, maior conforto térmico proporciona. No entanto, como a resistência térmica é obtida pelo quociente entre a espessura e o λ , como a espessura num revestimento de argamassa deste tipo não é elevada, a contribuição não será muito significativa.

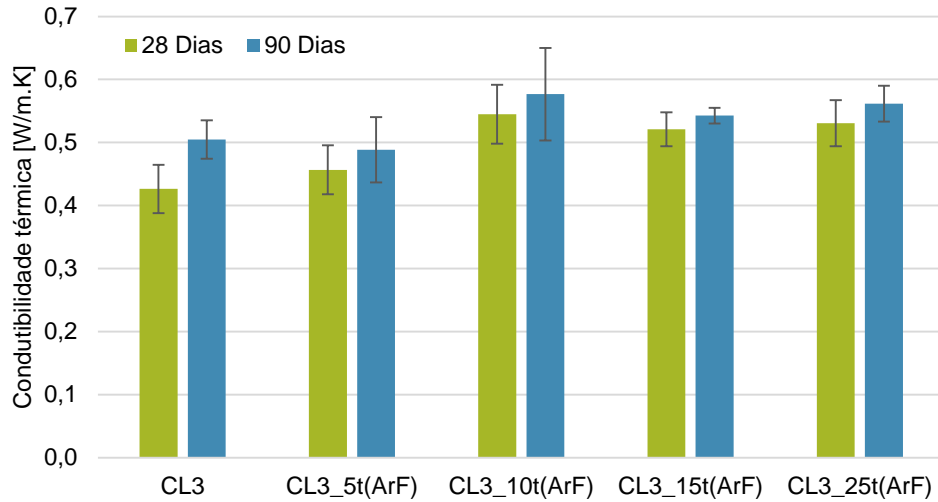


Figura 6.29 - Condução térmica sobre tijolo

É possível observar sensivelmente a mesma tendência para ambas as idades. O valor de condutibilidade térmica é maior para a argamassa com 10% de terra (CL3_10t(ArF)) para ambas as idades. Os valores mais baixos pertencem às argamassas de referência e com 5% de terra. Verifica-se também uma subida dos valores de todas as argamassas dos 28 para os 90 dias.

1.1.1.1.1 Absorção de Água sob Baixa Pressão – Tubos de Karsten

A realização deste ensaio permite avaliar a capacidade de determinada argamassa absorver água, ou seja, a sua permeabilidade. Foram determinadas as quantidades de água absorvidas no decorrer de determinado tempo (5, 10, 15, 30 e 60 minutos). Foi também determinado o tempo necessário para absorver 4 ml de água. Os valores elevados de desvio padrão que surgem com o presente ensaio (para as várias propriedades calculadas) são justificados possivelmente por uma má aderência da plasticina de alguns tubos ao reboco. Tendo em conta a dificuldade do ensaio, e a sensibilidade dos resultados face à plasticina, alguns tubos foram excluídos quando apresentavam resultados afastados dos outros.

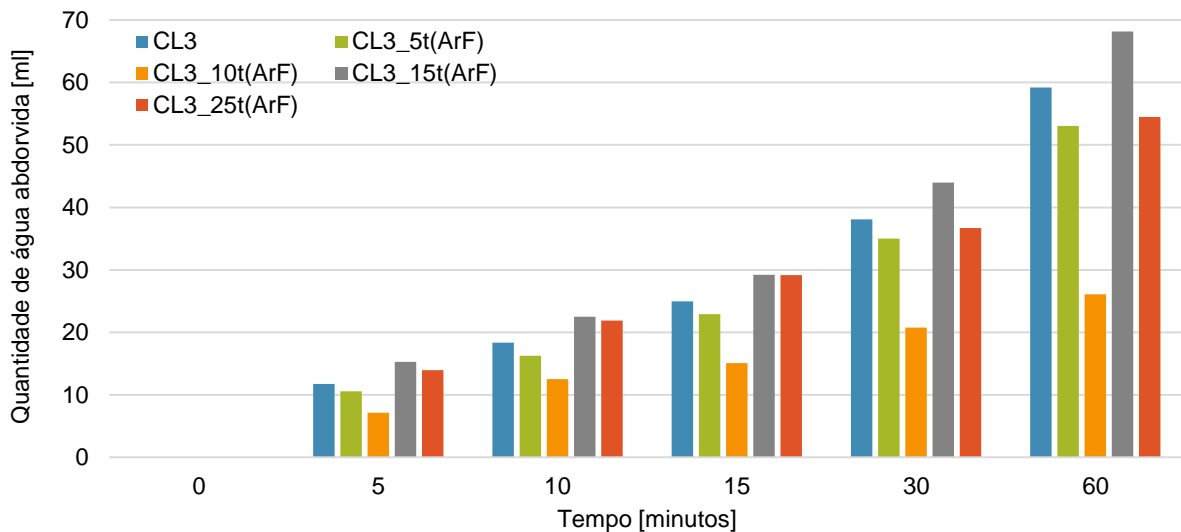


Figura 6.30 - Quantidade de água absorvida para os diversos tempos, aos 28 dias

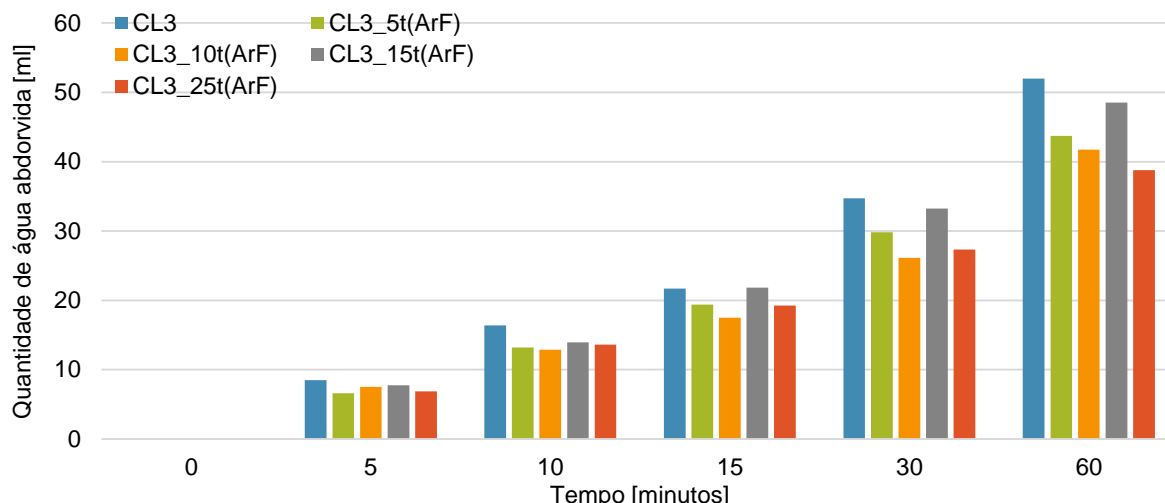


Figura 6.31 - Quantidade de água absorvida para os diversos tempos, aos 90 dias

Analisando na generalidade as Figuras 6.30 e 6.31 é possível concluir que, de entre as argamassas com terra, a que absorve maior quantidade de água é a que contém 15% de terra (CL3_15t(ArF)), tanto para os 28 como para os 90 dias de idade. Relativamente aos 28 dias, a argamassa que absorve menos água é a que contém 10% de terra. Aos 90 dias essa mesma argamassa absorve pouca quantidade de água.

Um aspeto que influenciou os resultados deste ensaio (aos 28 dias) foi a queda de vários tubos. Desta forma, este ensaio foi repetido nos provetes da segunda fase de amassadura. As duas argamassas que tiveram problemas aquando a realização do ensaio foram as de 10 e 15% de terra, pois os tubos caíram quase todos, e assim sendo, os resultados obtidos não são tão credíveis.

Relativamente aos resultados obtidos nos 90 dias, a tendência é bastante semelhante aos obtidos aos 28 dias. A realização deste ensaio a esta idade (90 dias) foi bastante menos problemática, visto que os tubos aderiram melhor ao suporte, com exceção da argamassa com 5% de terra (CL3_5t(ArF)).

Além das quantidades de água absorvida foram também determinados, para ambas as idades, os coeficientes de absorção para a totalidade do ensaio (1 hora) (Tabela 7.2) e para o tempo necessário para absorver 4 ml (Tabela 6.10).

Os valores das Tabelas 6.10 e 6.11 relativos ao tempo necessário para absorver 4 ml, indicam também velocidades iniciais de absorção, em que tempos mais lentos implicam velocidades também mais lentas. Por outro lado, os valores mencionados na Figura 6.32 são relativos a quantidades de água absorvidas em 1 hora de ensaio.

Verifica-se que a argamassa com 15% de terra possui um valor de coeficiente de absorção superior às restantes argamassas para os 28 dias. Aos 90 dias, a argamassa que possui maior valor é a de referência. O valor mais baixo corresponde à argamassa com 10% tanto para os 28 dias e à argamassa com 25% de terra para os 90. Estes dois coeficientes podem encontrar-se graficamente na Figura 6.32.

Tabela 6.10 – Coeficientes de absorção para 4 ml aos 28 e 90 dias (velocidade de absorção inicial)

| Argamassas | $C_{abs.4ml} [kg/(m^2 \cdot min^{0,5})]$ | | | |
|---------------------|--|------|---------|------|
| | 28 Dias | | 90 Dias | |
| | Média | DP | Média | DP |
| CL3 | 9,79 | 0,93 | 6,03 | 1,25 |
| CL3_5t(ArF) | 10,36 | 1,19 | 5,28 | - |
| CL3_10t(ArF) | 12,24 | 2,37 | 6,14 | 0,55 |
| CL3_15t(ArF) | 11,98 | 1,93 | 7,63 | 0,46 |
| CL3_25t(ArF) | 12,11 | 1,81 | 6,08 | 1,09 |

Analisando a Tabela 6.10 constata-se que o valor mais alto corresponde à argamassa com 10% de terra para os 28 dias e à argamassa com 15% para os 90. O valor mais baixo pertence à argamassa de referência para os 28 dias e à argamassa com 5% de terra para os 90. É de notar que aos 90 dias, e para a argamassas CL3_5t(ArF) só foi contabilizado um tubo, daí não existir desvio padrão.

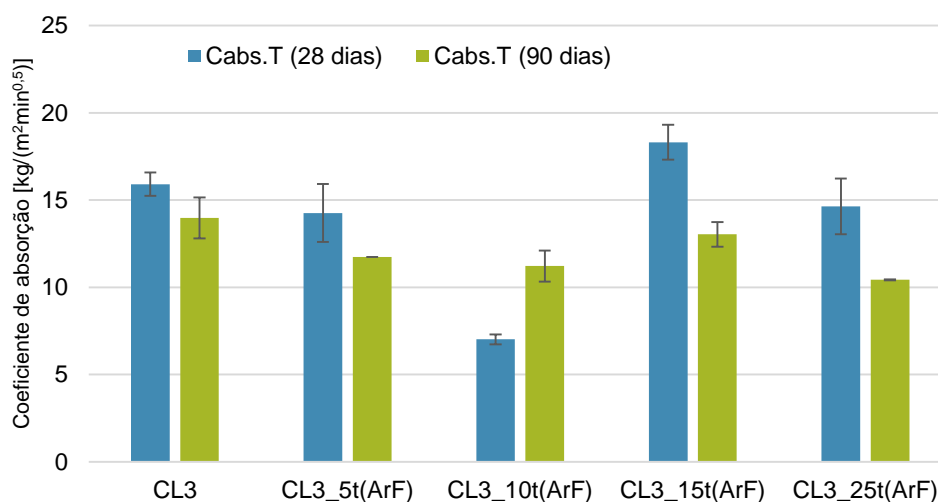


Figura 6.32 - Coeficientes de absorção para os 28 e 90 dias (quantidade de água absorvida em 1 hora)

Tabela 6.11 – Tempo necessário para absorver 4 ml de água (velocidade de absorção inicial)

| Argamassas | Tempo _{4ml} [segundos] | | | |
|---------------------|---------------------------------|-------|---------|-------|
| | 28 Dias | | 90 Dias | |
| | Tempo | DP | Tempo | DP |
| CL3 | 44,60 | 8,85 | 114,33 | 43,10 |
| CL3_5t(ArF) | 40,25 | 8,84 | 149,00 | - |
| CL3_10t(ArF) | 30,50 | 9,53 | 110,50 | 19,50 |
| CL3_15t(ArF) | 31,60 | 11,39 | 71,50 | 8,50 |
| CL3_25t(ArF) | 30,60 | 10,46 | 112,50 | 37,50 |

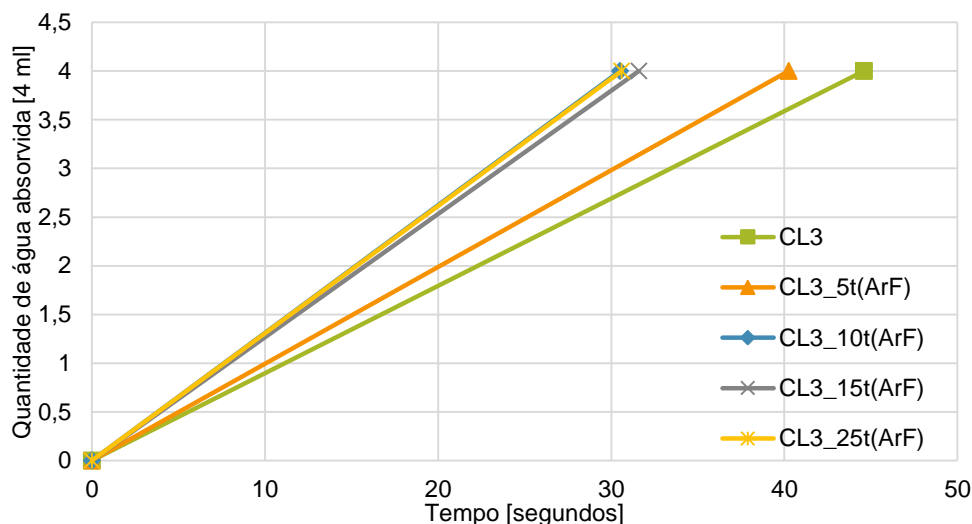


Figura 6.33 - Tempo necessário para absorver 4 ml (28 dias)

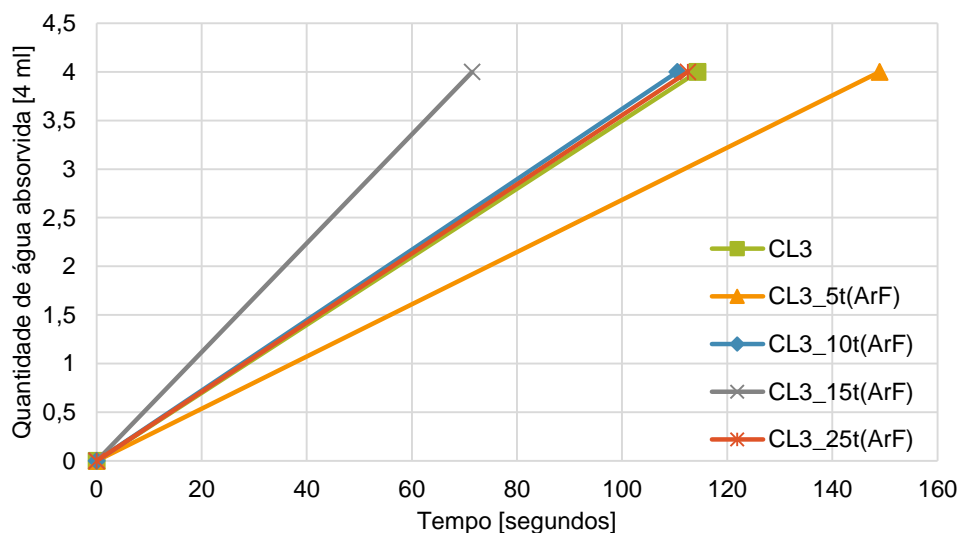


Figura 6.34 - Tempo necessário para absorver 4 ml (90 dias)

Nas Figuras 6.33 e 6.34 encontram-se os tempos necessários para a absorção de 4 ml de água, aos 28 e 90 dias respectivamente. Na Tabela 6.11 estes resultados encontram-se expressos numericamente. Para os 28 dias a argamassa de referência é aquela que demora mais tempo a absorver água, e para os 90 dias é a argamassa com 5% de terra. Por outro lado, a argamassa mais rápida a absorver água é a argamassa com 10% de terra para os 28 dias e a de 15% para os 90 dias. É possível constatar que os tempos são bastante superiores nos 90 dias (para todas as argamassas). Este aspeto é visível nos eixos das abcissas nas Figuras 6.33 e 6.34.

6.3.2.2.4 Porosimetria de Mercúrio

De forma análoga aos resultados apresentados de porosimetria de mercúrio dos provetes prismáticos, na Figura 6.35 encontram-se os resultados obtidos para os provetes em suporte de tijolo.

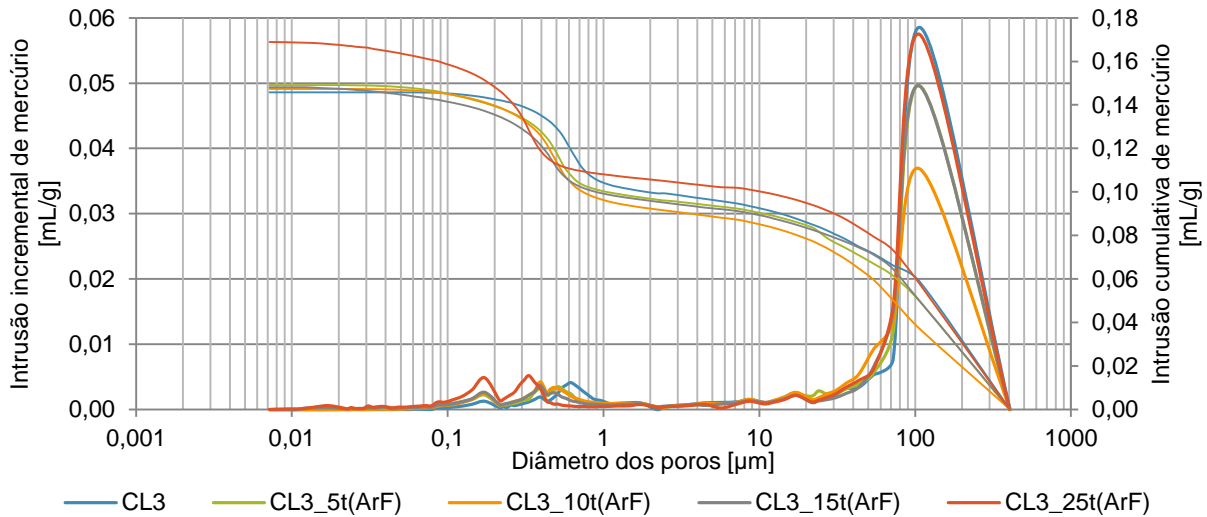


Figura 6.35 –Porosimetria de mercúrio em provetes em suporte de tijolo (90 dias)

É possível verificar que as cinco argamassas possuem diâmetros de poros bastante semelhantes embora em quantidades diferentes, nomeadamente na ordem dos 72 e 107 μm (gama de macroporos). Neste intervalo, a argamassa com 10% de terra é aquela que apresenta menor quantidade de poros. De seguida encontram-se as argamassas com 5 e 15% de terra, que apresentam a mesma quantidade de poros nesta gama mencionada. As duas argamassas com maior quantidade de poros são a de referência e a de maior quantidade de terra (CL3_25t(ArF)), sendo a primeira superior à segunda. Aqui, e ao contrário dos provetes prismáticos, a argamassa com 25% de terra não apresenta uma gama de poros de menor dimensão distintos das restantes argamassas.

Também é visível no Figura 6.35 que todas as argamassas apresentam gamas de poros mais finos (na ordem dos 0,17 μm e algumas até 0,6 μm) mas em menor quantidade (gama de poros capilares). Na Tabela 6.12 encontram-se os valores de porosidade aberta.

Tabela 6.12 – Porosidade aberta por intrusão de mercúrio nos provetes em suporte de tijolo

| Argamassas | P_{ab} [%] |
|--------------|--------------|
| CL3 | 28,6 |
| CL3_5t(ArF) | 29,9 |
| CL3_10t(ArF) | 28,3 |
| CL3_15t(ArF) | 28,3 |
| CL3_25t(ArF) | 31,4 |

6.3.2.3 Reboco

Os ensaios de caracterização do reboco aplicado no murete de taipa realizaram-se apenas aos 90 dias de idade e encontram-se na Tabela 7.2. No entanto, este foi sendo observado visualmente ao longo do tempo, tendo-se verificado que não ocorreu fissuração visível e que o reboco com terra apresentava uma coloração interessante a nível estético. Na Figura 6.36 encontram-se ambos os rebocos aplicados: CL3_10t(ArF) e CL3, podendo observar-se as áreas mais escuras junto à base. É importante referir que as condições meteorológicas nos dias anteriores ao dia do ensaio foram invernosas, com pluviosidade (Anexo A.2.).



Figura 6.36 – Aspeto visual dos dois rebocos aplicados no murete de taipa (aos 90 dias): argamassas CL3_10t(ArF) e CL3

6.3.2.3.1 Velocidade de Propagação de Ultra-sons

A velocidade de propagação de ultra-sons foi determinada em quatro níveis de cada painel de reboco de argamassa (Figura 6.37).

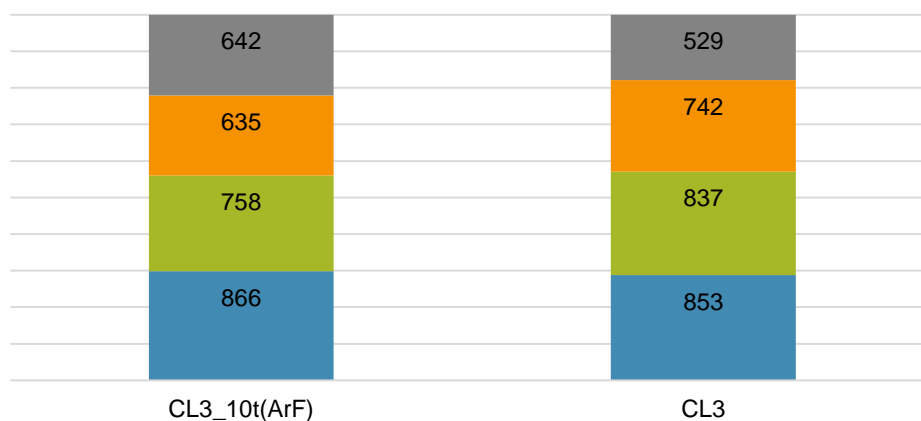


Figura 6.37 – Velocidade de propagação de ultra-sons dos quatro níveis das duas argamassas (m/s)

Através das médias dos vários níveis é possível constatar que a argamassa de referência possui maior velocidade de propagação de ultra-sons nas zonas intermédias, ou seja, é mais compacta nessas zonas. Pela Figura 6.37 verifica-se que a velocidade aumenta de cima para baixo, ou seja, quanto mais próximo de solo, mais compacto é o material em questão. Isto pode ser explicado pelo facto de o suporte e, conseqüentemente, o reboco possuir água ascensional vinda do terreno e esse facto influenciar o ensaio.

6.3.2.3.2 Dureza Superficial – Durómetro

Além deste ensaio ter sido realizado logo aos 76 dias de idade, coincidiu com um dia bastante chuvoso. Como tal, os resultados obtidos devem ser analisados tendo estas situações presentes.

Tendo em conta os valores mencionados na Tabela 7.2, é possível verificar que a argamassa com terra apresenta ligeiramente mais dureza do que a argamassas de referência (sendo os valores praticamente iguais), tendo no entanto, maior desvio padrão.

6.3.2.3.3 Dureza Superficial – Esclerómetro

A dureza superficial através de esclerómetro pendular foi determinada em três níveis (Figura 6.38).

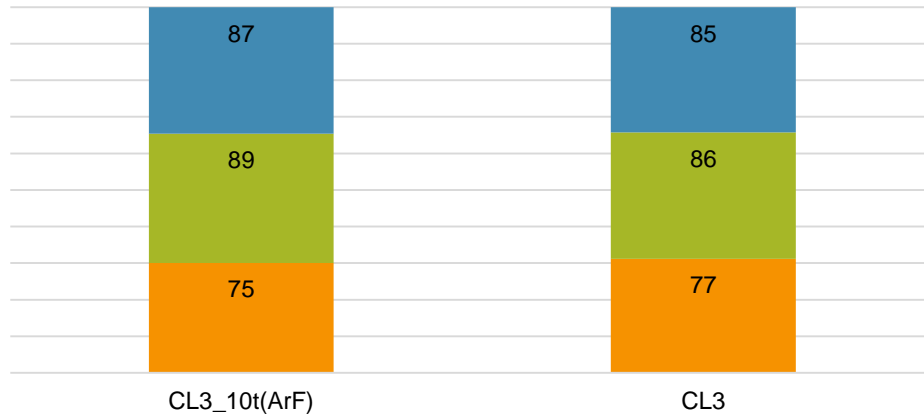


Figura 6.38 – Dureza superficial por esclerómetro pendular dos três níveis de cada argamassa

Tal como no ensaio anterior (também de dureza superficial mas através do durómetro) verifica-se que a argamassa com terra apresenta maior valor, mais praticamente igual à de referência. Pela Figura 6.38 é possível notar que a dureza diminui de cima para baixo, sendo os valores mais baixos os mais próximos do solo.

6.3.2.3.4 Absorção de Água sob Baixa Pressão – Tubos de Karsten

Na Tabela 6.13 (e também na Tabela 7.2) encontram-se as médias dos valores obtidos para os apenas dois tubos colocados em cada argamassa.

Tabela 6.13 – Resultados de absorção de água sob baixa pressão do reboco (90 dias)

| Argamassas | Qt.abs.5min [ml] | | $C_{abs.5min}$ [kg/(m ² .min ^{0,5})] | | $C_{abs.4ml}$ [kg/(m ² .min ^{0,5})] | | Tempo _{4ml} [min] | |
|--------------|------------------|------|---|-----|--|------|----------------------------|------|
| | Média | DP | Média | DP | Média | DP | Média | DP |
| CL3 | 8,2 | 0,7 | 7,7 | 0,7 | 3,70 | 0,08 | 5,08 | 0,22 |
| CL3_10t(ArF) | 10,5 | 5,25 | 9,8 | 4,9 | 4,18 | 0,71 | 3,98 | 1,27 |

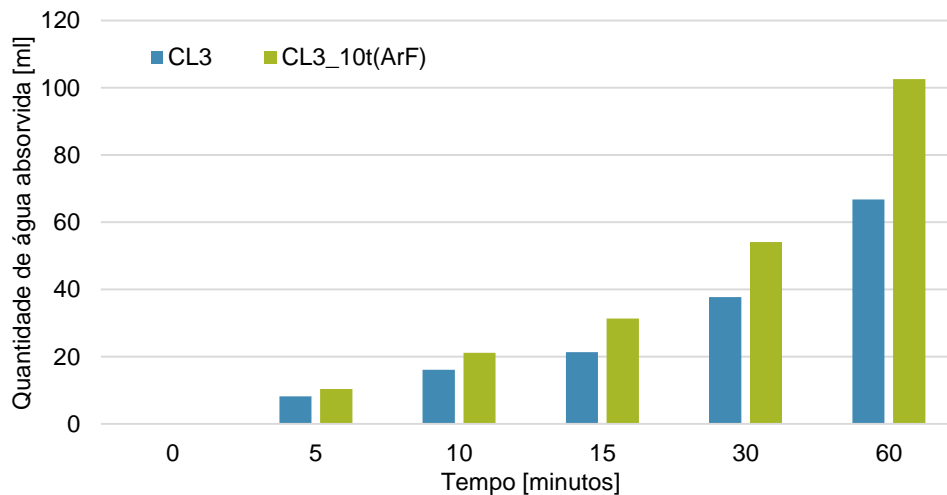


Figura 6.39 – Quantidades de água absorvidas em 1 hora no reboco (90 dias)

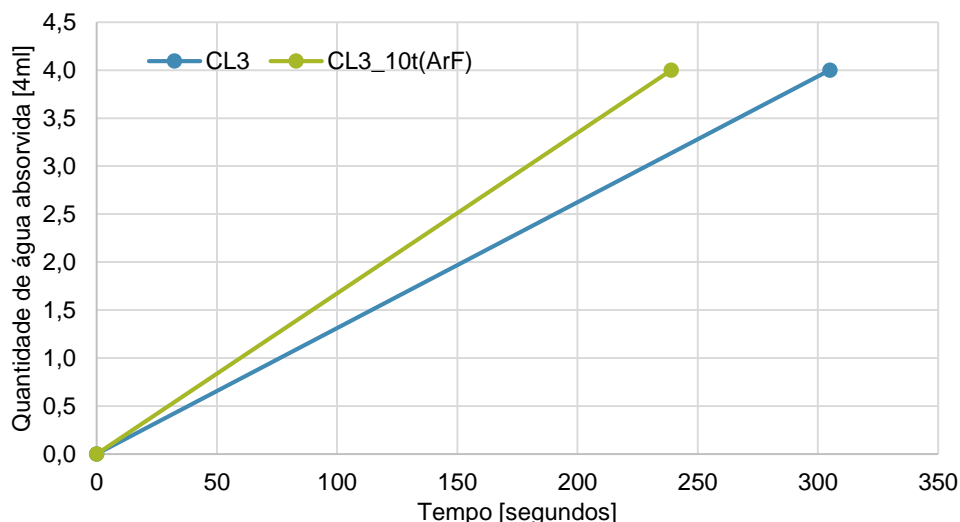


Figura 6.40 – Tempo necessário para absorver 4 ml (90 dias)

Analisando a Tabela 6.13 e as duas figuras anteriores, é possível verificar que a argamassa de terra absorve maior quantidade de água e mais rápido rápido.

6.3.2.3.5 Porosimetria de Mercúrio

Seguidamente apresentam-se os resultados obtidos por porosimetria de mercúrio para os dois rebocos de argamassas aplicadas no murete, removidas da parte superior e inferior do murete (Figura 6.41).

A recolha de amostras de níveis distintos do mesmo painel de reboco reside no facto de uma das zonas se encontrar sempre mais húmida que a outra, podendo-se então dizer que cada zona apresenta condições de cura diferentes.

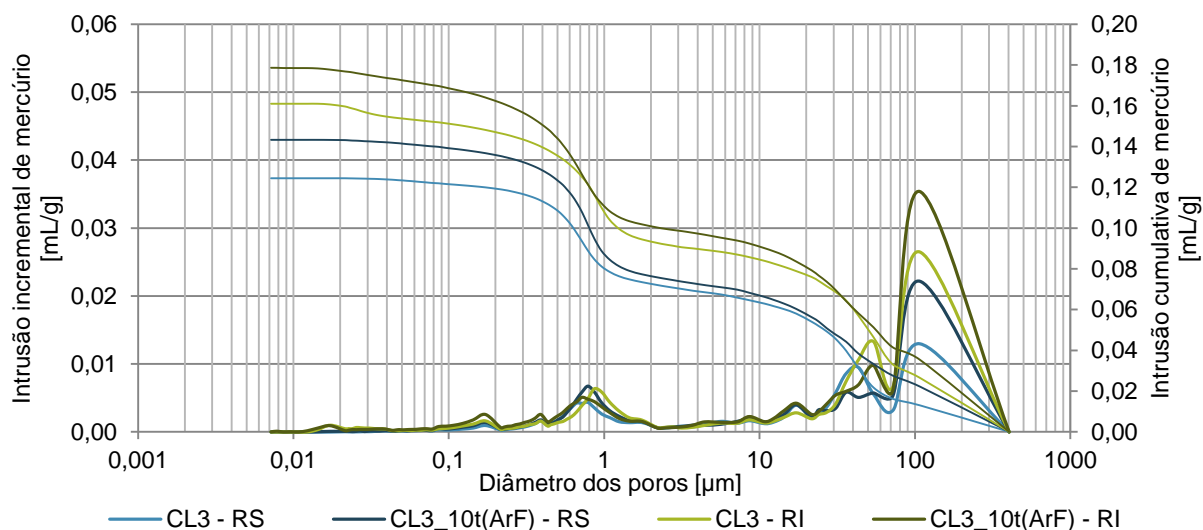


Figura 6.41 - Porosimetria de mercúrio no reboco aplicado no murete (90 dias)

Pela Figura 6.41 é possível verificar diferenças entre as argamassas retiradas da zona superior e inferior do murete de taipa. As amostras retiradas da zona inferior apresentam maior quantidade de poros de maiores dimensões (na ordem dos 107 μm , gama de macroporos) do que as amostras retirada da zona superior. Também apresentam maior quantidade de poros na gama dos 43 μm . Para ambas

as zonas, a argamassa de terra (CL3_10t(ArF)) apresenta maior quantidade de macroporos relativamente à argamassa de referência. Das amostras removidas da zona superior a argamassa de terra apresenta maior quantidade de poros de maiores dimensões que a de referência no mesmo nível.

Relativamente a poros da ordem dos 0,7 μm (pertencentes à gama de poros capilares) que se encontram representados em pormenor na Figura 6.42, os rebocos com a argamassa com terra retirado da zona superior e o só de cal da zona inferior apresentam quantidades de poros comparáveis, tendo portanto maior quantidade de poros de reduzida dimensão. É possível constatar ainda que ambas as argamassas removidas da zona inferior apresentam maior quantidade de poros ainda mais pequenos.

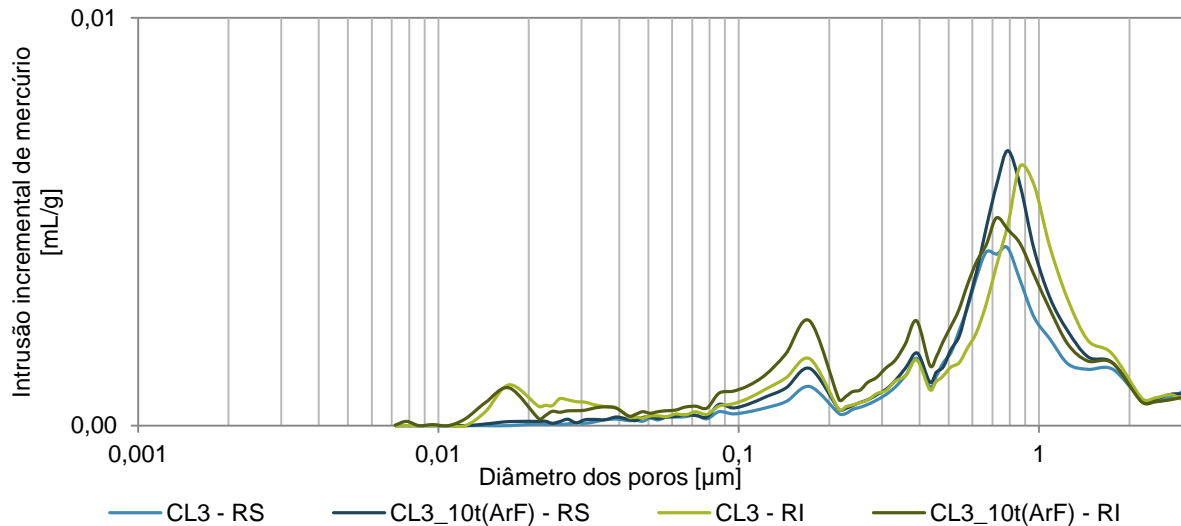


Figura 6.42 – Porosimetria de mercúrio de ambas as argamassas aplicadas no murete de taipa: Gama de poros capilares

Na Tabela 6.14 encontra-se a porosidade aberta de ambas as argamassas aplicadas no murete. Verifica-se que a argamassa de terra possui maior porosidade aberta que a argamassa de referência. As amostras removidas da zona inferior aparentam ser mais porosas do que as amostras da zona superior.

Tabela 6.14 – Porosidade aberta por intrusão de mercúrio no reboco

| Argamassas | P _{ab} RS [%] | P _{ab} RI [%] |
|--------------|------------------------|------------------------|
| CL3 | 26,0 | 31,7 |
| CL3_10t(ArF) | 27,7 | 32,2 |

7 Discussão de Resultados

No presente capítulo os resultados obtidos na campanha experimental (apresentados no capítulo 6) serão relacionados entre si, e também comparados com resultados obtidos por outros autores com argamassas com o mesmo tipo de materiais ou com materiais semelhantes.

Como referido no ponto 1.2, esta dissertação foi realizada em paralelo com uma outra que utiliza a terra como substituto parcial do ligante (Jamú 2013) e não como agregado parcial; como tal, estas duas vertentes do tema em análise são comparadas. As percentagens de terra utilizadas neste mesmo são de 5, 10, 25 e 50%, embora o mesmo número não signifique igual quantidade de material, uma vez que os materiais substituídos são distintos.

Alguns dos resultados são também confrontados com resultados obtidos numa outra dissertação ainda em curso (Santos 2013). Neste estudo, foram escolhidas duas das argamassas da presente dissertação - a de referência e a argamassas com 10% de terra, ao traço 1:3, onde foram incorporados três tipos de fibras, cada uma delas em duas dosagens diferentes. As fibras utilizadas são crina de cavalo, casca de arroz e *blouces* de lã de ovelha com pelo morto (resíduo da indústria têxtil, disponibilizado pela Multilãs).

7.1 Caracterização dos Constituintes Utilizados

Na Figura 7.1 encontram-se as duas curvas da terra (por via seca e húmida) assim como as curvas das três areias e da mistura destas.

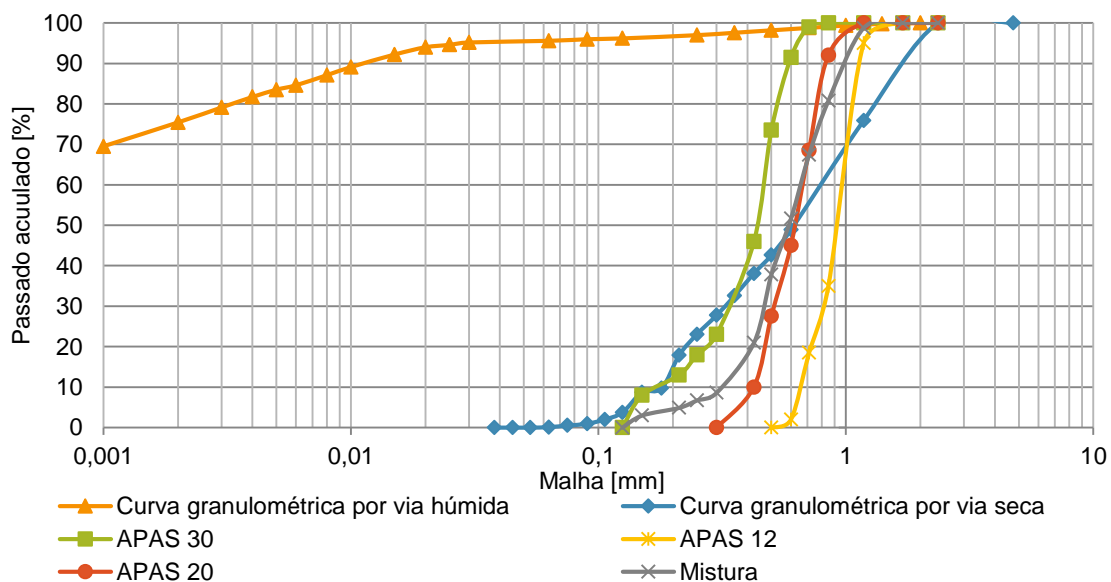


Figura 7.1 – Curvas granulométricas da terra, das três areias e da mistura destas

É fácil concluir que os dois métodos (por via húmida e seca) apresentam resultados bastante distintos para o mesmo material. Analisando conjuntamente as duas curvas verifica-se que a curva a húmido apresenta uma granulometria mais fina, passando 70% das partículas no peneiro mais fino (0,001 mm). Verifica-se também que a curva a seco apresenta uma granulometria mais extensa. Este

facto coincide com o que se verifica observando com atenção a terra, pois esta apresenta muitas partículas aglomeradas que se comportam como partículas grossas. Ao realizar-se uma análise por via húmida, estes aglomerados são desfeitos, homogeneizando assim a terra. Considerando-se que durante a amassadura a terra em contacto com a água se desagrega, deve ter-se apenas em conta a curva a húmido.

Comparando a curva granulométrica da areia fina (APAS30) e a da terra (por via húmida por ser mais real) é possível perceber que a segunda possui uma granulometria muito mais fina que a primeira. Esta dissertação pretende avaliar a influência que certa percentagem de terra provoca numa argamassa substituindo percentagens de agregado fino por iguais percentagens de terra. Tendo em conta que a terra utilizada possui uma granulometria muito mais fina, esta proporciona um rearranjo de toda a estrutura da argamassa, proporcionando a toda a mistura uma granulometria mais fina.

Por outro lado ainda, uma vez que a baridade da areia fina é de $1,388 \text{ g/cm}^3$ e a da argila é de $1,084 \text{ g/cm}^3$, a substituição mássica de areia por argila corresponde a um volume de argila maior ao de areia retirado. Essa situação pode ser constatada nas Tabelas 4.5 e 7.1 onde se apresentam os traços ponderais e volumétricos utilizados.

Analisando a Tabela 7.1 é possível verificar ainda que, ao substituir-se agregado fino por terra argilosa, as argamassas cal:agregado (considerando este como a soma t+Ar) em termos de massa ficam com a mesma proporção entre elas mas, em termos de volume, o traço fica ligeiramente mais fraco em termos de cal aérea face à parcela de agregado. Por outro lado, se a terra fosse considerada na parcela do ligante, as argamassas ficariam, como é óbvio, sucessivamente mais fortes em ligante, tanto em termos ponderais como volumétricos. Na realidade, a terra argilosa constitui um agregado reativo comparativamente à areia lavada ou um ligante fraco comparativamente à cal aérea.

Tabela 7.1 – Traços ponderais e volumétricos

| Argamassa | Traços ponderais | | Traços volumétricos | |
|--------------|------------------|-----------|---------------------|-----------|
| | CL: t+Ar | CL+t : Ar | CL: t+Ar | CL+t : Ar |
| CL3 | 1:11,6 | 1:11,6 | 1:3,00 | 1:3,00 |
| CL3_5t(ArF) | 1:11,6 | 1:9,5 | 1:3,02 | 1:2,75 |
| CL3_10t(ArF) | 1:11,6 | 1:8,0 | 1:3,03 | 1:2,53 |
| CL3_15t(ArF) | 1:11,6 | 1:6,8 | 1:3,05 | 1:2,32 |
| CL3_25t(ArF) | 1:11,6 | 1:5,0 | 1:3,08 | 1:2,00 |

7.2 Síntese da Caracterização das Argamassas

Na Tabela 7.2 encontra-se uma síntese dos principais resultados obtidos com os vários ensaios realizados aos diversos provetes, nomeadamente: caracterização em estado fresco e caracterização em estado endurecido. O estado endurecido abrange os provetes prismáticos aos 90 dias, provetes em suporte de tijolo aos 28 e 90 dias, e ainda, o reboco aplicado no murete de taipa aos 90 dias.

Tabela 7.2 – Resumo dos principais resultados obtidos

| | | Argamassas | | | | | | | | | | | |
|--|---|---|---|-------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|-------|-------|
| | | CL3 | | CL3_5t(ArF) | | CL3_10t(ArF) | | CL3_15t(ArF) | | CL3_25t(ArF) | | | |
| | | Média | DP | Média | DP | Média | DP | Média | DP | Média | DP | | |
| Caracterização estado fresco | Esp [mm]* | 152,6 | 2,7 | 153,5 | 7,5 | 149,1 | 2,0 | 149,9 | 5,1 | 146,1 | 1,9 | | |
| | Teor em ar [%]** | 4,3 | 0,3 | 4,1 | 0,2 | 4,6 | 0,6 | 4,2 | 0,0 | 3,6 | 0,2 | | |
| | R _{et} [%]** | 85 | 0 | 87 | 1 | 90 | 0 | 92 | 1 | 92 | 0 | | |
| | MV [kg/m ³]** | 1980 | 12 | 1966 | 1 | 1950 | 12 | 1947 | 2 | 1933 | 3 | | |
| Caracterização estado endurecido (28 dias) | Provetes suporte de tijolo | DS _D [shore-A] | 64,1 | 7,1 | 61,9 | 7,2 | 61,3 | 9,7 | 62,0 | 11,7 | 65,0 | 7,4 | |
| | | λ [W/m.K] | 0,426 | 0,077 | 0,457 | 0,077 | 0,545 | 0,094 | 0,521 | 0,054 | 0,531 | 0,074 | |
| | | V _{US} [m/s] | 1288 | 390 | 1360 | 137 | 1437 | 144 | 1351 | 140 | 1394 | 190 | |
| | | C _{abs.T} [kg/(m ² .min ^{0,5})] | 15,90 | 1,30 | 14,26 | 3,30 | 7,01 | 0,60 | 18,30 | 2,00 | 14,60 | 3,20 | |
| | | Qt. _{abs.1h} [ml] | 59,2 | 5,0 | 53,1 | 12,3 | 26,1 | 2,1 | 68,2 | 7,5 | 54,5 | 11,9 | |
| Caracterização estado endurecido (90 dias) | Provetes prismáticos | P _{ab} *** [%] | 28,6 | 0,2 | 29,5 | 0,4 | 29,3 | 0,6 | 27,8 | - | 30,1 | 0,3 | |
| | | MV _{ap} [kg/m ³] | 1595,6 | 6,1 | 1583,3 | 11,32 | 1576,5 | 12,72 | 1619,1 | - | 1598,9 | 6,18 | |
| | | λ [W/m.K] | 0,774 | 0,027 | 0,710 | 0,069 | 0,679 | 0,023 | 0,661 | 0,019 | 0,660 | 0,068 | |
| | | Ed [MPa] | 3243 | 56 | 2731 | 51 | 2460 | 13 | 2458 | 12 | 2193 | 27 | |
| | | Ed _{US} [MPa] | 2826 | - | 2592 | - | 2342 | - | 2286 | - | 1997 | - | |
| | | Rc [MPa] | 0,66 | 0,04 | 0,59 | 0,09 | 0,49 | 0,07 | 0,44 | 0,02 | 0,49 | 0,05 | |
| | | Rt [MPa] | 0,30 | 0,03 | 0,27 | 0,01 | 0,29 | 0,00 | 0,24 | 0,01 | 0,29 | 0,01 | |
| | | IS [-] | 0,1 | 0,007 | 0,11 | 0,002 | 0,13 | 0,001 | 0,14 | 0,009 | 0,16 | 0,007 | |
| | | TS [kg/m ² h] | 0,3 | 0,02 | 0,28 | 0,01 | 0,27 | 0 | 0,26 | 0,01 | 0,28 | 0,01 | |
| | | CC [kg/(m ² .min ^{0,5})] | 4,09 | 0,23 | 4,36 | 0,27 | 3,63 | 0,74 | 3,67 | 0,65 | 5,89 | 0,39 | |
| | | VA [kg/m ²] | 17,41 | 0,55 | 19,08 | 0,58 | 19,51 | 0,58 | 18,68 | 0,35 | 20,58 | 0,08 | |
| | | Δm 25c [%] | 47,67 | 1,83 | 61,81 | 5,43 | 60,98 | 5,87 | 70,85 | 1,94 | 71,84 | 2,77 | |
| | | Provetes suporte de tijolo | DS _D [shore-A] | 60,8 | 9,0 | 60,5 | 15,5 | 67,4 | 7,8 | 60,0 | 10,6 | 68,7 | 9,3 |
| | | | λ [W/m.K] | 0,505 | 0,061 | 0,489 | 0,103 | 0,577 | 0,147 | 0,543 | 0,025 | 0,562 | 0,057 |
| | | | V _{US} [m/s] | 1016 | 174 | 962 | 151 | 1033 | 161 | 1048 | 207 | 989 | 178 |
| | | | C _{abs.T} [kg/(m ² .min ^{0,5})] | 14,0 | 2,4 | 11,7 | - **** | 11,2 | 1,8 | 13,0 | 1,4 | 10,4 | 0,1 |
| | | | Qt. _{abs.1h} [ml] | 52,0 | 8,7 | 43,7 | - **** | 41,8 | 6,7 | 48,5 | 5,2 | 38,8 | 0,2 |
| Reboco | DS _D [shore-A] | 64 | 7 | - | - | 65 | 10 | - | - | - | - | | |
| | DS _E [escala Vickers] | 83 | 5 | - | - | 84 | 6 | - | - | - | - | | |
| | V _{US} [m/s] | 740 | 172 | - | - | 725 | 104 | - | - | - | - | | |
| | C _{abs.T} [kg/(m ² .min ^{0,5})] | 18 | 0,1 | - | - | 27,6 | 16,4 | - | - | - | - | | |
| | Qt. _{abs.1h} [ml] | 66,8 | 0,5 | - | - | 102,6 | 60,7 | - | - | - | - | | |

*Resultados médios entre as médias de cada fase de amassadura.

**Resultados médios entre as fases de cada amassadura.

***Valor obtido através do exsecador.

****Só foi contabilizado um tubo.

Por forma a analisar a viabilidade e eficácia da introdução de terra argilosa nas argamassas de cal aérea estudadas, os resultados obtidos foram comparados relativamente à argamassa de referência (CL3). Estas comparações podem ser observadas nas Tabelas 7.3, 7.4, 7.5, 7.6 e 7.7 através de setas representativas de subidas ou descidas dos resultados relativamente à argamassa de referência, estando com fundo verde ou vermelho se forem consideradas alterações benéficas ou não. As células a verde ou vermelho mais escuro representam o valor mais ou menos benéfico do conjunto.

Tabela 7.3 – Análise global dos resultados em estado fresco

| Argamassas | Caracterização em estado fresco | | | |
|--------------|---------------------------------|----------------|---------------------|--------------------------|
| | Esp [mm] | Teor em ar [%] | R _{et} [%] | MV [kg/dm ³] |
| CL3 | 152,63 | 4,25 | 85 | 1980 |
| CL3_5t(ArF) | ↑ | ↓ | ↑ | ↓ |
| CL3_10t(ArF) | ↓ | ↑ | ↑ | ↓ |
| CL3_15t(ArF) | ↓ | ↓ | ↑ | ↓ |
| CL3_25t(ArF) | ↓ | ↓ | ↑ | ↓ |

O aumento da percentagem de terra nas argamassas estudadas promove uma diminuição da consistência por espalhamento, teor em ar, e massa volúmica. Relativamente à retenção de água, a introdução de argila faz aumentar benéficamente esta propriedade. Tendo em conta que as presentes argamassas poderão ser utilizadas em construção em terra, esta propriedade é muito importante, pois os tipos de suportes em questão apresentam elevada capacidade de absorção de água. Deste modo, quanto maior capacidade de retenção de água uma argamassas possuir, menos água o suporte consegue “retirar” desta.

Tabela 7.4 – Análise global dos resultados dos provetes em suporte de tijolo aos 28 dias

| Argamassas | Provetes em suporte de tijolo - Caracterização em estado endurecido (28 dias) | | | | | | |
|--------------|---|-----------|-----------------------|---|----------------------------|---|--------------------------|
| | DS _D [graus shore-A] | λ [W/m.K] | V _{US} [m/s] | C _{abs.T} [kg/(m ² .min ^{0,5})] | Qt. _{abs.1h} [ml] | C _{abs.4ml} [kg/(m ² .min ^{0,5})] | Tempo _{4ml} [s] |
| CL3 | 64,10 | 0,426 | 1288,40 | 15,91 | 59,20 | 9,79 | 44,60 |
| CL3_5t(ArF) | ↓ | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ | ↑ | ↓ |
| CL3_10t(ArF) | ↓ | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ | ↑ | ↓ |
| CL3_15t(ArF) | ↓ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↓ |
| CL3_25t(ArF) | ↑ | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ | ↑ | ↓ |

Tabela 7.5 – Análise global dos resultados dos provetes em suporte de tijolo aos 90 dias

| Argamassas | Provetes em suporte de tijolo - Caracterização em estado endurecido (90 dias) | | | | | | |
|--------------|---|-----------|-----------------------|---|----------------------------|---|--------------------------|
| | DS _D [graus shore-A] | λ [W/m.K] | V _{US} [m/s] | C _{abs.T} [kg/(m ² .min ^{0,5})] | Qt. _{abs.1h} [ml] | C _{abs.4ml} [kg/(m ² .min ^{0,5})] | Tempo _{4ml} [s] |
| CL3 | 60,80 | 0,505 | 1016,05 | 13,97 | 52,00 | 6,03 | 114,33 |
| CL3_5t(ArF) | ↓ | ↓ | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ | ↑ |
| CL3_10t(ArF) | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ | ↑ | ↓ |
| CL3_15t(ArF) | ↓ | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ | ↑ | ↓ |
| CL3_25t(ArF) | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ | ↑ | ↓ |

Relativamente aos provetes em suporte de tijolo é possível verificar tendências distintas para ambas as idades em questão (28 e 90 dias). Os valores de condutibilidade térmica apresentam uma tendência semelhante, aumentando com o aumento do teor de terra argilosa, com exceção da argamassa CL3_5t(ArF) aos 90 dias. A velocidade de propagação de ultra-sons verifica tendências distintas para ambas as idades. Aos 28 dias esta grandeza aumenta com a introdução de terra e aos 90 dias diminui em algumas argamassas (nomeadamente nas percentagens de 10 e 25% de terra). Quanto ao comportamento face à água, aos 28 dias a argamassa com pior comportamento é a argamassa com 15% de terra pois absorve maior quantidade de água e também rapidamente. Aos 90 dias a argamassa com 15% de terra também apresenta o pior comportamento, pois é a que absorve mais água e mais rapidamente.

Tendo em conta que os resultados obtidos aos 90 dias são mais próximo de uma fase final do processo de carbonatação, considera-se que os valores a esta idade são mais conclusivos do que os valores aos 28 dias. Assim, verifica-se que o comportamento face à água melhora assim como a dureza superficial.

Tabela 7.6 – Análise global dos resultados obtidos para os provetes prismáticos aos 90 dias

| Argamassas | Provetes prismáticos - Caracterização em estado endurecido (90 dias) | | | | | | | | | | |
|--------------|--|---------------------------------------|-------------------|----------|----------|----------|--------|-----------------------------|---|-------------------------|--------------------|
| | P _{ab} * [%] | MV _{ap} [kg/m ³] | λ [W/m.K] | Ed [MPa] | Rc [MPa] | Rt [MPa] | IS [-] | TS [kg/(m ² .h)] | CC [kg/(m ² .min ^{0,5})] | VA [kg/m ²] | Δm 25c [%] |
| CL3 | 28,6 | 1595,56 | 0,774 | 3243 | 0,66 | 0,30 | 0,10 | 0,2953 | 4,09 | 17,41 | 47,67 |
| CL3_5t(ArF) | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | ↑ | ↓ | ↑ | ↑ | ↑ |
| CL3_10t(ArF) | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | ↑ | ↓ | ↓ | ↑ | ↑ |
| CL3_15t(ArF) | ↓ | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | ↑ | ↓ | ↓ | ↑ | ↑ |
| CL3_25t(ArF) | ↑ | ↑ | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | ↑ | ↓ | ↑ | ↑ | ↑ |

*Valor obtido através do exsiccador.

É possível constatar que as três propriedades mecânicas diminuem com o aumento da quantidade de terra adicionada, podendo ser, no caso do módulo de elasticidade dinâmico, essa situação benéfica. O comportamento das argamassas estudadas face à água é melhor para as argamassas com 10 e 15% de terra uma vez que apresentam valores de coeficiente de capilaridade mais baixo. O aumento da percentagem de terra promove um aumento do valor assintótico e do índice de secagem. No entanto, promove uma diminuição da taxa de secagem. A condutibilidade térmica apresenta uma diminuição benéfica face ao aumento da quantidade de terra adicionada. A introdução de terra não oferece boas resistências à ação dos sulfatos, visto que a perda de massa aumenta com o aumento da percentagem de terra.

Tabela 7.7 – Análise global dos resultados obtidos para o reboco aos 90 dias

| Argamassas | Reboco aplicado no murete de taipa – Caracterização em estado endurecido (90 dias) | | | | | | |
|--------------|--|----------------------------------|-----------------------|---|----------------------------|---|----------------------------|
| | DS _D [graus shore-A] | DS _E [escala Vickers] | V _{us} [m/s] | C _{abs.T} [kg/(m ² .min ^{0,5})] | Qt. _{abs.1h} [ml] | C _{abs.4ml} [kg/(m ² .min ^{0,5})] | Tempo _{4ml} [min] |
| CL3 | 64 | 83 | 725,00 | 18,00 | 66,80 | 3,70 | 5,08 |
| CL3_10t(ArF) | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↓ |

Analisando as duas argamassas aplicadas no murete de taipa, verifica-se que a dureza superficial (por ambos os métodos) é maior para a argamassa com terra. A velocidade de propagação de ultra-sons também aumenta, querendo isto dizer que a argamassa de terra é mais compacta do que a argamassa de referência. No entanto, o comportamento face à água piora, aumentando tanto o coeficiente de absorção como a quantidade de água absorvida.

Resumindo, pode-se constatar que a introdução de terra provoca uma diminuição das resistências mecânicas, incluindo o módulo de elasticidade dinâmico. No entanto, um módulo de elasticidade baixo é aconselhável para argamassas a aplicar em suportes de terra, uma vez que estes suportes apresentam bastante deformabilidade. Assim sendo, este aspeto é benéfico. A condutibilidade térmica também melhorou com a introdução de terra, diminuindo o seu valor.

Relativamente ao comportamento face à água, os resultados dos provetes prismáticos e do reboco aplicado no murete de taipa merecem maior atenção do que os provetes em suporte de tijolo, uma vez estes não serem o suporte ideal para as argamassas em questão. Assim sendo, e tendo em conta esta generalidade, o comportamento face à água piora com a introdução de terra.

Tendo em conta todos estes resultados, a argamassa que sugere melhores resultados é a que contém 10% de terra. As argamassas que apresentam pior comportamento face à água são as que possuem 15 e 25% de terra. A que apresenta resistências mais baixas (compressão e tração) é a de 15%.

7.3 Argamassas em Estado Endurecido

7.3.1 Propriedades Mecânicas dos Provetes Prismáticos

Neste ponto irão ser comparados os resultados obtidos do módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tração por flexão e resistência à compressão, entre eles e também com os mesmos resultados obtidos por Gomes et al. (2012b), neste caso em argamassas de terra argilosa e areia ao traço volumétrico 1:3 com 5, 10 e 15% de cal aérea (Tabelas 2.8 e 2.9). Lembra-se que estes dois grupos de argamassas possuem algo em comum que permite que estas possam ser comparáveis:

- Argamassas produzidas na presente dissertação: parte-se de uma argamassa de cal aérea de traço 1:3 e substitui-se percentagens de crescentes de terra na parcela do agregado fino. As percentagens são de 5, 10, 15 e 25%.
- Argamassas de terra (Gomes et al, 2012b): parte-se de uma argamassa simplesmente de terra de traço 1:3 (terra-padrão:areia grossa) e acrescentam-se percentagens de cal aérea. Essas percentagens são de 5, 10 e 15%.

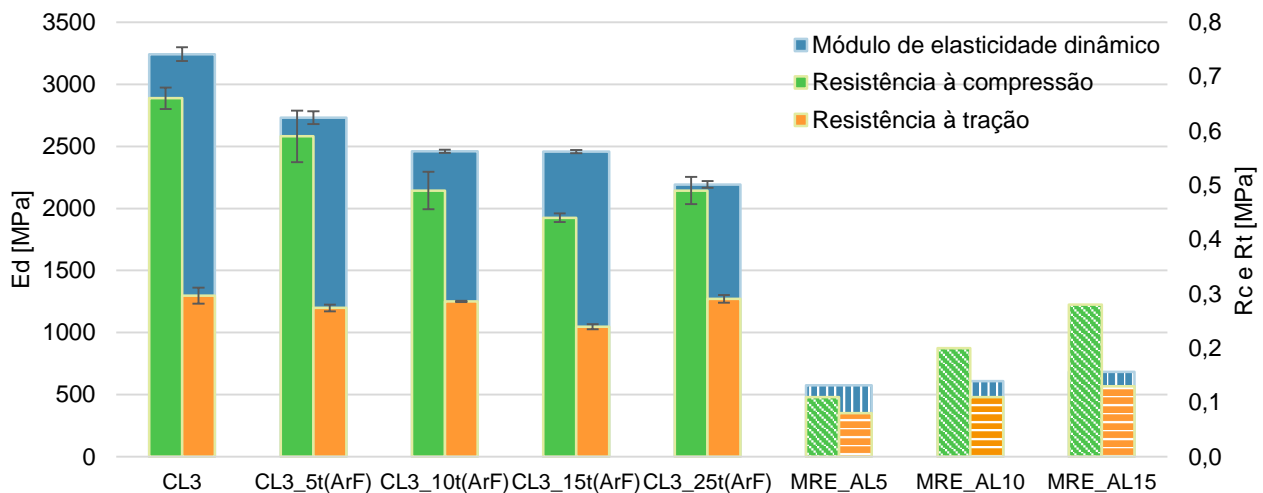


Figura 7.2 – Resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade dinâmico, resultados da presente dissertação e de Gomes et al. (2012b)

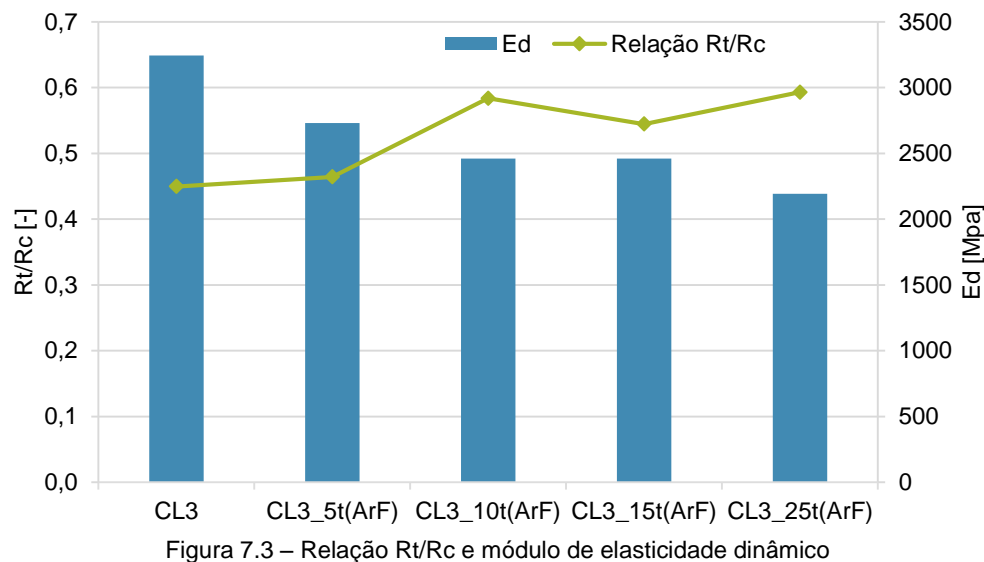
Na Figura 7.2 encontram-se as propriedades mecânicas das argamassas desse mesmo estudo e da presente dissertação.

Confrontando os dois valores de resistências à tração e à compressão da presente dissertação é possível notar que, para ambas as resistências, o valor mais elevado corresponde à argamassa de referência (CL3). Relativamente ao valor mais baixo para ambas as resistências, este pertence à argamassa com 15% de terra (CL3_15t(ArF)). As argamassas de 10 e 25% de terra possuem valores semelhantes para ambas as resistências. Comparando com os resultados do módulo de elasticidade na mesma figura e tendo em conta que as argamassas com melhores resistência mecânica (compressão e tração) são as que contêm 10 e 25% de terra, destas duas a que possui menor valor de módulo de elasticidade dinâmico é a argamassa com 25% de terra (CL3_25t(ArF)).

Comparando as três propriedades mecânicas das argamassas da presente dissertação com as argamassas de terra mencionadas na Tabela 2.9 (Gomes et al. 2012b) verifica-se o seguinte: o aumento do teor de argila em argamassa de cal aérea provoca uma diminuição destas três grandezas; por outro lado, o aumento do teor de cal aérea em argamassa de terra provoca o seu aumento. Mesmo assim, as propriedades mecânicas destas argamassas (Gomes et al. 2012b) apresentam valores bastante baixos. No entanto, a introdução de fibras nestas mesmas argamassas promovem a um aumento da resistência à compressão, fazendo por outro lado diminuir a resistência à tração e módulo de elasticidade dinâmico.

Os resultados obtidos para a argamassa de referência podem ser comparados com resultados também de argamassas de cal aérea de outros estudos: um que formula argamassas de cal aérea com o mesmo traço (1:3) e o mesmo tipo de cal e areias (Branco 2013), e dois que formulam as mesmas argamassas mas com areias distintas (Faria 2004a e Veiga 2003). Estes resultados encontram-se as Tabelas 2.6 e 2.7 respetivamente. Os valores mais elevados das três propriedades mecânicas pertencem à argamassa analisada por Veiga 2003, que possui valores bastantes superiores às restantes. A argamassa da presente dissertação e a argamassa analisada por Branco (2013) possuem valores relativamente próximos de módulo de elasticidade. O valor mais baixo desta grandeza pertence à argamassa de Faria 2004a. Os valores mais baixos de ambas as resistências pertencem à argamassa de Branco 2013, e seguidamente a argamassa da presente dissertação.

Através da razão entre a resistência à tração por flexão e a resistência à compressão é possível averiguar a deformabilidade de determinada argamassa. Para tal, admite-se que uma argamassa é tanto mais dúctil quanto maior for o quociente entre as resistências mecânicas à tração e à compressão (Faria 2004a). Esta relação apresenta-se juntamente com o módulo de elasticidade dinâmico na Figura 7.3.



Analisando a Figura 7.3 é possível verificar que, embora a diminuição do E_d (e consequente aumento da deformabilidade) seja linear com a introdução de terra, a razão R_t/R_c tem tendência a aumentar na mesma ordem (com o aumento de terra), também indiciando um aumento da deformabilidade.

Uma outra propriedade que pode ser confrontada com a resistência à compressão é a resistência aos sulfatos.

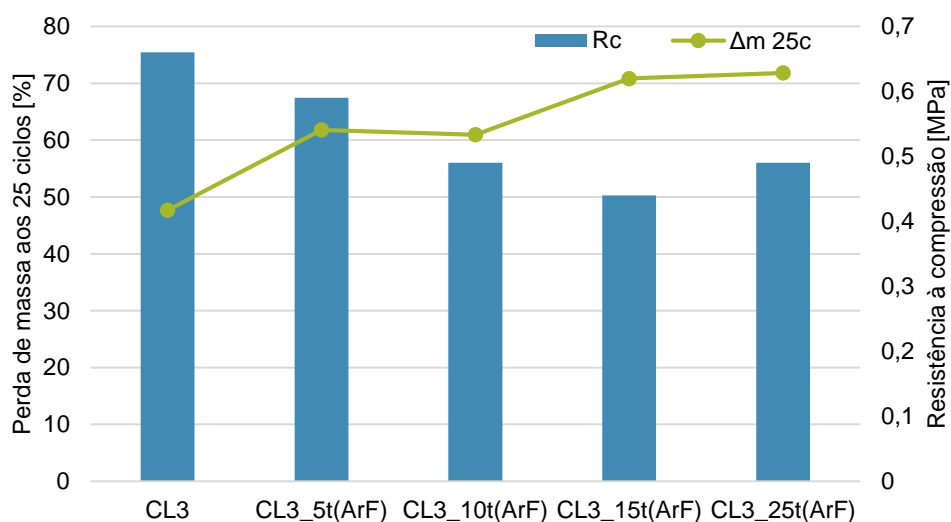


Figura 7.4 – Resistência à compressão e resistência aos sulfatos (90 dias)

Analisando a Figura 7.4 é possível constatar que ambas as propriedades possuem tendências que se compreendem. Com efeito, a resistência à compressão diminui com o aumento de terra, pelo que a perda de massa face à ação dos sulfatos aumenta. Esta situação indícia que as reações que

ocorrem são nestas argamassas iminentemente mecânicas, ao contrário do que sucede em argamassas com comportamento hidráulico (Faria 2009). Das argamassas de terra, a argamassa com 10% parece ser a que possui uma combinação destas duas propriedades mais favorável.

Como é sabido, a resistência mecânica de uma argamassa depende da sua compactidade, que por sua vez depende da quantidade e dimensão dos poros (Rato 2006). Este facto foi confirmado pelo presente estudo, como se pode verificar pela Figura 7.5.

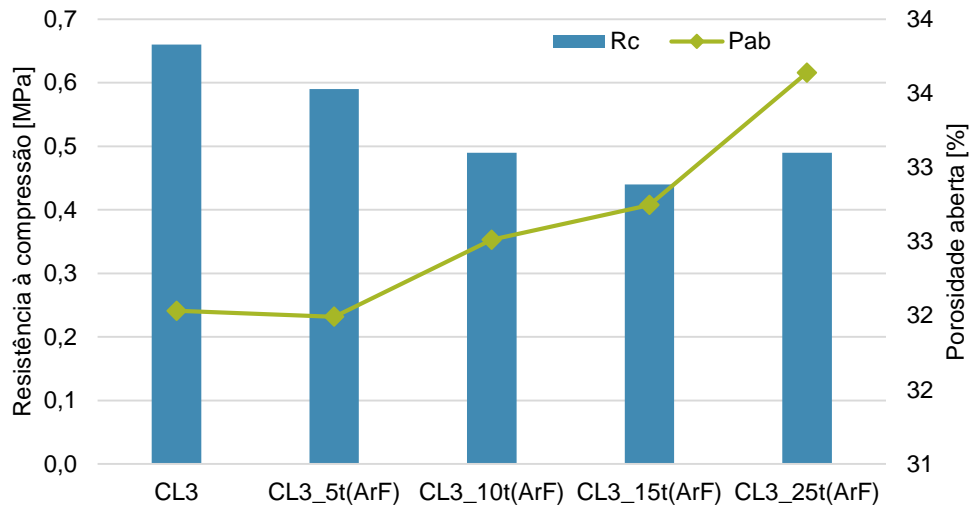


Figura 7.5 – Resistência à compressão e porosidade aberta por intrusão de mercúrio em provetes prismáticos (90 dias)

De acordo com Rato 2006, é razoável admitir que, nas argamassas mais porosas, a carbonatação da cal esteja mais desenvolvida, proporcionando maiores resistências mecânicas a idades jovens. No entanto, tal afirmação não foi comprovada com este estudo, sendo aliás confirmado o contrário: as maiores porosidades correspondem menores resistências mecânicas. Verificou-se também que às argamassas menos porosas (com menor porosidade aberta) correspondem argamassas com poros de maiores dimensões: a argamassa de referência é a argamassa com mais poros de maior dimensão e menor porosidade aberta, e a argamassa com maior percentagem de terra é aquela que apresenta maior porosidade aberta e menor volume de poros de maiores dimensões, tendo por outro lado maior volume de poros menores. Ou seja, ao se introduzir terra na argamassa de cal aérea, aumenta-se a porosidade aberta diminuindo a quantidade de poros de maiores dimensões, e aumentando a quantidade de poros de menores dimensões.

As propriedades mecânicas de uma argamassa são atingidas com o avançar do processo de carbonatação.

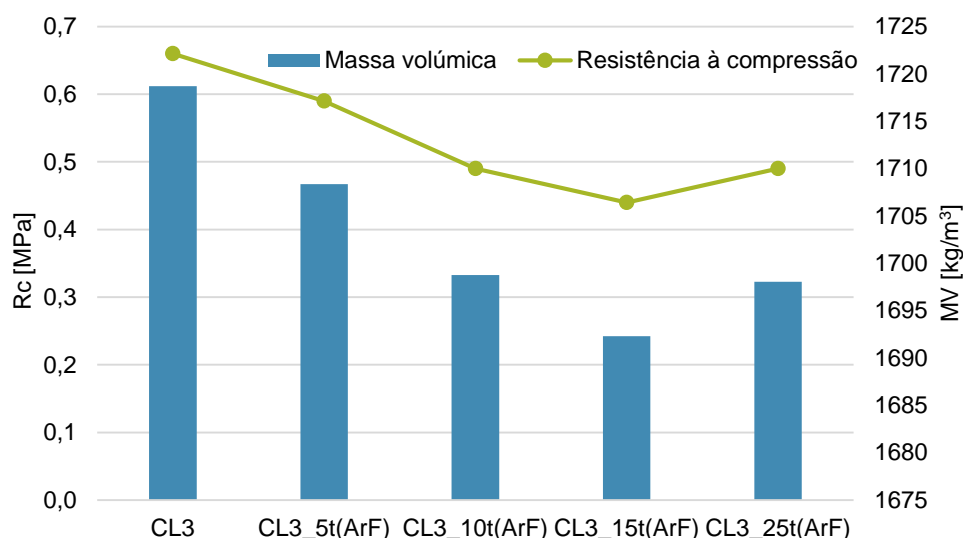


Figura 7.6 – Resistência à compressão e massa volúmica em provetes prismáticos (90 Dias)

De facto verifica-se na Figura 7.6, que a resistência à compressão acompanha o andamento da massa volúmica. Quer isto dizer que quanto mais baixa a massa volúmica, e logo maior quantidade de ar no interior (menor quantidade de areia e maior de terra e/ou eventualmente menor quantidade de CaCO_3), mais baixa é a resistência à compressão.

7.3.2 Comportamento com a Ação da Água dos Provetes Prismáticos

Tendo em conta que a capacidade de uma argamassa absorver água está relacionada com a sua capacidade de secagem, estas duas propriedades foram confrontadas. Os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade e secagem encontram-se na Tabela 7.2.

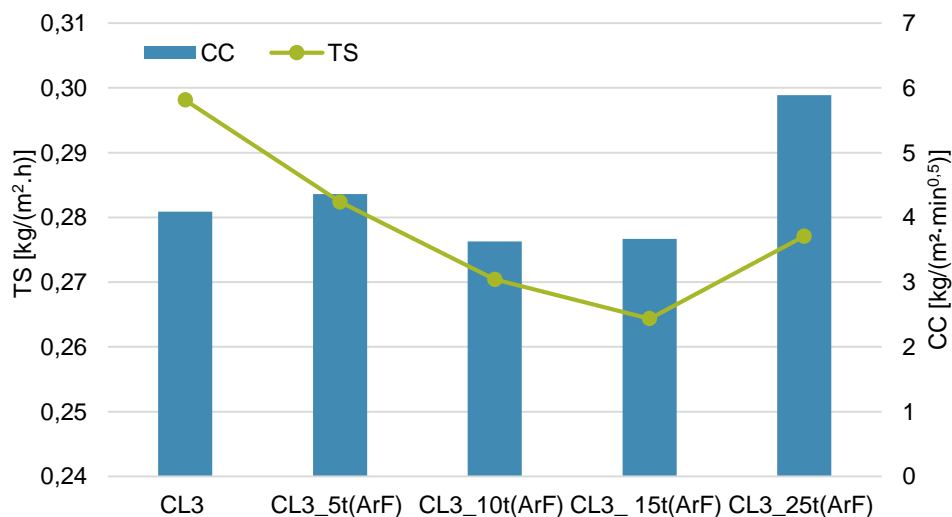


Figura 7.7 – Taxa de secagem e coeficiente de capilaridade dos provetes prismático aos 90 dias

Tanto a taxa de secagem como o coeficiente de capilaridade traduzem velocidades iniciais, nomeadamente de secagem e de absorção de água, respetivamente (Figura 7.7). A argamassa com maior taxa de secagem é a de referência, enquanto a que possui maior valor de coeficiente de capilaridade é a de 25% de terra. Comparando a argamassa de referência (CL3) e a argamassa com maior

percentagem de terra (CL3_25t(ArF)) verifica-se que a primeira absorve água mais lentamente (relativamente à argamassa com 25% de terra), contrariamente ao que sucede com a taxa de secagem, pois a argamassa de referência seca mais rápido.

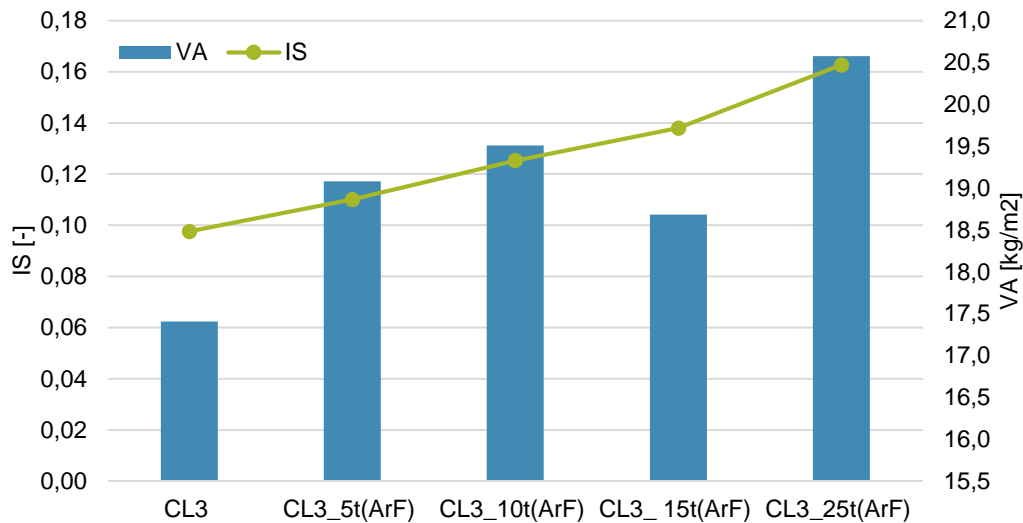


Figura 7.8 – Índice de secagem e valor assintótico

Analisando a Figura 7.8 verifica-se que a argamassa de referência possui tanto um índice de secagem como um valor assintótico menor. A argamassa com estas duas propriedades maiores é a de maior percentagem de terra (CL3_25t(ArF)). É possível notar uma tendência semelhante relativamente ao índice de secagem e ao valor assintótico. O facto de estas argamassas possuírem terra argilosa faz com que estas absorvam mais água (pois a argila tem essa capacidade), daí o valor assintótico maior pertencer à argamassa com 25% de terra.

Comparando os valores de coeficiente de capilaridade das argamassas de terra com 5, 10 e 15% de cal aérea da Tabela 2.9 (Gomes et al. 2012b) com os valores das presentes argamassas com as mesmas percentagens, verifica-se que a introdução de cal aérea em argamassas de terra promove o aumento desta grandeza, contrariamente à introdução de terra em argamassas de cal aérea, que promove a sua diminuição. O coeficiente de capilaridade da argamassa CL3_10t(ArF) é igual ao valor da argamassa MRE_AL10 (argamassa de terra com 10% de cal aérea), sendo estes de $0,47 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$. Relativamente ao índice de secagem, ambas as vertentes sugerem um aumento desta grandeza com o aumento da percentagem adicionada ou de cal aérea ou de terra. Ainda sobre estas argamassas de terra, a introdução de fibras provoca uma diminuição do coeficiente de capilaridade e a um aumento do índice de secagem.

A estrutura porosa de uma argamassa condiciona também o seu comportamento face à água, nomeadamente face à ação capilar. Quando os poros são de menor dimensão, a pressão capilar é maior, causando uma ascensão capilar maior (Rato 2006). Por outro lado, quanto maior a porosidade aberta, maior também será a quantidade de água absorvida. Na Figura 7.9 esta afirmação é confirmada, no sentido em que as argamassas mais porosas (maior quantidade de porosidade aberta) são também aquelas que absorvem maior quantidade de água. Tendo em conta a Figura 6.24, verifica-se que a argamassa de referência é aquela que apresenta menor quantidade de poros de menor dimensão ($0,17 \mu\text{m}$) e a argamassa com 25% de terra apresenta maior quantidade destes poros, sendo que a primeira

é a que absorve menos água e segunda, a que absorve mais. Ou seja, a argamassa de referência é aquela que apresenta menor porosidade aberta, menor quantidade de poros finos e maior quantidade de poros grandes, contrariamente à argamassa com 25% de terra que apresenta maior porosidade aberta, maior quantidade de poros finos e menor quantidade de poros grandes. Assim pode-se constatar que as argamassas com terra são efetivamente argamassas de poros mais finos.

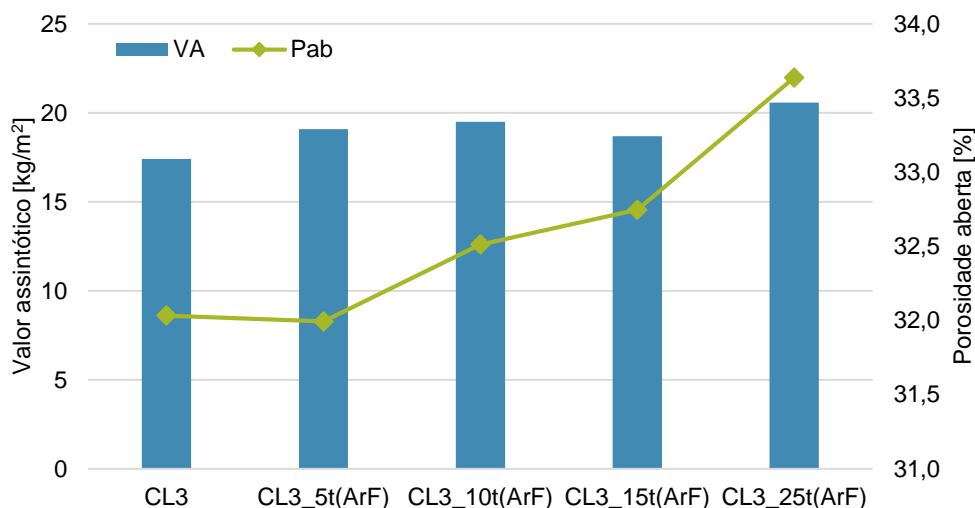


Figura 7.9 – Porosidade aberta e valor assintótico em provetes prismáticos (90 dias)

7.3.3 Condutibilidade Térmica em Provetes em Suporte de Tijolo e Prismáticos

Comparando os valores de condutividade térmica obtidos nos provetes em suporte de tijolo e nos provetes prismáticos (ambos aos 90 dias) obtém-se a Figura 7.10.

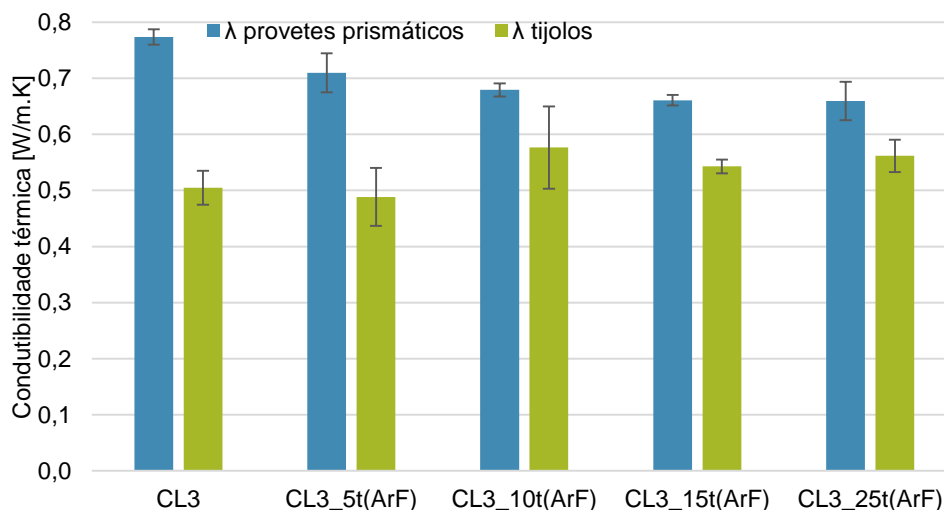


Figura 7.10 - Condutibilidades térmicas de provetes prismáticos e provetes em suporte de tijolos aos 90 dias

Analisando o Figura 7.10, é possível notar uma tendência crescente para os tijolos e uma tendência decrescente para os provetes prismáticos (com o aumento da percentagem de terra). Estas diferenças perante o mesmo ensaio e a mesma idade provêm do tipo de provete. Enquanto os provetes prismáticos não possuem largura suficiente para a sonda, o reboco aplicado nos tijolos talvez não possua a espessura suficiente. Tendo em conta os desvios padrão de ambos os provetes, os prismáticos

sugerem resultados mais reais (uma vez que apresentam menor desvio padrão). A superfície de contacto entre a sonda e os provetes prismáticos foi a base inferior dos mesmos, sendo esta mais lisa do que a superfície do reboco aplicado no tijolo.

O valor de condutibilidade térmica mencionado no ITE50 para argamassas e rebocos de cal e areia é de $0,8 \text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$, que é bastante próximo do valor obtido com a argamassa de referência nos provetes prismáticos ($0,774 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$).

7.3.4 Compacidade por Ultra-Sons e Condutibilidade Térmica

Tendo em conta que com o ensaio dos ultra-sons é possível averiguar a compacidade de um material, esta propriedade merece ser confrontada com os valores obtidos de condutibilidade térmica, pois esta última é influenciada pela menor ou maior compacidade do material (Figura 7.11).

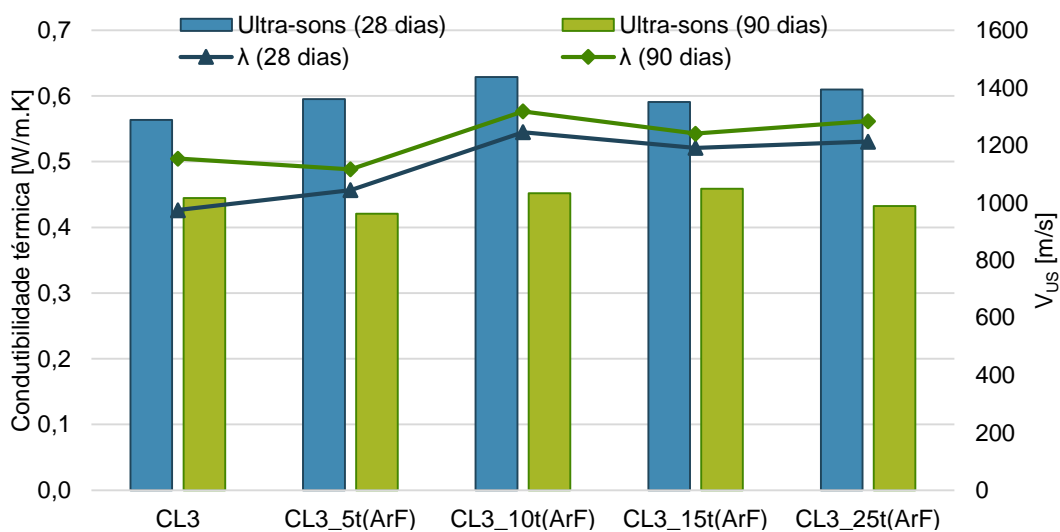


Figura 7.11 – Condutibilidade térmica e velocidade de propagação de ultra-sons em provetes em suporte de tijolo (28 e 90 dias)

Relativamente aos 28 dias é possível observar que quando uma das grandezas aumenta a outra também aumenta, e vice-versa. Nos 90 dias o mesmo andamento verifica-se para as três primeiras argamassas; no entanto da terceira para a quarta o valor de condutibilidade diminui ligeiramente, contrariamente aos ultra-sons. Esta tendência contrária mantém-se da quarta para a quinta argamassa. Estas duas grandezas relacionam-se pelo facto de maiores velocidades de propagação de ultra-sons implicarem maior compacidade (menos vazios), e maiores condutibilidades térmicas implicarem também maior compacidade. Daí, a maiores velocidades de ultra-sons, estarem relacionadas condutibilidades térmicas maiores.

7.3.5 Porosidade Aberta

A porosidade aberta foi determinada para diferentes amostras das argamassas através do ensaio de intrusão de mercúrio: provetes prismáticos, provetes em suporte de tijolo e, ainda, em ambas as argamassas aplicadas no murete de taipa, todos estes aos 90 dias de idade. Foi ainda determinado pelo método do exsicador e pesagem hidrostática para os provetes prismáticos (Figura 7.12).

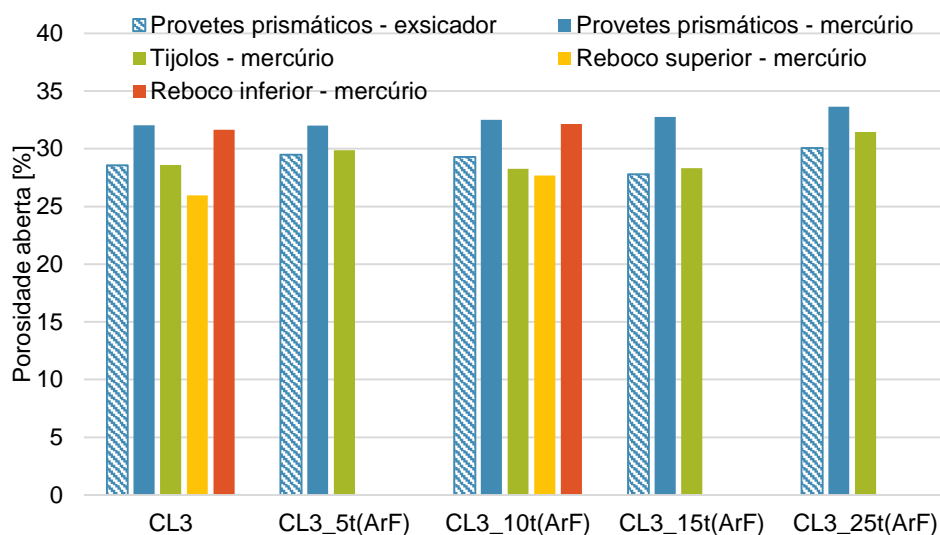


Figura 7.12 – Porosidade aberta das diferentes amostras de argamassas (90 Dias)

De uma forma geral, as argamassas com maiores percentagens de terra são também ligeiramente mais porosas. É possível verificar que os valores de porosidade aberta são superiores para os provetes prismáticos, seguindo-se os valores das amostras removidas da zona inferior do reboco, seguidas dos provetes em suporte de tijolo, e por último (valores mais baixos) as amostras removidas da zona superior do reboco. Deste modo, é possível constatar que o suporte influencia ligeiramente a porosidade das argamassas. Os resultados obtidos através da intrusão de mercúrio são mais rigorosos perante os resultados obtidos com o ensaio através do exsicador. Por outro lado, por este método foi apenas analisada uma amostra de cada argamassa (contrariamente ao método do exsicador que analisou três amostras de cada traço).

7.3.6 Porosimetria de Mercúrio - Influência do Suporte

Realizando o ensaio de intrusão de mercúrio em diversas amostras foi possível avaliar a influência de determinado tipo de suporte (nomeadamente de tijolo furado ou murete de taipa) na dimensão dos poros. Nas Figuras 7.13 e 7.14 é possível confirmar as quantidades de poros de determinada dimensão nos provetes prismáticos e nos provetes em suporte de tijolo. De uma forma geral, a porosimetria dos provetes prismáticos é mais homogênea do que os provetes em suporte de tijolo.

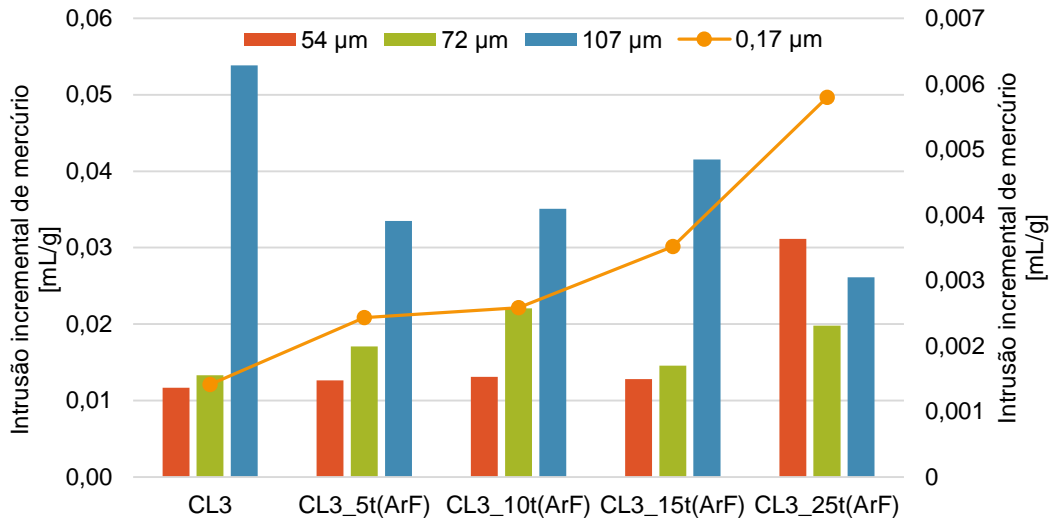


Figura 7.13 - Quantidade de mercúrio introduzido em algumas intrusões (provetes prismáticos)

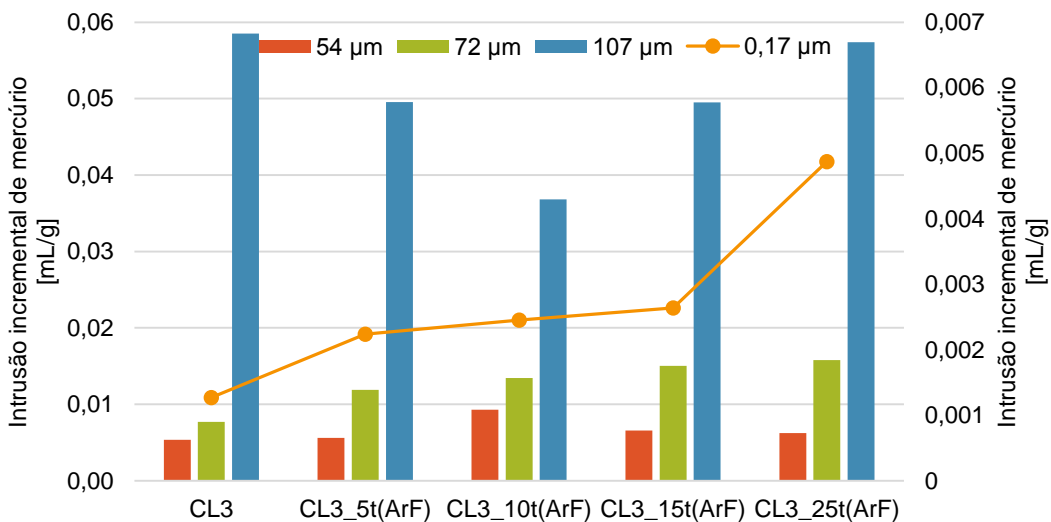


Figura 7.14 - Quantidade de mercúrio introduzido em algumas intrusões (provetes em suporte de tijolo)

Analisando a Figura 7.13 e 7.14 verifica-se que a quantidade de poros de diâmetro 107 μm (macroporos) aumenta quando as argamassas são aplicadas em suporte de tijolo e a quantidade de poros de 72 e 54 μm diminui. Relativamente aos poros de menores dimensões (0,17 μm , poros capilares) as duas argamassas que mais se modificaram foram as com 15 e 25% de terra, que diminuiram a sua quantidade ao serem aplicadas nos tijolos. A argamassa que menos se alterou com a aplicação neste suporte foi a argamassa com 10% de terra (CL3_10t(ArF)). Por outro lado, aquela que mais se modificou foi a argamassa com maior percentagem de terra, CL3_25t(ArF), que além de aumentar bastante a quantidade de poros de 107 μm , reduziu também bastante a quantidade de poros de 75 e 54 μm , ficando assim com uma porosimetria mais semelhante às restantes argamassas.

Nas Figuras 7.15 e 7.16 encontram-se a distribuição de poros das argamassas CL3 e CL3_10t(ArF) das amostras removidas do reboco, dos tijolos e ainda dos provetes prismáticos, por forma a analisar a influencia de ambos os suportes.

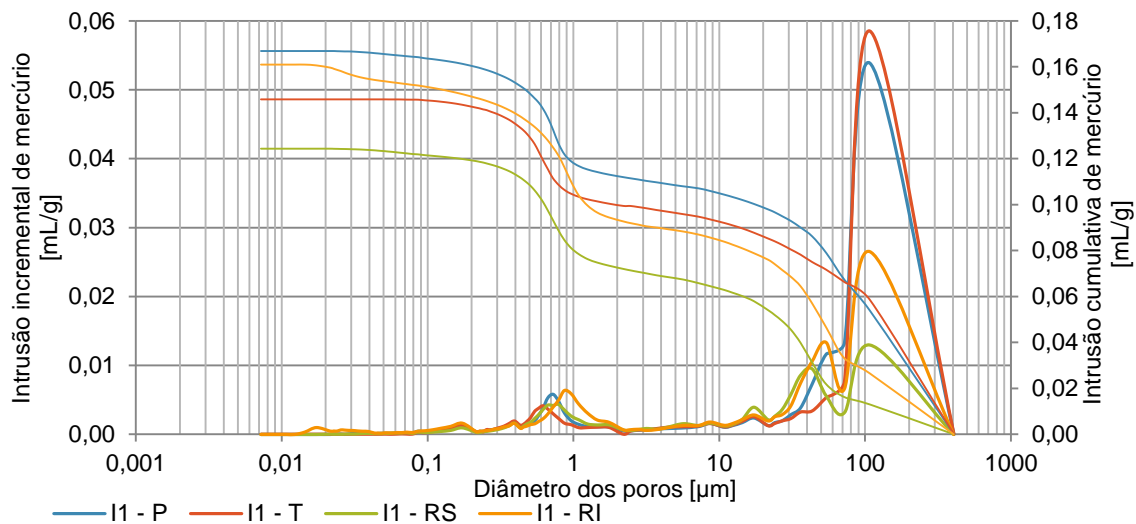


Figura 7.15 – Porosimetria das amostras de argamassa CL3 em prisma, sobre tijolo e no reboco, na parte superior e inferior

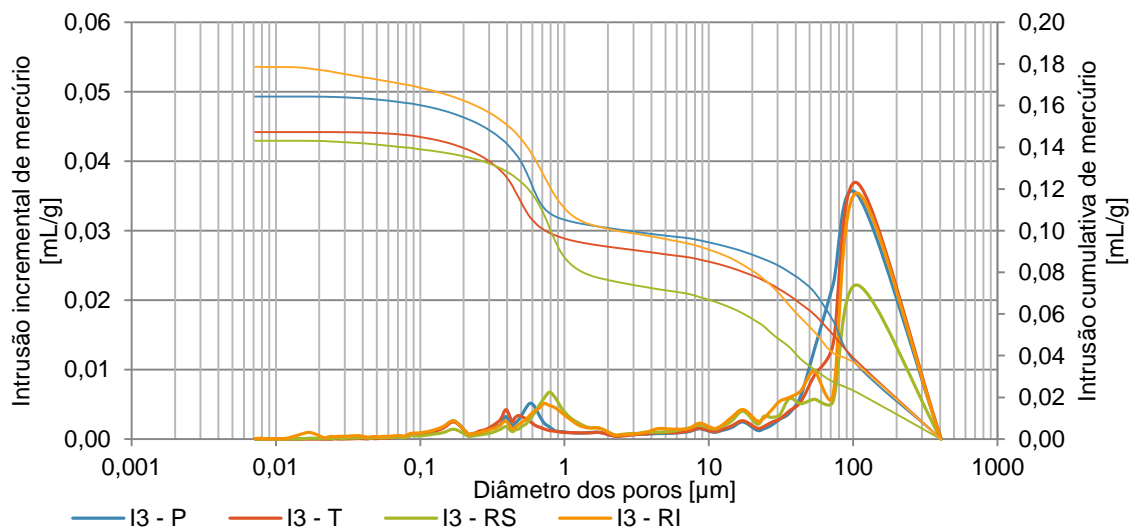


Figura 7.16 – Porosimetria das amostras da argamassa CL3_10t(ArF) em prisma, sobre tijolo e no reboco, na parte superior e inferior

De uma forma geral, a argamassa de terra apresenta menor quantidade de poros de maiores dimensões (macroporos) nos provetes prismáticos e nos provetes em suporte de tijolo (comparativamente com a argamassa de referência). No entanto, apresentam maior quantidade destes poros quando aplicadas no murete de taipa.

A aplicação em tijolo parece induzir um aumento da quantidade de poros de maiores dimensões, para ambas as argamassas. Por outro lado, a aplicação em taipa provoca alterações distintas para ambas as argamassas.

Deste modo, as argamassas aplicadas no murete apresentam uma porosimetria mais homogênea. A argamassa de referência ao ser aplicada no suporte de taipa diminuiu bastante na quantidade

de poros de maiores dimensões (107 μm), surgindo ainda outra gama de poros (43 μm). Verifica-se que a amostra removida da zona inferior apresenta maiores quantidades destas gamas de poros do que a amostra removida da zona superior.

A argamassa de terra ao ser aplicada na taipa não sofreu tanta alteração, diminuindo um pouco a quantidade de poros de maiores dimensões (107 μm) para a amostra da zona superior, contrariamente à amostra da zona inferior, que não sofreu alteração. Por outro lado aumentou a quantidade de poros menores (0,7 μm). Verifica-se então que a aplicação das argamassas em diferentes suportes influencia bastante a sua porosidade.

7.4 Discussão e Apreciação Geral das Argamassas

Avaliação exigencial das argamassas:

Comparando os resultados obtidos de propriedades mecânicas das argamassas da presente dissertação e os valores da Tabela 2.4 (que apresenta valores de referência recomendados para argamassas de revestimento para edifícios antigos aos 90 dias de idade (Veiga 2010)) verifica-se que muitas das argamassas estudadas cumprem tais recomendações.

Tabela 7.8 – Verificação dos requisitos das propriedades mecânicas

| Argamassas | Reboco exterior | Reboco interior | Refechamento de juntas |
|--------------|-----------------|-----------------|------------------------|
| CL3 | √ | √ | √ |
| CL3_5t(ArF) | √ | √ | X |
| CL3_10t(ArF) | √ | √ | X |
| CL3_15t(ArF) | √ | √ | X |
| CL3_25t(ArF) | √ | √ | X |

Quanto às resistências mecânicas, todas as argamassas estudadas indiciam poder ser utilizadas como argamassas de revestimentos para rebocos exteriores e interiores. Relativamente a argamassas de refecimento de juntas, apenas a argamassa de referência pode ser aplicada, pois só viola uma condição (resistência à tração mínima). Deste modo e apenas com base nessa gama de valores, meramente indicativo, as argamassas de terra estudadas na presente dissertação não deveriam ser utilizadas com esse fim. Em termos de coeficiente de capilaridade, nenhuma das argamassas (nem mesmo a de referência) se encontra dentro dos parâmetros.

Murete de taipa:

Os valores obtidos de caracterização do murete de taipa e das duas argamassas aplicadas neste permitem concluir que a dureza superficial do suporte obtida através de esclerómetro pendular é um pouco superior à dureza das argamassas, sendo no entanto bastante próximas. Relativamente ao comportamento face à água, a velocidade de absorção inicial é menor em ambas as argamassas aplicadas do que no suporte. Enquanto a argamassa de referência absorve maior quantidade de água (em 5 minutos) que o suporte, a argamassa de terra absorve menor quantidade do que esse mesmo suporte.

Tendo em conta estas duas análises, conclui-se que, deste ponto de vista, a argamassa de terra é preferível para aplicar neste tipo de suporte (taipa).

Através da realização de ensaios semelhantes nas argamassas aplicadas em suportes distintos, foi possível analisar a sua influência. Na Tabela 7.2 podem ser consultados os resultados obtidos com o mesmo ensaio, nas mesmas argamassas, mas aplicadas em suportes diferentes, nomeadamente no murete de taipa e em tijolo furado. Verifica-se que a aplicação da mesma argamassa em diferentes suportes provoca variações nos resultados. A dureza superficial não apresenta alterações consideráveis. No entanto, a velocidade de propagação de ultra-sons é bastante diferente, sendo muito superior nas argamassas aplicadas em suporte de tijolo. Relativamente ao comportamento face à água, as argamassas aplicadas no murete de taipa sugerem maiores quantidades de água absorvidas, sendo essa água absorvida pela argamassa de referência em maior velocidade e pela argamassa de terra, em menor.

Tendo em conta que a condutibilidade térmica da taipa é bastante elevada, a aplicação das argamassas neste suporte providenciam bons resultados, uma vez que apresentam condutibilidades térmicas inferiores.

Outros estudos:

Tendo em conta que as duas vertentes analisadas deste tipo de argamassas apresentam percentagens de terra semelhantes (5, 10 e 25% de terra argilosa) tornou-se interessante comparar alguns dos resultados obtidos para as mesmas quantidades de terra introduzidas (Tabela 7.9). Para tal, comparou-se através de setas representativas de aumentos ou diminuições de determinadas propriedades das argamassas da presente dissertação em relação às argamassas caracterizadas por Jamú (2013). Verifica-se que a utilização de terra como ligante ou como agregado parcial pode trazer vantagens e desvantagens. Embora sejam duas vertentes do mesmo tema, elas apresentam algumas diferenças. É necessário ter em conta que as argamassas da outra dissertação apresentam um traço 1:2, e portanto mais rico em ligante. Consequentemente é de se esperar que apresentem menos vazios, sendo portanto mais compactas.

As três propriedades mecânicas diminuem ao utilizar-se a argila como agregado parcial, sendo, no entanto, vantajoso para o módulo de elasticidade dinâmico. Relativamente ao comportamento face à água, a utilização da terra como agregado parcial faz aumentar os valores de coeficiente de capilaridade e taxa de secagem, fazendo por outro lado diminuir o valor assintótico e índice de secagem. A condutibilidade térmica apresenta vantagens ao utilizar-se a terra como agregado parcial, uma vez que esta grandeza diminui. Relativamente à resistência aos sulfatos, verifica-se que as argamassas da presente dissertação perderam mais massa. Utilizando a terra como agregado parcial, obteve-se menor porosidade aberta, querendo isto dizer que as argamassas da presente dissertação são menos porosas, contrariando o que se esperava.

Tabela 7.9 – Comparação de resultados com Jamú (2013) (provetes prismáticos aos 90 dias)

| Propriedades | CL3_5t(ArF) | CL3_10t(ArF) | CL3_25t(ArF) |
|---|-------------|--------------|--------------|
| CC [kg/(m ² .min ^{0,5})] | ↑ | ↑ | ↑ |
| VA [kg/m ²] | ↓ | ↓ | ↓ |
| TS [kg/m ²] | ↑ | ↑ | ↑ |
| IS [-] | ↓ | ↓ | ↓ |
| Ed [MPa] | ↓ | ↓ | ↓ |
| Rc [MPa] | ↓ | ↓ | ↓ |
| Rt [MPa] | ↓ | ↓ | ↓ |
| λ [W/m.K] | ↓ | ↓ | ↓ |
| Δm 25c [%] | ↑ | ↑ | ↑ |
| P _{ab} [%] | ↓ | ↓ | ↓ |

Assim, verifica-se que a utilização de terra como agregado parcial apresenta algumas vantagens relativamente à sua utilização como ligante: a quantidade de água absorvida é menor; a velocidade de secagem é maior, apresentando portanto maior facilidade de secagem; o módulo de elasticidade é menor, sendo também mais deformáveis; a condutibilidade térmica diminui, assim como a porosidade aberta. As desvantagens estão relacionadas com a velocidade de absorção de água, nas resistências mecânicas (tração e compressão) e também na resistência aos sais solúveis.

Compararam-se também alguns dos resultados com os resultados obtidos por Santos (2013) (Tabela 7.10). Estas argamassas são idênticas mas possuem adições de fibras naturais, constituídas por casca de arroz (FV), crina de cavalo (FA_{crina}) e fibras de lã de ovelha (FA_{lã}), em duas proporções mássicas (considerada máxima para permitir trabalhabilidade da argamassas e metade da máxima). Aqui, as setas são relativas a aumentos ou diminuições de determinada propriedade relativamente à argamassa de 10% de terra analisada na presente dissertação.

Tabela 7.10 – Comparação de resultados com Santos (2013) (provetes em suporte de tijolo, 28 dias)

| Argamassas | DS _D [Shore-A] | λ [W/m.K] | Ultra-sons [m/s] | Qt.abs.1h [ml] | C _{abs.T} [kg/(m ² .min ^{0,5})] | C _{abs.4ml} [kg/(m ² .min ^{0,5})] | Tempo _{4ml} [min] |
|-------------------------------------|---------------------------|-----------|------------------|----------------|---|---|----------------------------|
| CL3_10t(ArF)_0,5FV | ↓ | ↓ | ↓ | ↑ | ↑ | ↑ | ↓ |
| CL3_10t(ArF)_FV | ↓ | ↓ | ↓ | ↑ | ↑ | ↑ | ↓ |
| CL3_10t(ArF)_0,5FA _{crina} | ↑ | ↓ | ↓ | ↑ | ↑ | ↑ | ↓ |
| CL3_10t(ArF)_FA _{crina} | ↑ | ↓ | ↓ | ↑ | ↑ | ↑ | ↓ |
| CL3_10t(ArF)_0,5FALã | ↑ | ↑ | ↓ | ↑ | ↑ | ↑ | ↓ |
| CL3_10t(ArF)_FALã | ↑ | ↓ | ↓ | ↑ | ↑ | ↑ | ↓ |

Verifica-se que a introdução de fibras piora claramente as duas propriedades de comportamento face à água (quantidade de água absorvida e coeficiente de absorção, ambas determinadas através de tubos de Karsten). No entanto, a condutibilidade térmica sugere bastantes melhoras, com exceção à argamassa CL3_10t(ArF)_0,5FALã (que contém metade da quantidade de lã). A introdução de fibras vegetais (casca de arroz) provoca diminuição da dureza superficial, contrariamente às restantes, que provocam o aumento desta grandeza. A velocidade de propagação de ultra-sons diminui com a introdução de fibras, ou seja, a argamassa em questão fica menos compacta.

De uma forma geral, e ainda precoce (pois o estudo ainda está a decorrer), a introdução de fibras parece ser vantajosa em termos de condutibilidade térmica e dureza superficial. É de esperar que as propriedades mecânicas melhorem com a introdução de fibras.

8 Conclusões

8.1 Considerações Finais

Há um elevado património português de construções em terra, nomeadamente de taipa, adobe ou mesmo outros, como tabique e BTC. Estas construções demonstraram a sua durabilidade pois muitas delas são bastante antigas e continuam a ser habitadas. No entanto, há muitas que precisam de ser reabilitadas. A intervenção nestas construções passa também por conhecer um pouco do seu passado e da sua história, pois para um projeto de reabilitação ser bem sucedido é necessário conhecer bem as suas características, tais como os processos construtivos e os materiais utilizados. Muitos têm sido os autores a investigar as construções em terra e o que já foi possível verificar é que estas construções são mais saudáveis que o cimento e o betão e toda esta tecnologia que se faz questão em gabar.

O tema das argamassas de terra tem suscitado novamente o interesse, por parte do sector da construção civil, particularmente em países desenvolvidos. A terra apresenta diversas vantagens ao ser utilizada como material de construção, e assim sendo não deve ser desprezada e deixada apenas como testemunho do passado. As argamassas de terra e a introdução de terra em argamassas de cal aérea é um assunto interessante e que tem seguramente um futuro pela frente. Há no entanto, um longo caminho a percorrer, visto haver uma lacuna no que respeita a informações sistematizadas sobre caracterizações e comportamentos destas argamassas.

8.2 Principais Conclusões

De um modo geral, pode-se dizer que os objetivos traçados inicialmente, de contribuir para um melhor e mais sistematizado conhecimento de argamassas de cal aérea com terra, foram atingidos. Foi possível avaliar a influência que determinadas percentagens de terra argilosa têm quando introduzidas em argamassas de cal aérea. Para tal, foram realizados ensaios de caracterização dos constituintes das argamassas, ensaios de caracterização de argamassas em estado fresco e ainda ensaios em estado endurecido sobre distintos suportes. Foram ainda caracterizados os dois tipos de suportes (murete de taipa e tijolo convencional). Tendo em conta o tipo de argamassas em questão, a sua aplicação em suporte de taipa foi extremamente importante, proporcionando uma perspetiva mais real da utilização das argamassas de terra.

Estado Fresco:

Verificou-se que a consistência das argamassas estudadas diminuiu com o aumento da percentagem de terra, mas que tal não se traduziu diretamente na trabalhabilidade das argamassas nomeadamente ao serem aplicadas no murete. Este aspeto foi sendo detetado no manuseamento das argamassas nos dias das amassaduras. A capacidade de retenção de água das argamassas estudadas aumenta com o aumento do teor de argila, sendo este aspeto positivo.

Provetes Prismáticos:

As propriedades mecânicas foram determinadas apenas aos 90 dias de idade. Tanto o módulo de elasticidade dinâmico, como a resistência à compressão e tração diminuem com a introdução de terra argilosa (comparativamente com a argamassa de cal aérea).

Relativamente ao comportamento face à água verifica-se que o valor assintótico aumenta com o aumento da percentagem de terra introduzida, o que encontra explicação no facto da terra argilosa introduzida absorver maior quantidade água do que o agregado fino retirado (APAS30). O coeficiente de capilaridade diminui nas duas argamassas com 10 e 15% de terra, contrariamente às argamassas com 5 e 25% de terra, que aumentam o seu valor, sendo este último bastante superior a todos os outros. Assim, uma elevada percentagem de terra implica um aumento na velocidade de absorção de água inicial, mas tal não se verifica com percentagens mais baixas. Os resultados obtidos no ensaio de secagem permitem concluir que as argamassas possuem maior dificuldade em secar com o aumento do teor de argila (índice de secagem). A taxa de secagem diminui com o aumento da percentagem de terra.

A condutibilidade térmica determinada permite concluir que o aumento do teor de terra diminui esta propriedade, o que é benéfico. A porosidade aberta aumenta muito ligeiramente com o aumento da percentagem de argila, o que foi confirmado através de dois métodos de ensaio. A porosimetria determinada por intrusão de mercúrio demonstrou que a introdução de terra em argamassas de cal aérea provoca uma diminuição na quantidade de poros de maior diâmetro (107 µm) e um aumento na quantidade poros menores. Assim, a argamassa de referência é aquela que apresenta maior quantidade de poros de maior dimensão, menor quantidade de poros de menor dimensão e também, menor porosidade aberta. Com a introdução de 25% de terra a quantidade de poros de maior dimensão diminui aumentando a quantidade de poros de menor dimensão.

Relativamente à resistência aos sulfatos, a introdução de terra não é benéfica, uma vez que com o aumento da percentagem de terra, aumenta também a percentagem de massa perdida face à ação dos sulfatos, o que está em concordância com a redução de resistências ocorrida.

Provetes em suporte de tijolo:

A dureza superficial das argamassas não é muito afetada com a introdução de terra. No entanto, esta propriedade parece diminuir para percentagens menores de terra e aumentar com 25% de terra.

Os valores de condutibilidade térmica obtidos permitem concluir que esta propriedade genericamente aumenta nas argamassas com maior teor de terra argilosa. Relativamente à velocidade de propagação de ultra-sons, aos 28 dias esta propriedade aumenta relativamente à argamassa de referência. No entanto, aos 90 dias esta propriedade baixou em duas argamassas com a introdução de terra.

O comportamento face à água através do ensaio de absorção de água sob baixa pressão demonstrou resultados distintos em ambas as idades. Relativamente aos 28 dias, tanto o coeficiente de absorção de água como a quantidade de água absorvida diminuíram com a introdução de terra

nas argamassas, com exceção à argamassa de 15% de terra (ambos os valores aumentam relativamente à argamassa de referência). Aos 90 dias estas duas propriedades diminuem em todas as argamassas.

A quantidade de poros das argamassas quando aplicadas em tijolo aumentou ligeiramente, sendo o tamanho no mesmo diâmetro. No entanto, a argamassa de 25% de terra aumentou bastante a quantidade de poros ao ser aplicada em suporte de tijolo.

Reboco aplicado no murete de taipa:

A dureza superficial das duas argamassas aplicadas no murete de taipa não apresenta muita variação. No entanto, a argamassa de terra é mais dura do que a argamassa de referência. Também a velocidade de propagação de ultra-sons não apresenta muita variação. A argamassa de referência tem maiores velocidades, querendo isto dizer que é mais compacta.

Relativamente ao comportamento face à água, a argamassa de terra apresenta piores valores, absorvendo maior quantidade de água e mais rapidamente. A porosimetria analisada da zona inferior e superior do murete apresentou diferenças, sendo que a primeira apresenta mais poros e maior porosidade aberta do que a segunda, tanto para a argamassa de referência como para a argamassa de terra. Ambos os rebocos aplicados no murete não apresentaram fissuração visível até cerca dos 6 meses de idade e o reboco com terra apresenta uma coloração esteticamente interessante, como se tivesse sido propositadamente pigmentado com coloração castanho muito claro.

Resumindo, a introdução de terra em argamassas convencionais de cal aérea promove a melhorias de determinadas propriedades das quais se podem distinguir: capacidade de retenção de água, condutibilidade térmica, módulo de elasticidade dinâmico e dureza superficial. Por outro lado, a introdução de terra piora o comportamento face à água, as resistências mecânicas (tração e compressão) e também as resistências aos sulfatos. Nessa ordem de ideias, estas propriedades podem vir a ser melhoradas/corrigidas em formulações analisadas em trabalhos futuros.

Parte dos resultados obtidos neste estudo foram apresentados em poster do 2º CIHEL – Congresso Internacional da Habitação no Espaço Lusófono intitulado “*Vantagens da utilização de terra argilosa e fibras naturais em argamassas de cal aérea*” (Faria et al. 2013a) (Anexo A.11.). Outra parte dos resultados constam no artigo “*Evaluation of air lime and clayish earth mortars for earthen wall renders*” (Faria et al. 2013b) aceite para apresentação no congresso CIAV2013 - International Conference on Vernacular Architecture) (Anexo A.11.).

Em conjunto com resultados da dissertação de Jamú (2013) estão a ser realizados dois artigos para submissão a revista científica internacional.

8.3 Propostas de Desenvolvimento Futuro

Com o objetivo de otimizar os resultados obtidos na presente dissertação sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Realizar a substituição da terra argilosa na parcela de agregado com maior dimensão ou ainda no agregado intermédio, por forma a averiguar se a substituição de terra nestas parcelas são mais benéficas ou não.
- Adicionar (e não substituir) a terra argilosa em argamassas de cal aérea.
- Analisar o envelhecimento natural ou artificial das argamassas em questão. Realizar ensaios de caracterização a idades mais avançadas como por exemplo, 180 dias, 1 ano ou mais.
- Diversificar as percentagens de terra introduzidas nas argamassas de cal aérea. Analisar o comportamento deste tipo de argamassas perante diferentes ambientes de cura laboratoriais, pois neste estudo apenas se considerou a cura em ambiente controlado com aspersão inicial.
- Realização de ensaios complementares do presente estudo, como por exemplo: determinação da permeabilidade ao vapor de água, análise das propriedades acústicas das argamassas de terra e avaliação do comportamento higroscópico. No reboco aplicado no murete de taipa podem ainda ser determinadas outras propriedades além das obtidas na presente dissertação, tais como: propriedades mecânicas, condutibilidade térmica, teor de sais, aderência ao suporte e capacidade de secagem. Também deveria ser analisada a humidade relativa no interior do murete de taipa.

Bibliografia

- Angulo-Ibañez, Q.; Mas-Tomás, Á.; Galvañ-Llopis, V.; Sántolaria-Montesinos, J. (2012) - *Traditional braces of earth constructions*, Construction and Building Materials, Vol. 30, 389-399.
- Arizzi, A.; Cultrone, G. (2012) - *Aerial lime-based mortars blended with a pozzolanic additive and different admixtures*, Construction and Building Materials, Vol. 31, 135-143.
- ASTM Standards (2000) – *Standard test method for rubber property – durometer hardness*. United States. ASTM D2240-00.
- ASTM Standards (2008) – *Standard test method for rebound hammer of hardened concrete*. United States. ASTM C805-08.
- Aymerich, F.; Fenu, L.; Meloni, P. (2011) - *Effect of reinforcing wool fibres on fracture and energy absorption properties*, Construction and Building Materials, Vol. 27, 66–72.
- Azeredo, G.; Morel, J.; Lamarque, C. (2008) - *Applicability of rheometers to characterizing earth mortar*, Materials and Structures, Vol. 41, 1465–1472.
- Bestraten, S.; Hormías, E.; Altemin, A. (2011) - *Construcción con tierra en el siglo XXI*, Informes de la construcción, Vol. 63, (523), 5-20.
- Binici, H.; Aksigan, O.; Shah, T. (2005) - *Investigation of fibre reinforced mud brick as building material*, Construction and Building Materials, Vol. 18, 313-318.
- Bouhicha, M.; Aouissi, F.; Kenai, S. (2005) - *Performance of composite soil reinforced with barley straw*, Cement & Concrete Composites, Vol. 27, 617–621.
- Bouwens, D. (2005) - *Edifícios de Terra e a sua Reparação*, www.buildingconservation.com, consultado em 11/10/2012.
- Branco, T. (2013) – *Evolução e comparação das características de argamassas de cal aérea com adição de metacaulino*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Construção, Universidade Nova de Lisboa.
- Bruno, P. (2007) – *Arquitetura de terra na pré-história – Vestígios de estruturas habitacionais, do VI ao II milénio a.C., no Sul de Portugal*, In *Arquitetura de Terra em Portugal*.
- Bruno, P.; Faria, P.; Candeias, A.; Mirão, J. (2010) - *Earth mortars from pre-historic habitat settlements in south Portugal, Case studies*, J Iberian Archaeology.
- Cai, Y.; Shi, B.; Charles, N.; Tang, C. (2006) - *Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil*, Engineering and Geology, Vol 27, 230-240.
- Carvalho, J.; Pinto, J.; Varum, J.; Jesus, A.; Lousada, J.; Morais, J. (2008) - *Construções em Tábique na Região de Trás-os-Montes e Alto Douro*, CINPAR 2008 4th International Conference on Structural Defects and Repair (CD-ROM).
- Castilla, F.J. (2011) - *Revestimientos y acabados superficiales en construcciones con tierra contemporáneas*, Informes de la Construcción, Vol. 63, (523), 143-152.
- CEN (Comité Européen De Normalisation) (1998a) – *Methods of test for mortars for masonry. Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*. Brussels. EN 1015-2: 1998.

- CEN (1998b) – *Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar*. Brussels. EN 1015-6:1998.
- CEN (1998c) – *Methods of test for mortar for masonry - Part 7: Determination of air content of fresh mortar*. Brussels. EN 1015-7:1998.
- CEN (1999a) – *Methods of test for mortar for masonry. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. Brussels. EN 1015-3:1999.
- CEN (1999b) – *Methods of test for mortar for masonry - Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar*. Brussels. EN 1015-10:1999.
- CEN (1999c) – *Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. Brussels. EN 1015-11: 1999.
- CEN (2002) – *Methods of test for mortars for masonry. Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*. Brussels. EN 1015-18:2002.
- CEN (1999) - draft European Standard, *Methods of test for mortar for masonry – Part 8: Determination of water retentivity of fresh mortar*. prEN 1015-8.
- CEN (2009) – *Conservation of cultural property. Test methods. Determination of water absorption by capillarity*. Brussels. EN 15801.
- CEN (2010) – *Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar*. Brussels. EN 998-1.
- Ciano, D.; Jaquin, P. (2011) - *An overview of some current recommendations on the suitability of soils for rammed earth*, International Workshop on Rammed Earth Materials and Sustainable Structures & Hakka Tulou Forum 2011: Structures of Sustainability at International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering
- Cid, J.; Mazarron, F.R.; Canas, I. (2011) - *Las normativas de construcción con tierra en el mundo*, Informes de la construcción, Vol 63, (523), 159-169.
- Correia, M. (2007) - *Teoría de la conservación y su aplicación al patrimonio en tierra*, APUNTES, Vol. 20, (2), 202-219.
- Degirmenci, N.; Baradan, B. (2005) - *Chemical resistance of pozzolanic plaster for earthen walls*, Construction and Building Materials, Vol. 19, 536-542.
- Delgado, M.; Guerrero, I. (2006) - *Earth building in Spain*, Construction and Building Materials, Vol. 20, 679-690.
- Delgado, M.; Guerrero, I. (2007) - *The selection of soils for unstabilised earth building - A normative review*, Construction and Building Materials, Vol. 21, 237-251.
- Eires, B.; Jalali, S. (2007) – *Blocos de Terra comprimidos de elevado desempenho utilizando misturas de metacaulino – cal*, Terra em seminário, V Seminário de Arquitetura de Terra em Portugal, 89-90.
- Faria, P. (2003) – *Estudo comparativo de diferentes argamassas tradicionais de cal aérea e areia*, In PATORREB 2003 – 1º Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, Porto, FEUP, Março 2003, 207-216.

- Faria, P. (2004a) – *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Reabilitação do Património Edificado, Universidade Nova de Lisboa.
- Faria, P. (2004b) - *Construções em terra crua. Tecnologias, potencialidades e patologias*, Forum Museológico do Distrito de Setúbal e Museu de Arqueologia e Etnografia do Distrito de Setúbal. Revista MUSA, nº2 (Junho 2007), 149-155.
- Faria, P. (2004c) – *Paredes de terra crua. Condicionantes associadas aos seus revestimentos*, Pedra&Cal, Vol. 24, 14-15.
- Faria, P.; Henriques, F. (2004) - *Current Mortars in Conservation An Overview*, International Journal for Restoration, Vol. 10, (6), 609-622.
- Faria, P. (2005) - *Revestimentos de paredes de terra crua, Rendering of raw earth walls*. In Arquitectura de Terra em Portugal Earth Architecture in Portugal (M.Fernandes, M.Correia, eds.). Lisboa, Argumentum, 2005, 68-73.
- Faria, P.; Henriques, F.; Rato, V. (2007) - *Argamassas Correntes. Influência do Tipo de Ligante e do Agregado*, 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Lisboa, APFAC.
- Faria, P.; Henriques, F.; Rato, V. (2008) - *Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation*, Journal of Cultural Heritage, Vol. 9, 338–346.
- Faria, P. (2009) – *Resistance to salts of lime and pozzolan mortars*, Workshop Repair Mortar for Historic Masonry, C. Groot, 99-110.
- Faria, P. (2011) - *PROJECTO FCTMETACAL - Procedimentos de ensaio de argamassas*, Departamento Engenharia Civil, FCT-UNL.
- Faria, P.; Silva, V.; Dias, I.; Jamu, N.; Santos, P. (2013a) – *Vantagens da utilização de terra argilosa e fibras naturais em argamassas de cal aérea*, 2º CIHEL - Congresso Internacional da Habitação no Espaço Lusófono, Lisboa, LNEC, 13-15 Março 2013 (resumo e poster), 363.
- Faria, P.; Jamú, N.; Dias, I.; Silva, V.; Gomes, I. (2013b) – *Evaluation o air lime-clay based mortars for earthen walls*. CIAV2013 – International Conference on Vernacular Aechitecture, 7º ATP, VerSus. Vila Nova de Cerveira, 16-20 October 2013 (aceite para publicação).
- Fernandes, M. (2008) - *Earth mortars and earth-lime renders*, Conservar Património, Vol. 8, 21-27.
- Fernandes, M. (2012) - *Interventions in Portuguese rammed earth architecture - from ignorance to good practices*, RESTAPIA2012, Rammed Earth Conservation, 309-314. (CD-rom).
- Fernandes, M.; Mirão, J.; Velosa, A.; Candeias, A. (2012) - *Estabilización de tierra com cal – ventajas y desventajas*, TERRA 2012 - XI Conferencia Internacional sobre el Estudio y Conservación del Patrimonio Arquitectónico de Tierra, Comité Científico Internacional del Patrimonio en Tierra (ICOMOS/ISCEAH) e Pontificia Universidad Católica del Perú, 11 p.
- Galán-Marín, C.; Rivera-Gómez, C.; Petric, J. (2010) - *Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre*, Construction and Building Materials, Vol. 24, 1462-1468.
- Ghavammi, K.; Filho, R.; Barbosa, N.; (1999) - *Behavior of composite soil reinforced with natural fibres*, Cement and concrete composites, Vol. 21, 39-48.

- Gomes, M.I.; Faria, P. (2011) - *Repair Mortars for Rammed Earth Constructions*, International Conference on Durability of Building Materials and Components Porto-Portugal.
- Gomes, M.I.; Faria, P.; Gonçalves, T.D. (2009) - *Construções de Terra, Causas de degradações*; In Conf. Internacional PATORREB, FEUP, 205-210.
- Gomes, M.I.; Gonçalves, T.; Faria, P. (2012a) - *Análise experimental de argamassas de terra com cais e fibras naturais*, 4º Cong.Port.Argamassas, Univ.Coimbra, Paper 38.
- Gomes, M.I.; Gonçalves, T.; Faria, P. (2012b) - *Earth-based repair mortars Experimental analysis with different binders and natural fibres*, Rammed Earth Conservation, 661-668.
- Gomes, M.I.; Gonçalves, T.; Faria, P. (2012c) - *Avaliação da influencia do teor de água na trabalhabilidade de argamassas de terra*, APFAC, Paper 2038.
- Gomes, M.I.; Gonçalves, T.D.; Faria, P. (2012d) - *Unstabilised rammed earth-characterization of the material collected from old constructions in south Portugal and comparison to normative requirements*, International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration (aceite on-line em Abril 2012).
- Goodhew, S.; Griffiths, R.; (2005) - *Sustainable earth walls to meet the building regulations*, Energy and Buildings, Vol. 37, 451–459.
- Groot, C. (2012) - *Repair mortars for historic masonry. Performance requirements for renders and plasters*, Materials and Structures, Vol. 45, 1277–1285.
- Guerrieri, C. (2012) - *Characterization of compressed earth blocks built with natural low-cost energy stabilizers*, RESTAPIA 2012, 125-130.
- Guimaraens, G.; Noguera, J. F.; Navalón, V. (2012) - *Earth and gunpowder. The earth in the modern fortresses*, RESTAPIA 2012, 533-538.
- Hall, M.; Djerbib, Y. (2004) - *Rammed earth sample production context, recommendations and consistency*, Construction and Building Materials, Vol. 18, 281-286.
- Hejazi, S. M.; Sheikhzadeh, M.; Abtahi, S.; Zadhoush, A. (2012) - *A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers*, Construction and Building Materials, Vol. 30, 100–116.
- Henriques, F. (1991) - *A conservação do património histórico edificado*, Memória LNEC nº 775.
- Henriques, F. (2007) - *Comportamento higrotérmico de Edifícios*. DEC-FCT-UNL.
- Henriques, F.; Faria, P. (2006) - *Argamassas de substituição na conservação do património*, Construção Magazine, Vol. 16, 38-45.
- Henriques, F.; Faria, P. (2008) - *O papel da investigação no estudo das argamassas de substituição na conservação do património*, Revista Engenharia Civil – Universidade do Minho, Vol. 31, 29-37.
- Instituto Português da Qualidade (IPQ) (2000a) - *Ensaios para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 3: Método para determinação da massa volúmica e dos vazios*. Caparica. NP EN 1097-3:2000.
- IPQ (2000b) - *Ensaios das propriedades geométricas dos agregados – Parte 1: Método de Peneiração*. Caparica. NP EN 933-1:2000.

- IPQ (2001) – *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à cristalização de sais*. Caparica. NP EN 12370:2001.
- IPQ (2007) – *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental)*. Caparica. NP EN 14146:2006.
- IPQ (2008) – *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta*. Caparica. NP EN 1936:2008.
- IPQ (2011) – *Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade*. Caparica. NP EN 459-1: 2011.
- Jamú, N. (2013) - *Desenvolvimento e caracterização de argamassas de cal aérea e terra: A influência da terra como ligante*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Construção, Universidade Nova de Lisboa.
- Jové, F.; Díaz-Pinés, F.; Sáinz Guerra, J. S.; Olmos, P. (2012) - *Rammed earth wall restoration method using the earth reintegration*, RESTAPIA 2012, 363-368.
- Lima, J. (2013) - *O contributo das argamassas de barro para a qualidade do ambiente interior dos edifícios, O caso das argilas do sotavento algarvio*, 2º CIHEL, Congresso Internacional de Habitação no Espaço Lusófono (CD-rom).
- LNEC (2002) – *Ficha de ensaio para revestimentos de paredes – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão*. Lisboa. FE Pa 39.
- LNEC (2010) – *Ficha de ensaio para revestimentos de paredes – Ensaio de avaliação de características mecânicas por ultra-sons*. Lisboa. FE Pa 43.
- Lourenço, P.; Brito, J.; Branco, F. (2001) - *Novas tecnologias na aplicação de terra crua na construção*, Companhia de arquitetura e design, CONSTRUÇÃO 2001 - Congresso Nacional da Construção, 513-550.
- Margalha, M. (2011) – *Argamassas*, Documento de apoio às aulas de Conservação e Recuperação do Património, Universidade de Évora.
- Mateus, L. (2005) – *Caracterização de revestimentos usados em construções de taipa no barlavento Algarvio*, Dissertação de mestrado integrado em construção, Instituto superior técnico.
- Mattone, M.; Bignamini, E. (2012) - *Conservation of earthen constructions-Earth-gypsum plaster*, RESTAPIA 2012, 687-691.
- Minke, G. (2000) - *Earth Construction Handbook*; The building material earth in modern architecture, WITpress.
- Minke, G. (2006) – *Building with earth, Design and technology of a Sustainable Architecture*, Birkhäuser.
- Minke, G. (2011) - *Shrinkage, abrasion, erosion and sorption of clay plasters*, Informes de la Construcción, Vol. 63, (532), 153-158.
- Moropoulou, A.; Bakolas, A.; Moundoulas, P.; Aggelakopoulou, E.; Anagnostopoulou, S.; (2005) - *Strength development and lime reaction in mortars for repairing historic masonries*, Cement & Concrete Composites, Vol. 2, 289–294.

- Moropoulou, A.; Biscontin, G; Bakolas, A.; Bisbikou, K. (1997) - *Technology and behavior of rubble masonry*, Construction and Building Materials, Vol.11, 119-129.
- Muntohar, A. (2011) - *Engineering characteristics of the compressed-stabilized earth brick*, Construction and Building Materials, Vol. 25, 4215–4220.
- Ngowil, Alfred B. (1997) - *Improving the traditional earth construction a case study of Botswana*, Construction and Building Materials, Vol .11 (1), 1-7.
- Pagliolico, S.L. (2010) - *Physicochemical and mineralogical characterization of earth for building in North West Italy*, Applied Clay Science, Vol. 50, 439–454.
- Pang, M.; Yang, S.; Zhang, Y. (2011) - *Experimental study of cement mortar - steel fiber reinforced rammed earth wall*, International Workshop on Rammed Earth Materials and Sustainable Structures & Hakka Tulou Forum 2011: Structures of Sustainability at International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering.
- Pascoal, P. (2012) - *Estudo de Produtos para Conservação de Revestimentos Antigos - Consolidação e Reintegração Cromática*, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil.
- Pavlík, Z.; Benešová, H.; Matiašovský, P.; Pavlíková, M. (2012) - *Study on Carbonation Process of Several Types of Advanced Lime-Based Plasters*, World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 70, 1005-1009.
- Piattoni, Q.; Quagliarini, E.; Lenci, S. (2011) - *Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of earthen bricks*, Construction and Building Materials, Vol. 25, 2067-2075.
- Pina dos Santos, C.; Matias, L. (2006) - *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envoltura dos Edifícios - ITE 50*, LNEC, Lisboa.
- Pittaluga, D. (2012) - *Earth bricks architecture: For a conservation of stratigraphical traces*, RESTA-PIA 2012, 699-703.
- Prabakara, J.; Sridhar, R.S. (2002) - *Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil*, Construction and Building Materials, Vol. 16, 123–131.
- Prabakar, J.; Dendorkar, N.; Morchhalec, R.K. (2004) - *Influence of fly ash on strength behavior of typical soils*, Construction and Building Materials, Vol.18, 263–267.
- Quagliarini, E; Lenci, S. (2010) - *The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks*, Journal of Cultural Heritage, Vol. 11, 309–314.
- Rato, V. (2006) – *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Reabilitação do Património Edificado, Universidade Nova de Lisboa.
- RILEM (1980a) – *Water absorption under low pressure. Pipe method. Test n.ºII.4. Recommendations provisoires*. Paris.
- RILEM (1980b) – *Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. Test nº II.5 – Evaporation curve*. Materials & Structures, 13, 204-207.

- Rodríguez, M.A., Monteagudo, I., Saroza, B., Nolasco, P., Castro, Y. (2011) - *Aproximación a la patología presentada*, Informes de la Construcción; Vol. 63, (523), 97-106.
- Santos, P. (2013) – *Argamassas de cal aérea e argila – Influência do traço e tipo de fibra natural*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Construção, Universidade Nova de Lisboa (em fase de elaboração).
- Silveira, D.; Varum, H.; Costa, A.; Martins, T.; Pereira, H.; Almeida, J. (2012) - *Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions*, Construction and Building Materials, Vol. 28, 36–44.
- Sükrü, Y.; Çavdar, O.; Çavdar, A. (2008) - *The effects of the fiber contents on the mechanic properties of adobes*, Construction and Building Materials, Vol. 22, 222-227.
- Torres, C. (2005) - *Arquitectura de Terra em Portugal, Introdução. A memória da terra*; Argumentum, 12-14.
- Varum, H.; Costa, A.; Velosa, A.; Martins, T.; Pereira, H.; Almeida, J. (2005) - *Caracterização mecânica e patológica das construções em Adobe no distrito de Aveiro como suporte em intervenções de reabilitação*, Education and Culture Program: Culture 2000, Le case e le città della terra cruda conservazione, significato e decoro urbano, Painel 2: Análise e patologias.
- Veiga, M. R. (2003) – *As argamassas na conservação*. Actas das 1^{as} Jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Coleção Comunicações, LNEC, Lisboa.
- Veiga, M. R.; Velosa, A.; Magalhães, A. (2009) - *Experimental applications of mortars with pozzolanic additions*, Construction and Building Materials, Vol 23, 318-327.
- Veiga, M. R.; Fragata, A.; Velosa, A.; Magalhães, A.; Margalha, G. (2010) - *Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings*, International Journal of Architectural Heritage, Vol. 4, 177–195.
- http://www.syngenta.com/country/pt/pt/informacao_e_servicos/metereologia/Pages/Metereologia.aspx

Anexos

A.1. Organização dos ensaios realizados

| | Ensaio | Idade (dias) | Tipo de provete | Nº de provetes por traço | Nº de argamassas | Nº total de provetes ensaiados |
|-------------------|--|--------------|-----------------|--------------------------|------------------|--------------------------------|
| Estado fresco | Consistência por espalhamento | 0 | Fresco | 4 | 5 | 20 |
| | Teor em ar | 0 | Fresco | 2 | 5 | 10 |
| | Retenção de água | 0 | Fresco | 2 | 5 | 10 |
| | Massa volúmica | 0 | Fresco | 2 | 5 | 10 |
| Estado endurecido | Velocidade de propagação de ultra-sons | 28/90 | Tijolo | 1 | 5 | 5 |
| | Condutibilidade térmica | 28/90 | Tijolo | 1 | 5 | 5 |
| | Dureza superficial - Durómetro | 28/131 | Tijolo | 1 | 5 | 5 |
| | Absorção de água sob baixa pressão | 28/90 | Tijolo | 1 | 5 | 5 |
| | Porosimetria de mercúrio | 90 | Tijolo | 1 | 5 | 5 |
| | Módulo de elasticidade dinâmico | 90 | Prismas | 3 | 5 | 15 |
| | Resistência à tração por flexão | 90 | Prismas | 3 | 5 | 15 |
| | Resistência à compressão | 90 | Prismas | 3 | 5 | 15 |
| | Absorção de água por capilaridade | 90 | Prismas | 3 | 5 | 15 |
| | Secagem | 90 | Prismas | 3 | 5 | 15 |
| | Porosidade aberta e massa volúmica | 90 | Prismas | 3 | 5 | 15 |
| | Condutibilidade térmica | 90 | Prismas | 3 | 5 | 15 |
| | Porosimetria de mercúrio | 90 | Prismas | 1 | 5 | 5 |
| | Resistência aos sulfatos | 90 | Prismas | 3 | 5 | 15 |
| | Variações dimensionais | 7/28/90 | Prismas | 45 | 5 | 225 |
| | Absorção de água sob baixa pressão | 90 | Reboco | 1 | 2 | 2 |
| | Dureza superficial – Esclerómetro | 90 | Reboco | 1 | 2 | 2 |
| | Velocidade de propagação de ultra-sons | 90 | Reboco | 1 | 2 | 2 |
| | Dureza superficial - Durómetro | 76 | Reboco | 1 | 2 | 2 |
| | Porosimetria de mercúrio | 118 | Reboco | 2 | 2 | 4 |

A.2. Dados meteorológicos

Dias posteriores à aplicação do reboco e dia anteriores aos 90 dias no murete de taipa (recolhidos através do site:

http://www.syngenta.com/country/pt/pt/informacao_e_servicos/metereologia/Pages/Metereologia.aspx)

| Horas | Temperatura mínima (°C) | | | Temperatura máxima (°C) | | | Risco de precipitação (%) | | | Precipitação (mm) | | | Humidade relativa (%) | | | Direção do vento | | | Velocidade do vento (m/s) | | |
|-------------------------------|-------------------------|------|------|-------------------------|------|------|---------------------------|------|------|-------------------|------|------|-----------------------|------|------|------------------|------|------|---------------------------|------|------|
| | 0-8 | 8-16 | 16-0 | 0-8 | 8-16 | 16-0 | 0-8 | 8-16 | 16-0 | 0-8 | 8-16 | 16-0 | 0-8 | 8-16 | 16-0 | 0-8 | 8-16 | 16-0 | 0-8 | 8-16 | 16-0 |
| Aplicação de reboco: 18/12/13 | 12 | 14 | 14 | 14 | 16 | 16 | 40 | 45 | 45 | 0 | 0 | 0 | 99 | 95 | 94 | S | SE | S | 5 | 8 | 9 |
| 19/12/2013 | 13 | 14 | 14 | 14 | 16 | 15 | 40 | 45 | 70 | 0 | 0 | 1,5 | 97 | 92 | 93 | S | S | S | 5 | 13 | 17 |
| 20/12/2013 | 12 | 12 | 13 | 16 | 17 | 16 | 70 | 20 | 5 | 0,5 | 0 | 0 | 98 | 88 | 90 | O | SO | S | 12 | 8 | 12 |
| 21/12/2013 | 12 | 14 | 13 | 15 | 17 | 17 | 5 | 5 | 10 | 0 | 0 | 0 | 98 | 94 | 89 | SO | SO | S | 9 | 7 | 6 |
| 22/12/2013 | 11 | 12 | 13 | 12 | 16 | 16 | 15 | 10 | 15 | 0 | 0 | 0 | 99 | 95 | 91 | E | NE | SE | 6 | 8 | 4 |
| 23/12/2013 | 10 | 11 | 14 | 13 | 18 | 17 | 10 | 10 | 20 | 0 | 0 | 0 | 96 | 92 | 91 | NE | SE | S | 5 | 5 | 15 |
| 15/03/2013 | 5 | 7 | 10 | 8 | 15 | 14 | 10 | 30 | 60 | 0 | 0 | 0,3 | 88 | 67 | 68 | E | E | S | 9 | 9 | 6 |
| 16/03/2013 | 8 | 10 | 14 | 10 | 17 | 15 | 40 | 40 | 80 | 0 | 0 | 2,2 | 87 | 77 | 89 | E | S | S | 9 | 22 | 22 |
| 17/03/2013 | 13 | 13 | 14 | 14 | 16 | 16 | 70 | 80 | 40 | 5,1 | 5,4 | 0 | 94 | 89 | 76 | S | O | NO | 18 | 16 | 17 |
| 90 Dias: 18/032013 | 10 | 12 | 9 | 11 | 16 | 16 | 10 | 20 | 10 | 0 | 0 | 0 | 79 | 63 | 66 | NO | NO | NO | 15 | 19 | 16 |

A.3. Valores detalhados de caracterização dos suportes

- Tijolo

Absorção de água sob baixa Pressão: Tubos de Karsten

| Tempo [minutos] | Quantidade de água absorvida [ml] | | | | |
|-----------------|-----------------------------------|--------|--------|-------------|------|
| | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 | Média | DP |
| 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 0,40 | 0,60 | 0,20 | 0,40 | 0,16 |
| 10 | 0,70 | 0,90 | 0,50 | 0,70 | 0,16 |
| 15 | 0,90 | 1,20 | 0,70 | 0,93 | 0,21 |
| 30 | 1,50 | 1,80 | 1,40 | 1,57 | 0,17 |
| 60 | 2,50 | 2,90 | 2,30 | 2,57 | 0,25 |

- Murete de taipa

Dureza superficial - durómetro (DS_D)

| Pontos do murete | DS_D [graus shore-A] |
|------------------|------------------------|
| A | 55 |
| B | 74 |
| C | 73 |
| D | 65 |
| E | 88 |
| F | 94 |
| G | 65 |
| H | 59 |
| I | 78 |
| J | 64 |
| Média | 71,5 |
| DP | 11,8 |

Dureza superficial - esclerómetro pendular (DS_E)

| Pontos do murete | DS_E [escala Vickers] |
|------------------|-------------------------|
| A | 78 |
| B | 91 |
| C | 82 |
| D | 83 |
| E | 87 |
| F | 85 |
| G | 86 |
| H | 90 |
| I | 83 |
| J | 92 |
| K | 101 |
| L | 84 |
| Média | 87 |
| DP | 6 |

Condutibilidade térmica: λ

| Pontos do murete | λ [W/m.K] |
|------------------|-------------------|
| A | 1,680 |
| B | 1,770 |
| C | 1,210 |
| D | 0,936 |
| E | 0,953 |
| F | 1,110 |
| G | 1,160 |
| H | 1,020 |
| I | 1,040 |
| J | 1,300 |
| K | 0,834 |
| L | 1,680 |
| M | 1,090 |
| N | 1,040 |
| O | 1,000 |
| P | 2,060 |
| Média | 1,243 |
| DP | 0,346 |

Absorção de água sob baixa pressão: Tubos de Karsten

| Tempo para absorver 4 ml | | | | | $C_{\text{abs.5min}}$ [kg/(m ² .min ^{0,5})] |
|--------------------------|----------|---------|--|---|---|
| Tubos | Segundos | Minutos | $C_{\text{abs.4ml}}$ [kg/(m ² .min ^{0,5})] | Média [kg/(m ² .min ^{0,5})] | |
| Tubo 1 | 32 | 0,53 | 11,51 | 8,25 | 22,18 |
| Tubo 2 | 30 | 0,50 | 11,39 | | - |
| Tubo 3 | 93 | 1,55 | 6,76 | | 11,20 |
| Tubo 4 | 344 | 5,73 | 3,34 | | 3,22 |
| Tubo 5 | 171 | 2,85 | 4,86 | 6,13 | 5,60 |
| Tubo 6 | 74 | 1,23 | 8,04 | | 10,18 |
| Tubo 7 | 67 | 1,12 | 7,96 | | 13,73 |
| Tubo 8 | 355 | 5,92 | 3,66 | | 3,49 |

A.4. Valores detalhados de caracterização da terra argilosa

- Resultados obtidos na análise granulométrica (foram utilizadas três amostras)

| Peneiro | Malha [mm] | %1 Retida | %2 Retida | %3 Retida | % Média retida | % Passada acumulada |
|---------|------------|-----------|-----------|-----------|----------------|---------------------|
| 4 | 4,750 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 8 | 2,360 | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 99,98 |
| 16 | 1,180 | 21,82 | 25,96 | 24,03 | 23,94 | 75,88 |
| 30 | 0,600 | 23,38 | 26,84 | 30,19 | 26,80 | 48,89 |
| 35 | 0,500 | 6,61 | 6,26 | 5,83 | 6,24 | 42,61 |
| 40 | 0,425 | 5,11 | 4,85 | 3,50 | 4,49 | 38,10 |
| 45 | 0,355 | 5,02 | 5,74 | 5,68 | 5,48 | 32,58 |
| 50 | 0,300 | 5,20 | 4,49 | 4,73 | 4,81 | 27,74 |
| 60 | 0,250 | 5,75 | 5,33 | 2,89 | 4,65 | 23,05 |
| 70 | 0,212 | 5,01 | 4,79 | 5,49 | 5,10 | 17,92 |
| 80 | 0,180 | 8,89 | 8,31 | 7,27 | 8,16 | 9,70 |
| 100 | 0,150 | 0,96 | 0,99 | 0,99 | 0,98 | 8,71 |
| 120 | 0,125 | 6,13 | 3,57 | 5,09 | 4,93 | 3,75 |
| 140 | 0,106 | 2,44 | 1,44 | 1,34 | 1,74 | 2,00 |
| 170 | 0,090 | 1,93 | 0,43 | 0,75 | 1,04 | 0,95 |
| 200 | 0,075 | 0,78 | 0,26 | 0,24 | 0,43 | 0,52 |
| 230 | 0,063 | 0,47 | 0,12 | 0,63 | 0,40 | 0,12 |
| 270 | 0,053 | 0,00 | 0,00 | 0,35 | 0,12 | 0,00 |
| 325 | 0,045 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 400 | 0,038 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

A.5. Valores detalhados da caracterização das argamassas em estado fresco

- Consistência por espalhamento

| Argamassas | Consistência por espalhamento [mm] | | | | | Média | DP |
|--------------|------------------------------------|-----|---------|-----|--------|-------|----|
| | 1ª Fase | | 2ª Fase | | | | |
| CL3 | 154 | 153 | 149 | 152 | 152,63 | 2,74 | |
| | 156 | 156 | 153 | 148 | | | |
| CL3_5t(ArF) | 148 | 142 | 164 | 158 | 153,50 | 7,53 | |
| | 150 | 146 | 162 | 158 | | | |
| CL3_10t(ArF) | 150 | 147 | 147 | 147 | 149,13 | 2,03 | |
| | 152 | 150 | 148 | 152 | | | |
| CL3_15t(ArF) | 143 | 144 | 155 | 156 | 149,88 | 5,09 | |
| | 150 | 144 | 153 | 154 | | | |
| CL3_25t(ArF) | 146 | 144 | 148 | 150 | 146,13 | 1,90 | |
| | 145 | 146 | 146 | 144 | | | |

- Teor em ar

| Argamassas | Teor em ar [%] | | | |
|--------------|----------------|---------|-------|-----|
| | 1ª Fase | 2ª Fase | Média | DP |
| CL3 | 4,50 | 4,00 | 4,25 | 0,3 |
| CL3_5t(ArF) | 4,30 | 3,90 | 4,10 | 0,2 |
| CL3_10t(ArF) | 4,00 | 5,20 | 4,60 | 0,6 |
| CL3_15t(ArF) | 4,20 | 4,20 | 4,20 | 0,0 |
| CL3_25t(ArF) | 3,80 | 3,40 | 3,60 | 0,2 |

- Retenção de água

| Argamassas | Retenção de água - 1ª Fase | | | | | |
|--------------|----------------------------|--------|---------|--------|--------|-------------------------------|
| | ag [g] | mf [g] | mc [g] | mh [g] | ma [g] | Quantidade de água retida [%] |
| CL3 | 975 | 6,434 | 897,895 | 16,173 | 65,382 | 85,1 |
| CL3_5t(ArF) | 1000 | 6,349 | 899,79 | 14,954 | 67,095 | 87,2 |
| CL3_10t(ArF) | 1000 | 6,354 | 897,639 | 13,023 | 66,729 | 90,0 |
| CL3_15t(ArF) | 1000 | 6,294 | 901,61 | 12,592 | 67,405 | 90,7 |
| CL3_25t(ArF) | 1075 | 6,347 | 898,47 | 12,074 | 70,978 | 91,9 |

| Argamassas | Retenção de água - 2ª Fase | | | | | |
|--------------|----------------------------|--------|---------|--------|--------|-------------------------------|
| | ag [g] | mf [g] | mc [g] | mh [g] | ma [g] | Quantidade de água retida [%] |
| CL3 | 975 | 6,329 | 908,37 | 16,327 | 67,130 | 85,1 |
| CL3_5t(ArF) | 1000 | 6,348 | 909,582 | 16,015 | 68,764 | 85,9 |
| CL3_10t(ArF) | 1000 | 6,296 | 901,333 | 13,432 | 67,358 | 89,4 |
| CL3_15t(ArF) | 1000 | 6,299 | 901,603 | 11,244 | 67,404 | 92,7 |
| CL3_25t(ArF) | 1075 | 6,290 | 895,990 | 11,514 | 70,530 | 92,6 |

- Massa volúmica

| Argamassas | Massa volúmica – 1ª Fase | | | | | |
|--------------|--------------------------|-------------|------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|
| | M copo + argamassa [kg] | M copo [kg] | M argamassa [kg] | V copo [dm ³] | Mv [kg/dm ³] | Mv [kg/m ³] |
| CL3 | 3,091 | 1,123 | 1,967 | 1 | 1,967 | 1967,30 |
| CL3_5t(ArF) | 3,088 | 1,123 | 1,965 | 1 | 1,965 | 1965,20 |
| CL3_10t(ArF) | 3,062 | 1,123 | 1,939 | 1 | 1,939 | 1938,50 |
| CL3_15t(ArF) | 3,069 | 1,123 | 1,946 | 1 | 1,946 | 1945,90 |
| CL3_25t(ArF) | 3,053 | 1,123 | 1,930 | 1 | 1,930 | 1929,80 |

| Argamassas | Massa volúmica – 2ª Fase | | | | | |
|--------------|--------------------------|-------------|------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|
| | M copo + argamassa [kg] | M copo [kg] | M argamassa [kg] | V copo [dm ³] | Mv [kg/dm ³] | Mv [kg/m ³] |
| CL3 | 3,115 | 1,123 | 1,992 | 1 | 1,992 | 1992,00 |
| CL3_5t(ArF) | 3,090 | 1,123 | 1,967 | 1 | 1,967 | 1966,80 |
| CL3_10t(ArF) | 3,086 | 1,123 | 1,962 | 1 | 1,962 | 1962,30 |
| CL3_15t(ArF) | 3,072 | 1,123 | 1,949 | 1 | 1,949 | 1948,80 |
| CL3_25t(ArF) | 3,059 | 1,123 | 1,936 | 1 | 1,936 | 1935,70 |

| Argamassas | Massa volúmica [kg/m ³] | |
|---------------------|-------------------------------------|-------|
| | Média | DP |
| CL3 | 1979,65 | 12,35 |
| CL3_5t(ArF) | 1966,00 | 0,80 |
| CL3_10t(ArF) | 1950,40 | 11,90 |
| CL3_15t(ArF) | 1947,35 | 1,45 |
| CL3_25t(ArF) | 1932,75 | 2,95 |

A.6. Valores detalhados da caracterização das argamassas em estado endurecido: provetes em suporte de tijolo aos 28 dias

- Dureza superficial – durómetro (DS_D)

| Argamassa | DS _D [graus shore-A] | | | | | | | | | | Média | DP |
|---------------------|---------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | |
| CL3 | 65 | 52 | 64 | 60 | 72 | 65 | 53 | 70 | 65 | 75 | 64,10 | 7,11 |
| CL3_5t(ArF) | 50 | 60 | 58 | 50 | 70 | 70 | 65 | 70 | 64 | 62 | 61,90 | 7,16 |
| CL3_10t(ArF) | 45 | 65 | 55 | 75 | 63 | 70 | 60 | 75 | 55 | 50 | 61,30 | 9,71 |
| CL3_15t(ArF) | 70 | 45 | 70 | 40 | 65 | 80 | 60 | 70 | 55 | 65 | 62,00 | 11,66 |
| CL3_25t(ArF) | 60 | 65 | 65 | 75 | 70 | 50 | 75 | 60 | 60 | 70 | 65,00 | 7,42 |

- Condutibilidade térmica

| Argamassa | λ [W/m.K] | | | | | | Média | DP |
|---------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | |
| CL3 | 0,392 | 0,324 | 0,510 | 0,536 | 0,360 | 0,436 | 0,426 | 0,077 |
| CL3_5t(ArF) | 0,558 | 0,331 | 0,457 | 0,481 | 0,388 | 0,525 | 0,457 | 0,077 |
| CL3_10t(ArF) | 0,658 | 0,648 | 0,471 | 0,604 | 0,445 | 0,443 | 0,545 | 0,094 |
| CL3_15t(ArF) | 0,507 | 0,512 | 0,627 | 0,497 | 0,534 | 0,450 | 0,521 | 0,054 |
| CL3_25t(ArF) | 0,588 | 0,576 | 0,413 | 0,569 | 0,595 | 0,443 | 0,531 | 0,074 |

- Velocidade de propagação de ultra-sons

| Pontos | Distâncias [mm] | Distâncias [m] |
|-----------|-----------------|----------------|
| AB | 98,53 | 0,0985 |
| AC | 196,00 | 0,1960 |
| AD | 107,15 | 0,1072 |
| AE | 147,12 | 0,1471 |
| AF | 223,43 | 0,2234 |
| FB | 146,09 | 0,1461 |
| FC | 110,87 | 0,1109 |
| FD | 197,89 | 0,1979 |
| FE | 98,13 | 0,0981 |

| | | CL3 | CL3_5t(ArF) | CL3_10t(ArF) | CL3_15t(ArF) | CL3_25t(ArF) |
|-------------|------------------|----------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| AB | Tempo [s] | 7,31E-05 | 7,15E-05 | 7,12E-05 | 7,73E-05 | 6,92E-05 |
| | Velocidade [m/s] | 1347,41 | 1377,66 | 1384,00 | 1274,33 | 1424,29 |
| AC | Tempo [s] | 1,19E-04 | 1,27E-04 | 1,17E-04 | 1,21E-04 | 1,09E-04 |
| | Velocidade [m/s] | 1643,79 | 1544,90 | 1673,83 | 1621,13 | 1795,41 |
| AD | Tempo [s] | 8,66E-05 | 9,25E-05 | 8,51E-05 | 8,89E-05 | 8,95E-05 |
| | Velocidade [m/s] | 1237,69 | 1157,94 | 1258,85 | 1205,75 | 1197,42 |
| AE | Tempo [s] | 5,55E-04 | 1,06E-04 | 1,06E-04 | 1,08E-04 | 1,03E-04 |
| | Velocidade [m/s] | 265,02 | 1383,57 | 1386,46 | 1360,79 | 1423,51 |
| AF | Tempo [s] | 1,60E-04 | 1,53E-04 | 1,54E-04 | 1,66E-04 | 1,65E-04 |
| | Velocidade [m/s] | 1396,18 | 1463,26 | 1452,22 | 1344,52 | 1356,41 |
| FB | Tempo [s] | 1,04E-04 | 1,17E-04 | 1,06E-04 | 1,18E-04 | 1,01E-04 |
| | Velocidade [m/s] | 1403,48 | 1248,91 | 1375,83 | 1238,70 | 1449,19 |
| FC | Tempo [s] | 8,77E-05 | 9,51E-05 | 8,60E-05 | 9,11E-05 | 9,33E-05 |
| | Velocidade [m/s] | 1264,40 | 1165,62 | 1288,54 | 1217,57 | 1188,50 |
| FD | Tempo [s] | 1,17E-04 | 1,28E-04 | 1,17E-04 | 1,27E-04 | 1,28E-04 |
| | Velocidade [m/s] | 1692,61 | 1541,66 | 1696,12 | 1562,49 | 1548,52 |
| FE | Tempo [s] | 7,30E-05 | 7,23E-05 | 6,91E-05 | 7,37E-05 | 8,43E-05 |
| | Velocidade [m/s] | 1345,03 | 1357,67 | 1419,68 | 1330,73 | 1163,89 |
| Média [m/s] | | 1288,40 | 1360,13 | 1437,28 | 1350,67 | 1394,13 |
| DP | | 390,40 | 137,31 | 144,01 | 139,70 | 190,05 |

- Absorção de água sob baixa pressão: Tubos de Karsten

| Quantidade de água absorvida [ml] | | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|------|
| CL3 | | | | | | | | |
| Tempo [minutos] | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 | Tubo 4 | Tubo 5 | Tubo 6 | Média | DP |
| 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 11,60 | 13,20 | 10,30 | 12,50 | 12,30 | 10,50 | 11,73 | 1,05 |
| 10 | 19,60 | - | 16,80 | 19,00 | 18,40 | 18,00 | 18,36 | 0,95 |
| 15 | 23,90 | - | 23,00 | 26,30 | 25,40 | 26,20 | 24,96 | 1,30 |
| 30 | 35,10 | - | 34,60 | 41,50 | 41,40 | 37,80 | 38,08 | 2,96 |
| 60 | 57,10 | - | 52,80 | - | 66,50 | 60,40 | 59,20 | 5,00 |

| Quantidade de água absorvida [ml] | | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|-------|
| CL3_5t(ArF) | | | | | | | | |
| Tempo [minutos] | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 | Tubo 4 | Tubo 5 | Tubo 6 | Média | DP |
| 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | - | 14,50 | 7,60 | 13,10 | 9,00 | 8,60 | 10,56 | 2,72 |
| 10 | - | 24,00 | 14,60 | 19,40 | 11,30 | 12,10 | 16,28 | 4,78 |
| 15 | - | 31,40 | 20,80 | 26,30 | 18,10 | 18,00 | 22,92 | 5,20 |
| 30 | - | 46,60 | 30,70 | 40,60 | 32,00 | 25,20 | 35,02 | 7,61 |
| 60 | - | 72,10 | 45,00 | 59,80 | 52,30 | 36,10 | 53,06 | 12,34 |

| Quantidade de água absorvida [ml] | | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|------|
| CL3_10t(ArF) | | | | | | | | |
| Tempo [minutos] | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 | Tubo 4 | Tubo 5 | Tubo 6 | Média | DP |
| 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 5,60 | 6,30 | 54,80 | 13,30 | - | 9,60 | 7,17 | 1,74 |
| 10 | 13,60 | 11,40 | 61,40 | 20,00 | - | - | 12,50 | 1,10 |
| 15 | 15,60 | 14,60 | 69,00 | 27,50 | - | - | 15,10 | 0,50 |
| 30 | 18,40 | 23,10 | 108,80 | 42,00 | - | - | 20,75 | 2,35 |
| 60 | 28,20 | 24,00 | 129,60 | - | - | - | 26,10 | 2,10 |

| Quantidade de água absorvida [ml] | | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|------|
| CL3_15t(ArF) | | | | | | | | |
| Tempo [minutos] | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 | Tubo 4 | Tubo 5 | Tubo 6 | Média | DP |
| 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 13,00 | 17,00 | 23,80 | 13,33 | - | 17,90 | 15,31 | 2,17 |
| 10 | 21,50 | 26,50 | 65,30 | 19,53 | - | - | 22,51 | 2,93 |
| 15 | 27,80 | 34,20 | - | 25,73 | - | - | 29,24 | 3,61 |
| 30 | 42,20 | 52,50 | - | 37,23 | - | - | 43,98 | 6,36 |
| 60 | 60,70 | 75,60 | - | - | - | - | 68,15 | 7,45 |

| Quantidade de água absorvida [ml] | | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|-------|
| CL3_25t(ArF) | | | | | | | | |
| Tempo [minutos] | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 | Tubo 4 | Tubo 5 | Tubo 6 | Média | DP |
| 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 10,20 | 7,10 | 14,70 | 18,60 | 16,30 | 16,90 | 13,97 | 4,03 |
| 10 | 16,90 | 14,00 | 23,20 | 29,50 | 23,50 | 24,40 | 21,92 | 5,09 |
| 15 | 23,20 | 19,80 | 27,70 | 38,90 | 31,70 | 33,70 | 29,17 | 6,42 |
| 30 | 25,40 | 28,70 | 38,00 | - | 42,80 | 48,70 | 36,72 | 8,66 |
| 60 | 39,40 | 44,70 | 53,30 | - | 62,70 | 72,20 | 54,46 | 11,88 |

| Tempo para absorver 4 ml de água | | | | | | | | | |
|----------------------------------|----------|-----|-----|----|-----|----|-----------|-------------|-------|
| Argamassa | Segundos | | | | | | Média [s] | Média [min] | DP |
| CL3 | 40 | 27 | 50 | 34 | 40 | 59 | 44,60 | 0,74 | 8,85 |
| CL3_5t(ArF) | 40 | 40 | 103 | 28 | 105 | 53 | 40,25 | 0,67 | 8,84 |
| CL3_10t(ArF) | 172 | 120 | 40 | 38 | 28 | 16 | 30,50 | 0,51 | 9,53 |
| CL3_15t(ArF) | 52 | 35 | 20 | 28 | 18 | 23 | 31,60 | 0,53 | 11,39 |
| CL3_25t(ArF) | 50 | 120 | 30 | 20 | 30 | 23 | 30,60 | 0,51 | 10,46 |

| $C_{abs.T} [kg/(m^2 \cdot min^{0,5})]$ | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|------|
| Argamassa | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 | Tubo 4 | Tubo 5 | Tubo 6 | Média | DP |
| CL3 | 15,34 | - | 14,19 | - | 17,87 | 16,23 | 15,91 | 1,34 |
| CL3_5t(ArF) | - | 19,38 | 12,09 | 16,07 | 14,05 | 9,70 | 14,26 | 3,32 |
| CL3_10t(ArF) | 7,58 | 6,45 | 34,83 | - | - | - | 7,01 | 0,56 |
| CL3_15t(ArF) | 16,31 | 20,32 | - | - | - | - | 18,31 | 2,00 |
| CL3_25t(ArF) | 10,59 | 12,01 | 14,32 | - | 16,85 | 19,40 | 14,64 | 3,19 |

| $C_{abs.4mj} [kg/(m^2 \cdot min^{0,5})]$ | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|------|
| Argamassa | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 | Tubo 4 | Tubo 5 | Tubo 6 | Média | DP |
| CL3 | 10,20 | 12,41 | 9,12 | 11,06 | 10,20 | 8,40 | 9,79 | 0,93 |
| CL3_5t(ArF) | 10,20 | 10,20 | 6,36 | 12,19 | 6,29 | 8,86 | 10,36 | 1,19 |
| CL3_10t(ArF) | 4,92 | 5,89 | 10,20 | 10,46 | 12,19 | 16,12 | 12,24 | 2,37 |
| CL3_15t(ArF) | 8,94 | 10,90 | 14,42 | 12,19 | 15,20 | 13,45 | 11,98 | 1,93 |
| CL3_25t(ArF) | 9,12 | 5,89 | 11,78 | 14,42 | 11,78 | 13,45 | 12,11 | 1,81 |

Tubo excluído

A.7. Valores detalhados da caracterização das argamassas em estado endurecido: provetes em suporte de tijolo aos 90 dias

- Dureza superficial – durómetro (DS_D)

| Argamassa | DS_D [graus shore-A] | | | | | | | | | | Média | DP |
|--------------|------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | |
| CL3 | 50 | 55 | 71 | 51 | 54 | 71 | 75 | 52 | 64 | 65 | 60,80 | 8,99 |
| CL3_5t(ArF) | 72 | 78 | 63 | 46 | 46 | 61 | 31 | 69 | 55 | 84 | 60,50 | 15,46 |
| CL3_10t(ArF) | 69 | 58 | 75 | 73 | 52 | 71 | 73 | 73 | 58 | 72 | 67,40 | 7,76 |
| CL3_15t(ArF) | 75 | 74 | 64 | 64 | 55 | 40 | 64 | 59 | 60 | 45 | 60,00 | 10,58 |
| CL3_25t(ArF) | 78 | 73 | 78 | 54 | 50 | 69 | 79 | 68 | 68 | 70 | 68,70 | 9,31 |

- Condutibilidade térmica

| Argamassa | λ [W/m.K] | | | | | | Média | DP |
|--------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | |
| CL3 | 0,444 | 0,518 | 0,612 | 0,424 | 0,511 | 0,519 | 0,505 | 0,061 |
| CL3_5t(ArF) | 0,520 | 0,663 | 0,346 | 0,534 | 0,479 | 0,389 | 0,489 | 0,103 |
| CL3_10t(ArF) | 0,664 | 0,785 | 0,300 | 0,571 | 0,542 | 0,598 | 0,577 | 0,147 |
| CL3_15t(ArF) | 0,540 | 0,539 | 0,507 | 0,524 | 0,564 | 0,583 | 0,543 | 0,025 |
| CL3_25t(ArF) | 0,585 | 0,541 | 0,504 | 0,612 | 0,644 | 0,484 | 0,562 | 0,057 |

- Velocidade de propagação de ultra-sons

| | | CL3 | CL3_5t(ArF) | CL3_10t(ArF) | CL3_15t(ArF) | CL3_25t(ArF) |
|-------|------------------|----------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| AB | Tempo [s] | 1,13E-04 | 1,21E-04 | 9,39E-05 | 9,05E-05 | 1,19E-04 |
| | Velocidade [m/s] | 870,15 | 812,73 | 1049,31 | 1089,13 | 831,48 |
| AC | Tempo [s] | 1,58E-04 | 1,62E-04 | 1,56E-04 | 1,62E-04 | 1,53E-04 |
| | Velocidade [m/s] | 1238,42 | 1206,40 | 1255,07 | 1209,38 | 1278,82 |
| AD | Tempo [s] | 1,30E-04 | 1,33E-04 | 1,22E-04 | 1,34E-04 | 1,36E-04 |
| | Velocidade [m/s] | 826,56 | 808,07 | 875,41 | 797,25 | 787,87 |
| AE | Tempo [s] | 1,43E-04 | 1,43E-04 | 1,43E-04 | 1,45E-04 | 1,43E-04 |
| | Velocidade [m/s] | 1029,77 | 1026,66 | 1028,81 | 1016,49 | 1030,01 |
| AF | Tempo [s] | 1,93E-04 | 2,02E-04 | 1,94E-04 | 1,57E-04 | 1,93E-04 |
| | Velocidade [m/s] | 1158,07 | 1106,45 | 1153,68 | 1427,06 | 1156,27 |
| FB | Tempo [s] | 1,41E-04 | 1,66E-04 | 1,46E-04 | 1,61E-04 | 1,47E-04 |
| | Velocidade [m/s] | 1037,57 | 880,77 | 1002,68 | 907,02 | 996,07 |
| FC | Tempo [s] | 1,35E-04 | 1,35E-04 | 1,32E-04 | 1,37E-04 | 1,38E-04 |
| | Velocidade [m/s] | 821,87 | 821,46 | 838,02 | 811,84 | 803,21 |
| FD | Tempo [s] | 1,52E-04 | 1,73E-04 | 1,55E-04 | 1,55E-04 | 1,65E-04 |
| | Velocidade [m/s] | 1304,48 | 1146,08 | 1275,61 | 1278,63 | 1197,40 |
| FE | Tempo [s] | 1,14E-04 | 1,16E-04 | 1,20E-04 | 1,09E-04 | 1,20E-04 |
| | Velocidade [m/s] | 857,53 | 845,95 | 816,16 | 897,80 | 820,26 |
| Média | | 1016,05 | 961,62 | 1032,75 | 1048,29 | 989,04 |
| DP | | 174,32 | 150,72 | 161,18 | 207,28 | 178,07 |

- Absorção de água sob baixa pressão: Tubos de Karsten

| Quantidade de água absorvida [ml] | | | | | |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------------|------|
| CL3 | | | | | |
| Tempo [minutos] | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 | Média | DP |
| 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 11,90 | 8,00 | 5,60 | 8,50 | 2,60 |
| 10 | 22,20 | 16,40 | 10,60 | 16,40 | 4,74 |
| 15 | 30,00 | 20,90 | 14,20 | 21,70 | 6,48 |
| 30 | 46,90 | 31,70 | 25,60 | 34,73 | 8,96 |
| 60 | 63,40 | 50,40 | 42,20 | 52,00 | 8,73 |

| Quantidade de água absorvida [ml] | | | | | |
|-----------------------------------|--------|--------------|--------|-------|----|
| CL3_5t(ArF) | | | | | |
| Tempo [minutos] | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 | Média | DP |
| 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | - | - |
| 5 | 1,90 | 6,60 | 22,20 | - | - |
| 10 | 5,20 | 13,20 | 33,80 | - | - |
| 15 | 9,80 | 19,40 | 46,90 | - | - |
| 30 | 11,70 | 29,80 | 72,40 | - | - |
| 60 | 15,40 | 43,70 | 112,30 | - | - |

| Quantidade de água absorvida [ml] | | | | | |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------------|-------|
| CL3_10t(ArF) | | | | | |
| Tempo [minutos] | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 | Média | DP |
| 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 6,40 | 8,70 | 2,80 | 5,97 | 2,43 |
| 10 | 12,00 | 13,80 | 7,00 | 10,93 | 2,88 |
| 15 | 16,20 | 18,80 | 8,30 | 14,43 | 4,46 |
| 30 | 22,80 | 29,50 | 12,40 | 21,57 | 7,04 |
| 60 | 35,10 | 48,40 | 16,60 | 33,37 | 13,04 |

| Quantidade de água absorvida [ml] | | | | | |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------------|------|
| CL3_15t(ArF) | | | | | |
| Tempo [minutos] | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 | Média | DP |
| 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 15,20 | 6,30 | 9,20 | 10,23 | 3,71 |
| 10 | 26,10 | 13,50 | 14,40 | 18,00 | 5,74 |
| 15 | 31,40 | 24,70 | 19,00 | 25,03 | 5,07 |
| 30 | 46,80 | 38,00 | 28,50 | 37,77 | 7,47 |
| 60 | - | 53,70 | 43,30 | 48,50 | 5,20 |

| Quantidade de água absorvida [ml] | | | | | |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------------|------|
| CL3_25t(ArF) | | | | | |
| Tempo [minutos] | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 | Média | DP |
| 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 32,00 | 6,40 | 7,40 | 6,90 | 0,50 |
| 10 | 47,30 | 12,90 | 14,30 | 13,60 | 0,70 |
| 15 | 62,70 | 18,50 | 20,00 | 19,25 | 0,75 |
| 30 | 95,60 | 27,40 | 27,30 | 27,35 | 0,05 |
| 60 | 143,60 | 39,00 | 38,60 | 38,80 | 0,20 |

| Tempo para absorver 4 ml de água | | | | | | |
|----------------------------------|----------|-----|-----|-----------|-------------|-------|
| Argamassa | Segundos | | | Média [s] | Média [min] | DP |
| CL3 | 65 | 108 | 170 | 114,33 | 1,91 | 43,10 |
| CL3_5t(ArF) | 766 | 149 | 10 | 149,00 | 2,48 | - |
| CL3_10t(ArF) | 130 | 91 | 563 | 110,50 | 1,84 | 19,50 |
| CL3_15t(ArF) | 30 | 63 | 80 | 71,50 | 1,19 | 8,50 |
| CL3_25t(ArF) | 10 | 150 | 75 | 112,50 | 1,88 | 37,50 |

| C_{abs.T} [kg/(m².min^{0,5})] | | | | | |
|---|---------------|---------------|---------------|--------------|-----------|
| Argamassa | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 | Média | DP |
| CL3 | 17,04 | 13,54 | 11,34 | 13,97 | 2,35 |
| CL3_5t(ArF) | 4,14 | 11,74 | 30,18 | 11,74 | - |
| CL3_10t(ArF) | 9,43 | 13,01 | 4,46 | 11,22 | 1,79 |
| CL3_15t(ArF) | - | 14,43 | 11,64 | 13,03 | 1,40 |
| CL3_25t(ArF) | 38,59 | 10,48 | 10,37 | 10,43 | 0,05 |

| C_{abs.4ml} [kg/(m².min^{0,5})] | | | | | |
|---|---------------|---------------|---------------|--------------|-----------|
| Argamassa | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 | Média | DP |
| CL3 | 8,00 | 6,21 | 4,95 | 6,03 | 1,25 |
| CL3_5t(ArF) | 2,33 | 5,28 | 20,40 | 5,28 | - |
| CL3_10t(ArF) | 5,66 | 6,76 | 2,72 | 6,14 | 0,55 |
| CL3_15t(ArF) | 11,78 | 8,13 | 7,21 | 7,63 | 0,46 |
| CL3_25t(ArF) | 20,40 | 5,27 | 7,45 | 6,08 | 1,09 |

Tubo excluído

A.8. Valores detalhados da caracterização das argamassas em estado endurecido: provetes prismáticos aos 90 dias

- Porosidade aberta e massa volúmica

| Argamassa | Massas [g] | | | P _{ab} [%] | | | MV [g/m ³] | | |
|--------------|------------|--------|--------|---------------------|--------|-------|------------------------|----------|--------|
| | M1 | M2 | M3 | Cada provete | Média | DP | Cada provete | Média | DP |
| CL3 | 67,693 | 37,220 | 79,875 | 28,559 | 28,567 | 0,302 | 1586,989 | 1595,562 | 12,170 |
| | 64,648 | 35,867 | 75,952 | 28,200 | | | 1612,773 | | |
| | 66,097 | 36,500 | 78,151 | 28,940 | | | 1586,925 | | |
| CL3_5t(ArF) | 55,921 | 31,010 | 66,774 | 30,346 | 29,493 | 0,806 | 1563,611 | 1583,270 | 22,643 |
| | 58,141 | 32,135 | 69,139 | 29,721 | | | 1571,209 | | |
| | 73,243 | 40,776 | 86,128 | 28,411 | | | 1614,989 | | |
| CL3_10t(ArF) | 67,226 | 36,996 | 79,375 | 28,668 | 29,280 | 1,205 | 1586,305 | 1576,493 | 25,437 |
| | 84,194 | 46,454 | 99,024 | 28,210 | | | 1601,560 | | |
| | 55,549 | 30,673 | 66,706 | 30,963 | | | 1541,615 | | |
| CL3_15t(ArF) | 59,497 | 31,357 | 66,948 | 20,935 | 27,802 | - | 1671,687 | 1619,112 | - |
| | 69,802 | 38,805 | 81,504 | 27,406 | | | 1634,746 | | |
| | 63,517 | 35,075 | 74,687 | 28,199 | | | 1603,479 | | |
| CL3_25t(ArF) | 55,697 | 31,338 | 66,432 | 30,589 | 30,062 | 0,509 | 1587,080 | 1598,910 | 12,360 |
| | 64,960 | 36,518 | 77,279 | 30,223 | | | 1593,680 | | |
| | 67,924 | 38,238 | 80,271 | 29,375 | | | 1615,968 | | |

M1 – massa seca; M2 – massa hidrostática; M3 – massa saturada

Valor excluído

- Condutibilidade térmica

| Provete | λ [W/m.K] | Média | DP |
|--------------|-------------------|-------|-------|
| CL3 | 0,741 | 0,774 | 0,027 |
| | 0,808 | | |
| | 0,772 | | |
| CL3_5t(Arf) | 0,707 | 0,710 | 0,069 |
| | 0,626 | | |
| | 0,796 | | |
| CL3_10t(ArF) | 0,672 | 0,679 | 0,023 |
| | 0,711 | | |
| | 0,655 | | |
| CL3_15t(ArF) | 0,678 | 0,661 | 0,019 |
| | 0,671 | | |
| | 0,634 | | |
| CL3_25t(Arf) | 0,755 | 0,660 | 0,068 |
| | 0,598 | | |
| | 0,626 | | |

- Módulo de elasticidade dinâmico: Equipamento apropriado

| Argamassa | Provete | Ed [MPa] | | | |
|-----------|---------|--------------|----------|---------|---------|
| | | Cada provete | Média | Média | DP |
| CL3 | I13 | 2349 | 1885,750 | 3242,88 | 111,004 |
| | | 1499 | | | |
| | | 1685 | | | |
| | | 2010 | | | |
| | I14 | 3130 | 3139,750 | | |
| | | 3136 | | | |
| | | 3081 | | | |
| | | 3212 | | | |
| | I18 | 3327 | 3346,000 | | |
| | | 3399 | | | |
| | | 3351 | | | |
| | | 3307 | | | |

| Argamassa | Provete | Ed [MPa] | | | |
|-------------|---------|--------------|----------|---------|---------|
| | | Cada provete | Média | Média | DP |
| CL3_5t(ArF) | I21 | 2887 | 2867,250 | 2730,83 | 101,689 |
| | | 2799 | | | |
| | | 2888 | | | |
| | | 2895 | | | |
| | I22 | 2633 | 2664,750 | | |
| | | 2648 | | | |
| | | 2731 | | | |
| | | 2647 | | | |
| | I23 | 2661 | 2660,500 | | |
| | | 2670 | | | |
| | | 2653 | | | |
| | | 2658 | | | |

| Argamassa | Provete | Ed [MPa] | | | |
|--------------|---------|--------------|----------|---------|--------|
| | | Cada provete | Média | Média | DP |
| CL3_10t(ArF) | I31 | 2433 | 2459,250 | 2459,92 | 25,411 |
| | | 2446 | | | |
| | | 2487 | | | |
| | | 2471 | | | |
| | I32 | 2486 | 2487,250 | | |
| | | 2489 | | | |
| | | 2491 | | | |
| | | 2483 | | | |
| | I33 | 2437 | 2433,250 | | |
| | | 2439 | | | |
| | | 2426 | | | |
| | | 2431 | | | |

| Argamassa | Provete | Ed [MPa] | | | |
|--------------|---------|--------------|----------|---------|--------|
| | | Cada provete | Média | Média | DP |
| CL3_15t(ArF) | I41 | 2498 | 2491,250 | 2458,33 | 24,881 |
| | | 2492 | | | |
| | | 2486 | | | |
| | | 2489 | | | |
| | I42 | 2460 | 2448,000 | | |
| | | 2444 | | | |
| | | 2450 | | | |
| | | 2438 | | | |
| | I43 | 2422 | 2435,750 | | |
| | | 2444 | | | |
| | | 2436 | | | |
| | | 2441 | | | |

| Argamassa | Provete | E [MPa] | | | |
|--------------|---------|--------------|----------|---------|--------|
| | | Cada provete | Média | Média | DP |
| CL3_25t(ArF) | I51 | 2199 | 2188,750 | 2192,83 | 54,155 |
| | | 2176 | | | |
| | | 2183 | | | |
| | | 2197 | | | |
| | I52 | 2174 | 2140,000 | | |
| | | 2052 | | | |
| | | 2178 | | | |
| | | 2156 | | | |
| | I53 | 2251 | 2249,750 | | |
| | | 2253 | | | |
| | | 2245 | | | |
| | | 2250 | | | |

Valor excluído

- Módulo de elasticidade dinâmico: velocidade de propagação de ultra-sons

| Argamassa | t [μs] | t [s] | V [km/s] | v [-] | m [kg] | L [mm] | a [mm] | b [mm] | V [m³] | ρ [kg/m³] | Ed [MPa] |
|--------------|--------|---------|----------|-------|--------|--------|--------|--------|----------|-----------|----------|
| CL3 | 116,6 | 0,00012 | 1,35 | 0,20 | 0,434 | 157,87 | 39,60 | 40,49 | 0,000253 | 1712,99 | 2826 |
| CL3_5t(ArF) | 124,1 | 0,00012 | 1,29 | 0,20 | 0,433 | 159,91 | 39,66 | 39,88 | 0,000250 | 1734,42 | 2592 |
| CL3_10t(ArF) | 129,7 | 0,00013 | 1,23 | 0,20 | 0,437 | 159,51 | 39,75 | 40,10 | 0,000254 | 1720,65 | 2342 |
| CL3_15t(ArF) | 130,3 | 0,00013 | 1,22 | 0,20 | 0,436 | 159,26 | 39,70 | 40,60 | 0,000257 | 1699,89 | 2286 |
| CL3_25t(ArF) | 138,1 | 0,00014 | 1,14 | 0,20 | 0,435 | 157,97 | 39,51 | 41,07 | 0,000256 | 1696,08 | 1997 |

- Resistência à tração por flexão e resistência à compressão

| Argamassa | Provete | Tração [N] | Rt [MPa] | | | Compressão [N] | Rc [MPa] | | |
|--------------|---------|------------|--------------|-------|------|----------------|--------------|-------|------|
| | | | Cada provete | Média | DP | | Cada provete | Média | DP |
| CL3 | 2 | 109,09 | 0,26 | 0,30 | 0,03 | 967,37 | 0,60 | 0,66 | 0,04 |
| | 3 | 39,59 | 0,09 | | | - | - | | |
| | 4 | 138,19 | 0,32 | | | 1116,84 | 0,70 | | |
| | 8 | 132,49 | 0,31 | | | 1072,90 | 0,67 | | |
| CL3_5t(ArF) | 1 | 111,07 | 0,26 | 0,27 | 0,01 | 744,56 | 0,47 | 0,59 | 0,09 |
| | 2 | 123,69 | 0,29 | | | 983,88 | 0,61 | | |
| | 3 | 115,84 | 0,27 | | | 1110,68 | 0,69 | | |
| CL3_10t(ArF) | 1 | 122,83 | 0,29 | 0,29 | 0,00 | 934,34 | 0,58 | 0,49 | 0,07 |
| | 2 | 120,89 | 0,28 | | | 666,47 | 0,42 | | |
| | 3 | 122,33 | 0,29 | | | 766,11 | 0,48 | | |
| CL3_15t(ArF) | 1 | 97,85 | 0,23 | 0,24 | 0,01 | 747,08 | 0,47 | 0,44 | 0,02 |
| | 2 | 107,37 | 0,25 | | | 700,90 | 0,44 | | |
| | 3 | 101,40 | 0,24 | | | 687,74 | 0,43 | | |
| CL3_25t(ArF) | 1 | 130,57 | 0,31 | 0,29 | 0,01 | 878,36 | 0,55 | 0,49 | 0,05 |
| | 2 | 116,10 | 0,27 | | | 682,98 | 0,43 | | |
| | 3 | 125,29 | 0,29 | | | 798,86 | 0,50 | | |

Valor excluído

- Absorção de água por capilaridade: massas

| Tempo | Massa dos provetes [g] | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|------------------------|---------|---------|-------------|---------|---------|--------------|---------|---------|--------------|---------|---------|--------------|---------|---------|
| | CL3 | | | CL3_5t(ArF) | | | CL3_10t(ArF) | | | CL3_15t(ArF) | | | CL3_25t(ArF) | | |
| Minutos | I12 | I14 | I18 | I21 | I22 | I23 | I31 | I32 | I33 | I41 | I42 | I43 | I51 | I52 | I53 |
| 0 | 194,434 | 222,546 | 223,803 | 227,441 | 229,736 | 215,733 | 218,150 | 226,130 | 228,605 | 223,840 | 209,113 | 219,401 | 223,365 | 222,050 | 213,014 |
| 5 | 209,519 | 236,028 | 239,120 | 243,962 | 245,743 | 230,026 | 228,597 | 237,970 | 245,253 | 233,750 | 224,523 | 233,467 | 243,801 | 241,810 | 236,013 |
| 10 | 212,856 | 238,731 | 242,645 | 247,786 | 249,160 | 233,252 | 235,954 | 245,630 | 248,402 | 241,458 | 227,634 | 236,760 | 249,145 | 246,975 | 241,399 |
| 15 | 215,431 | 240,144 | 245,333 | 250,275 | 251,603 | 235,847 | 238,534 | 248,117 | 251,020 | 244,199 | 230,112 | 239,286 | 253,127 | 250,836 | 243,569 |
| 30 | 218,566 | 245,140 | 249,319 | 254,619 | 255,907 | 240,217 | 243,220 | 250,616 | 255,266 | 248,612 | 234,523 | 243,698 | 254,700 | 253,141 | 243,905 |
| 60 | 219,235 | 249,224 | 251,478 | 257,186 | 259,732 | 243,524 | 247,011 | 256,363 | 258,898 | 253,123 | 236,960 | 248,452 | 255,615 | 254,064 | 244,658 |
| 120 | 219,404 | 249,318 | 251,549 | 257,188 | 259,755 | 243,624 | 247,173 | 256,686 | 259,420 | 253,258 | 237,119 | 248,688 | 255,666 | 254,153 | 244,824 |
| 180 | 219,779 | 249,414 | 251,732 | 257,214 | 259,807 | 243,875 | 247,159 | 256,720 | 259,468 | 253,27 | 237,340 | 248,710 | 255,714 | 254,351 | 244,93 |
| 240 | 219,844 | 249,544 | 251,714 | 257,372 | 259,988 | 243,922 | 247,278 | 256,930 | 259,566 | 253,272 | 237,363 | 248,712 | 255,777 | 254,382 | 244,941 |
| 300 | 219,950 | 249,637 | 251,949 | 257,568 | 260,076 | 243,932 | 247,486 | 256,968 | 259,566 | 253,318 | 237,419 | 248,760 | 255,797 | 254,725 | 245,026 |
| 1440 | 220,275 | 249,796 | 251,961 | 257,634 | 260,305 | 244,140 | 247,348 | 257,066 | 259,580 | 253,382 | 237,452 | 248,932 | 255,893 | 254,573 | 245,036 |
| 5760 | 221,207 | 250,403 | 252,723 | 258,473 | 261,059 | 244,964 | 248,093 | 257,654 | 260,771 | 254,104 | 238,216 | 249,715 | 256,402 | 255,030 | 245,757 |

- Absorção de água por capilaridade: quantidade de água absorvida

| Tempo [min] | Quantidade de água absorvida [kg/m ²] | | | | | | | | | |
|-------------|---|------|-------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|
| | CL3 | DP | CL3_5t(ArF) | DP | CL3_10t(ArF) | DP | CL3_15t(ArF) | DP | CL3_25t(ArF) | DP |
| 0 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 |
| 5 | 9,14 | 0,62 | 9,75 | 0,73 | 8,11 | 2,03 | 8,21 | 1,79 | 13,17 | 1,07 |
| 10 | 11,14 | 0,89 | 11,94 | 0,90 | 11,9 | 0,67 | 11,15 | 0,38 | 16,48 | 1,13 |
| 15 | 12,53 | 1,33 | 13,5 | 0,86 | 13,5 | 0,67 | 12,76 | 0,35 | 18,56 | 0,55 |
| 30 | 15,05 | 0,91 | 16,22 | 0,85 | 15,88 | 0,70 | 15,52 | 0,35 | 19,44 | 0,14 |
| 60 | 16,49 | 0,91 | 18,24 | 0,75 | 18,62 | 0,51 | 17,95 | 0,48 | 19,98 | 0,19 |
| 120 | 16,56 | 0,88 | 18,26 | 0,72 | 18,83 | 0,61 | 18,06 | 0,49 | 20,04 | 0,15 |
| 180 | 16,7 | 0,81 | 18,33 | 0,65 | 18,85 | 0,63 | 18,12 | 0,41 | 20,12 | 0,15 |
| 240 | 16,73 | 0,79 | 18,41 | 0,69 | 18,94 | 0,63 | 18,12 | 0,41 | 20,14 | 0,16 |
| 300 | 16,82 | 0,83 | 18,47 | 0,74 | 18,99 | 0,57 | 18,15 | 0,40 | 20,23 | 0,21 |
| 1440 | 16,93 | 0,73 | 18,58 | 0,72 | 18,98 | 0,63 | 18,21 | 0,43 | 20,22 | 0,18 |
| 5760 | 17,41 | 0,67 | 19,08 | 0,71 | 19,51 | 0,72 | 18,68 | 0,43 | 20,58 | 0,10 |

- Secagem

| Tempo | Massa dos provetes [g] | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|------------------------|---------|---------|-------------|---------|---------|--------------|---------|---------|--------------|---------|---------|--------------|---------|---------|
| | CL3 | | | CL3_5t(ArF) | | | CL3_10t(ArF) | | | CL3_15t(ArF) | | | CL3_25t(ArF) | | |
| Minutos | I12 | I14 | I18 | I21 | I22 | I23 | I31 | I32 | I33 | I41 | I42 | I43 | I51 | I52 | I53 |
| 0 | 221,207 | 250,403 | 252,723 | 258,473 | 261,059 | 244,964 | 248,093 | 257,654 | 260,771 | 254,104 | 238,216 | 249,715 | 256,402 | 255,030 | 245,757 |
| 60 | 220,387 | 249,823 | 252,362 | 257,647 | 260,335 | 244,011 | 247,468 | 257,287 | 259,881 | 253,530 | 237,600 | 249,097 | 255,961 | 254,524 | 245,109 |
| 120 | 219,599 | 249,096 | 251,694 | 256,905 | 259,701 | 243,281 | 246,789 | 256,628 | 259,315 | 252,945 | 236,817 | 248,479 | 255,436 | 253,961 | 244,660 |
| 180 | 218,666 | 248,277 | 250,944 | 256,110 | 258,914 | 242,434 | 246,096 | 255,940 | 258,656 | 252,234 | 236,047 | 247,808 | 254,836 | 253,399 | 244,058 |
| 240 | 218,050 | 247,692 | 250,406 | 255,529 | 258,319 | 241,810 | 245,555 | 255,442 | 258,195 | 251,747 | 235,404 | 247,266 | 254,377 | 252,987 | 243,594 |
| 300 | 217,316 | 247,025 | 249,648 | 254,763 | 257,469 | 241,234 | 245,048 | 254,756 | 257,522 | 250,969 | 234,905 | 246,681 | 253,709 | 252,299 | 242,834 |
| 360 | 216,608 | 246,268 | 248,840 | 253,873 | 256,596 | 240,555 | 244,372 | 254,023 | 256,758 | 250,160 | 234,308 | 246,036 | 253,028 | 251,590 | 242,119 |
| 420 | 215,940 | 245,575 | 248,092 | 253,082 | 255,791 | 239,902 | 243,739 | 253,307 | 256,109 | 249,455 | 233,739 | 245,424 | 252,361 | 250,962 | 241,460 |
| 1440 | 206,166 | 235,534 | 237,258 | 242,761 | 245,103 | 230,653 | 234,156 | 242,819 | 245,805 | 239,654 | 224,637 | 236,264 | 242,095 | 240,469 | 231,325 |
| 1560 | 205,688 | 234,999 | 236,718 | 242,203 | 244,264 | 230,157 | 233,646 | 242,261 | 245,203 | 239,202 | 224,123 | 235,777 | 241,407 | 239,906 | 230,468 |
| 1740 | 204,923 | 234,226 | 235,877 | 241,384 | 243,732 | 229,394 | 232,858 | 241,436 | 244,376 | 238,491 | 223,404 | 235,083 | 240,562 | 239,030 | 229,503 |
| 2880 | 201,485 | 230,406 | 231,841 | 236,967 | 239,305 | 225,384 | 228,596 | 236,886 | 239,763 | 234,500 | 219,633 | 231,147 | 236,200 | 234,918 | 225,333 |
| 4320 | 199,114 | 228,081 | 229,380 | 234,166 | 236,450 | 222,271 | 225,784 | 233,893 | 236,582 | 231,747 | 216,487 | 228,017 | 233,575 | 232,301 | 222,522 |
| 5760 | 197,753 | 226,720 | 227,961 | 232,561 | 234,850 | 220,623 | 224,041 | 232,154 | 234,818 | 230,135 | 214,769 | 224,496 | 231,894 | 230,721 | 220,840 |
| 10080 | 195,765 | 224,606 | 225,806 | 230,043 | 232,330 | 218,107 | 221,333 | 229,316 | 231,904 | 227,421 | 212,160 | 223,728 | 228,708 | 227,547 | 217,705 |
| 11520 | 195,385 | 224,350 | 225,375 | 229,564 | 231,237 | 217,627 | 220,277 | 228,746 | 231,335 | 226,862 | 211,256 | 223,107 | 227,991 | 226,793 | 217,020 |
| 12960 | 195,062 | 223,820 | 225,004 | 229,135 | 231,406 | 217,218 | 220,305 | 228,238 | 230,840 | 226,387 | 211,227 | 222,570 | 227,355 | 226,041 | 216,422 |
| 14400 | 194,885 | 223,513 | 224,705 | 228,782 | 231,065 | 216,886 | 219,893 | 227,855 | 230,439 | 225,970 | 210,834 | 222,085 | 226,817 | 225,476 | 215,920 |
| 15840 | 194,840 | 223,310 | 224,514 | 228,550 | 230,819 | 216,670 | 219,631 | 227,585 | 230,161 | 225,706 | 210,586 | 221,756 | 226,462 | 225,092 | 215,580 |
| 21600 | 194,866 | 223,041 | 224,320 | 228,095 | 230,373 | 216,332 | 219,030 | 227,007 | 229,556 | 225,110 | 210,163 | 220,991 | 225,533 | 224,142 | 214,789 |
| 23040 | 194,884 | 223,048 | 224,326 | 228,032 | 230,323 | 216,306 | 218,930 | 226,903 | 229,449 | 224,998 | 210,113 | 220,807 | 225,324 | 223,904 | 214,612 |
| 24480 | 194,883 | 223,042 | 224,329 | 228,006 | 230,300 | 216,300 | 218,860 | 226,835 | 229,370 | 224,909 | 210,060 | 220,690 | 225,113 | 223,695 | 214,454 |
| 25920 | 194,892 | 223,051 | 224,339 | 227,998 | 230,286 | 216,291 | 218,815 | 226,796 | 229,327 | 224,859 | 210,022 | 220,592 | 224,973 | 223,551 | 214,360 |
| 27360 | 194,901 | 223,052 | 224,344 | 227,996 | 230,288 | 216,298 | 218,788 | 226,773 | 229,305 | 224,817 | 209,993 | 220,519 | 224,859 | 223,433 | 214,289 |
| 31680 | 194,920 | 223,076 | 224,363 | 227,996 | 230,280 | 216,301 | 218,762 | 226,745 | 229,273 | 224,757 | 209,970 | 220,415 | 224,655 | 223,218 | 214,158 |
| 34560 | 194,927 | 223,096 | 224,383 | 227,999 | 230,295 | 216,316 | 218,753 | 226,748 | 229,269 | 224,741 | 209,957 | 220,381 | 224,572 | 223,131 | 214,105 |

- Resistência aos sulfatos

| Ciclos | Massas [g] | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|------------|---------|---------|-------------|---------|---------|--------------|---------|---------|--------------|---------|---------|--------------|---------|---------|
| | CL3 | | | CL3_5t(ArF) | | | CL3_10t(ArF) | | | CL3_15t(ArF) | | | CL3_25t(ArF) | | |
| | I12 | I14 | I18 | I21 | I22 | I23 | I31 | I32 | I33 | I41 | I42 | I43 | I51 | I52 | I53 |
| 0 | 192,343 | 221,239 | 222,387 | 225,885 | 227,758 | 214,201 | 216,777 | 224,349 | 226,547 | 222,166 | 207,670 | 217,836 | 220,751 | 219,248 | 210,404 |
| 1 | 193,563 | 222,152 | 223,376 | 226,751 | 228,651 | 215,018 | 217,486 | 226,087 | 227,389 | 222,918 | 208,401 | 218,643 | 221,565 | 220,011 | 211,205 |
| 2 | 193,484 | 222,495 | 223,740 | 226,938 | 228,901 | 215,268 | 217,752 | 225,316 | 227,559 | 222,907 | 208,376 | 218,898 | 221,774 | 220,884 | 211,577 |
| 3 | 193,567 | 222,634 | 223,910 | 227,028 | 229,088 | 215,401 | 217,748 | 225,561 | 226,879 | 222,442 | 208,367 | 218,909 | 221,961 | 220,356 | 211,743 |
| 4 | 193,362 | 221,999 | 223,541 | 226,509 | 229,081 | 215,531 | 217,197 | 225,345 | 226,268 | 221,332 | 208,297 | 218,591 | 222,098 | 220,511 | 212,031 |
| 5 | 192,433 | 221,268 | 222,683 | 224,060 | 226,960 | 213,042 | 212,275 | 219,270 | 221,893 | 217,251 | 206,148 | 214,886 | 218,479 | 216,402 | 205,940 |
| 6 | 191,454 | 219,938 | 222,230 | 222,877 | 224,760 | 211,564 | 210,675 | 213,714 | 219,899 | 215,310 | 204,116 | 213,041 | 216,896 | 214,446 | 204,015 |
| 7 | 190,695 | 218,862 | 221,834 | 221,644 | 222,765 | 208,315 | 207,586 | 212,115 | 218,314 | 210,204 | 202,646 | 211,700 | 214,550 | 209,987 | 197,283 |
| 8 | 184,244 | 214,868 | 219,613 | 215,551 | 217,872 | 204,607 | 201,427 | 200,971 | 207,271 | 202,677 | 194,335 | 205,437 | 208,086 | 202,353 | 187,182 |
| 9 | 179,995 | 214,023 | 219,186 | 214,692 | 217,127 | 204,166 | 200,639 | 193,896 | 203,530 | 201,200 | 193,522 | 203,496 | 207,309 | 196,691 | 186,581 |
| 10 | 175,591 | 209,716 | 216,624 | 207,070 | 209,995 | 191,608 | 187,508 | 186,046 | 193,128 | 190,558 | 184,696 | 194,770 | 194,846 | 182,164 | 171,501 |
| 11 | 172,753 | 207,416 | 214,755 | 202,982 | 205,673 | 187,639 | 183,054 | 183,980 | 190,367 | 187,163 | 182,490 | 191,476 | 190,462 | 179,395 | 168,950 |
| 12 | 166,973 | 203,586 | 211,067 | 201,052 | 204,242 | 184,613 | 165,730 | 181,570 | 183,366 | 184,688 | 173,492 | 179,232 | 176,012 | 163,277 | 154,104 |
| 13 | 158,652 | 195,243 | 204,984 | 193,147 | 188,412 | 164,528 | 153,045 | 168,593 | 176,004 | 169,219 | 157,853 | 161,758 | 159,672 | 149,603 | 142,192 |
| 14 | 153,884 | 186,554 | 195,213 | 180,951 | 174,874 | 150,396 | 142,998 | 156,824 | 166,609 | 155,655 | 144,451 | 147,971 | 145,144 | 134,871 | 127,610 |
| 15 | 151,558 | 184,865 | 193,147 | 175,619 | 172,994 | 147,958 | 140,795 | 154,475 | 164,876 | 152,079 | 142,242 | 144,855 | 142,391 | 131,356 | 124,140 |
| 16 | 150,247 | 183,097 | 191,405 | 174,144 | 165,512 | 140,906 | 132,067 | 148,527 | 162,909 | 149,238 | 140,266 | 142,978 | 133,958 | 124,121 | 115,383 |
| 17 | 149,140 | 170,729 | 182,355 | 172,564 | 164,041 | 125,035 | 125,968 | 140,015 | 161,406 | 134,993 | 125,653 | 128,336 | 118,594 | 121,022 | 112,348 |
| 18 | 145,161 | 166,448 | 178,607 | 168,211 | 152,321 | 115,192 | 126,820 | 135,042 | 158,729 | 130,885 | 121,787 | 114,906 | 105,346 | 106,496 | 95,654 |
| 19 | 140,719 | 163,985 | 174,014 | 162,932 | 147,613 | 111,006 | 111,145 | 132,826 | 155,417 | 125,486 | 116,558 | 110,130 | 102,153 | 102,597 | 91,791 |
| 20 | 125,992 | 144,626 | 155,084 | 140,681 | 127,139 | 92,437 | 96,069 | 116,219 | 137,466 | 103,264 | 97,653 | 90,960 | 88,857 | 89,183 | 78,113 |
| 21 | 119,959 | 138,369 | 152,17 | 130,134 | 125,132 | 90,462 | 94,327 | 110,865 | 134,905 | 94,606 | 95,566 | 88,172 | 87,908 | 85,907 | 75,005 |
| 22 | 118,07 | 126,686 | 138,644 | 118,263 | 110,37 | 88,832 | 80,123 | 102,991 | 123,2 | 84,976 | 84,599 | 75,919 | 74,736 | 84,236 | 66,653 |
| 23 | 117,096 | 125,736 | 134,249 | 117,23 | 109,145 | 77,835 | 79,062 | 98,506 | 118,074 | 79,212 | 76,832 | 74,905 | 73,765 | 83,203 | 65,805 |
| 24 | 107,39 | 113,07 | 118,708 | 100,318 | 92,751 | 67,918 | 69,07 | 89,772 | 105,3 | 70,712 | 66,21 | 64,702 | 63,514 | 73,26 | 57,179 |
| 25 | 105,036 | 110,901 | 116,874 | 98,636 | 90,62 | 65,797 | 68,096 | 88,854 | 103,602 | 65,692 | 65,097 | 58,036 | 59,767 | 69,997 | 53,419 |

- Massa volúmica aparente – provetes prismáticos a várias idades

| Argamassa | Provete | | Massa volúmica aparente [kg/m ³] | | | | | |
|--------------|---------|---|--|---------|---------|-----------------|---------|---------|
| | | | 1ª Fase | | | 2ª Fase | | |
| | | | 7 Dias | 28 Dias | 90 Dias | 7 Dias | 28 Dias | 90 Dias |
| CL3 | I1 | 1 | Provete partido | | | 1773,55 | 1730,70 | 1722,81 |
| | | 2 | 1730,45 | 1699,97 | 1712,99 | 1748,21 | 1720,17 | 1723,54 |
| | | 3 | 1725,65 | 1686,47 | 1677,02 | 1745,54 | 1678,59 | 1723,51 |
| | | 4 | 1743,30 | 1727,91 | 1749,15 | 1739,43 | 1679,58 | 1707,91 |
| | | 5 | 1736,59 | 1735,71 | 1731,30 | 1770,56 | 1735,18 | 1724,18 |
| | | 6 | 1729,12 | 1727,77 | 1687,81 | 1746,58 | 1755,72 | 1728,97 |
| | | 7 | 1726,21 | 1687,12 | 1710,73 | 1788,20 | 1714,80 | 1734,63 |
| | | 8 | 1720,20 | 1707,75 | 1773,34 | 1794,26 | 1700,50 | 1697,61 |
| | | 9 | 1739,88 | 1695,23 | 1698,16 | 1748,81 | 1706,44 | 1715,27 |
| CL3_5t(ArF) | I2 | 1 | 1689,60 | 1666,55 | 1712,67 | Provete partido | | |
| | | 2 | 1728,11 | 1669,32 | 1683,87 | Provete partido | | |
| | | 3 | 1675,00 | 1704,88 | 1721,47 | Provete partido | | |
| | | 4 | 1714,19 | 1667,76 | 1719,78 | 1753,69 | 1696,97 | 1707,48 |
| | | 5 | 1721,05 | 1687,27 | 1720,99 | 1759,55 | 1688,66 | 1700,02 |
| | | 6 | 1716,84 | 1639,30 | 1709,43 | 1745,06 | 1690,09 | 1676,74 |
| | | 7 | Provete partido | | | 1762,24 | 1719,01 | 1737,92 |
| | | 8 | 1690,33 | 1628,94 | 1707,63 | 1731,17 | 1713,14 | 1714,36 |
| | | 9 | 1709,41 | 1655,68 | 1681,55 | 1736,42 | 1696,00 | 1720,69 |
| CL3_10t(ArF) | I3 | 1 | 1675,47 | 1661,67 | 1720,86 | 1732,93 | 1659,04 | 1684,69 |
| | | 2 | 1689,46 | 1690,85 | 1707,68 | 1770,98 | 1669,42 | 1684,13 |
| | | 3 | 1680,98 | 1681,48 | 1702,39 | 1758,67 | 1664,53 | 1704,80 |
| | | 4 | 1715,09 | 1672,39 | 1704,73 | 1785,66 | 1681,16 | 1684,96 |
| | | 5 | 1713,29 | 1718,95 | 1740,29 | 1779,83 | 1683,12 | 1682,45 |
| | | 6 | 1707,72 | 1667,32 | 1710,98 | 1762,60 | 1664,20 | 1700,28 |
| | | 7 | 1696,72 | 1694,13 | 1711,73 | 1764,81 | 1684,36 | 1692,86 |
| | | 8 | 1715,11 | 1671,00 | 1686,54 | 1780,65 | 1699,32 | 1689,76 |
| | | 9 | 1694,98 | 1655,70 | 1679,25 | 1767,90 | 1671,32 | 1689,52 |
| CL3_15t(ArF) | I4 | 4 | 1729,18 | 1696,87 | 1699,89 | 1710,38 | 1670,05 | 1690,77 |
| | | | 1761,35 | 1675,29 | 1720,83 | 1765,67 | 1633,98 | 1698,73 |
| | | | 1766,07 | 1672,25 | 1709,62 | 1725,06 | 1676,99 | 1683,20 |
| | | 4 | 1704,27 | 1658,45 | 1683,94 | 1751,99 | 1689,05 | 1670,89 |
| | | | Provete partido | | | 1746,23 | 1696,24 | 1654,48 |
| | | | 1724,94 | 1699,89 | 1703,47 | 1739,09 | 1667,35 | 1681,33 |
| | | 4 | 1752,62 | 1692,10 | 1692,01 | 1770,38 | 1678,41 | 1665,74 |
| | | | 1766,52 | 1691,48 | 1712,67 | 1823,77 | 1687,63 | 1697,29 |
| | | | 1748,49 | 1707,45 | 1698,85 | 1817,01 | 1690,94 | 1695,31 |
| CL3_25t(ArF) | I5 | 5 | 1748,68 | 1692,40 | 1696,30 | 1776,72 | 1664,82 | 1689,30 |
| | | | 1744,54 | 1715,37 | 1704,44 | 1751,72 | 1668,75 | 1829,44 |
| | | | 1730,51 | 1676,98 | 1786,36 | 1774,00 | 1641,37 | 1666,50 |
| | | 5 | 1738,63 | 1663,30 | 1725,02 | 1730,24 | 1647,03 | 1677,06 |
| | | | 1700,30 | 1691,81 | 1694,06 | 1787,88 | 1655,03 | 1671,93 |
| | | | 1690,59 | 1669,75 | 1687,32 | 1780,55 | 1653,92 | 1654,39 |
| | | 5 | 1704,38 | 1631,05 | 1674,31 | 1772,62 | 1717,47 | 1694,57 |
| | | | 1710,04 | 1659,77 | 1679,00 | 1754,83 | 1682,57 | 1657,97 |
| | | | 1712,33 | 1629,85 | 1695,52 | 1829,16 | 1760,50 | 1681,62 |

A.9. Valores detalhados de caracterização do reboco aplicado no murete de taipa aos 90 dias

- Dureza superficial - durómetro (DS_D)

| DS _D [graus shore-A] | | |
|---------------------------------|--------------|-----|
| | CL3_10t(ArF) | CL3 |
| | 47 | 69 |
| | 65 | 67 |
| | 77 | 66 |
| | 70 | 50 |
| | 65 | 67 |
| Média | 65 | 64 |
| DP | 10 | 7 |

- Dureza superficial – esclerómetro pendular (DS_E)

| Pontos | DS _E [escala Vickers] | | | | | | | | | |
|--------|----------------------------------|----|----|-------|----|-----|----|----|-------|----|
| | CL3_10t(ArF) | | | Média | DP | CL3 | | | Média | DP |
| A | 85 | 87 | 88 | 87 | 1 | 84 | 84 | 87 | 85 | 1 |
| B | 85 | 90 | 91 | 89 | 3 | 83 | 86 | 89 | 86 | 2 |
| C | 75 | 75 | 76 | 75 | 0 | 79 | 72 | 81 | 77 | 4 |

- Velocidade de propagação de ultra-sons

| Distâncias entre pontos [m] | |
|-----------------------------|------|
| AB | 0,05 |
| AC | 0,1 |
| AD | 0,15 |

| CL3_10t(ArF) | | | | | | | |
|-------------------|-------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|---------------------------|
| Níveis | Tempo [μs] | V _{us} [m/s] | Tempo [μs] | V _{us} [m/s] | Tempo [μs] | V _{us} [m/s] | Média de cada nível [m/s] |
| Nível 1 | AB | | AC | | AD | | 866 |
| | 53,7 | 931 | 116,9 | 855 | 185 | 811 | |
| Nível 2 | AB | | AC | | AD | | 758 |
| | 68,2 | 733 | 129,4 | 773 | 195 | 769 | |
| Nível 3 | AB | | AC | | AD | | 635 |
| | 83,2 | 601 | 149,3 | 670 | 236,4 | 635 | |
| Nível 4 | AB | | AC | | AD | | 642 |
| | 90,1 | 555 | 142,3 | 703 | 224,5 | 668 | |
| Média total [m/s] | 725 | | | | | | |
| DP | 104 | | | | | | |

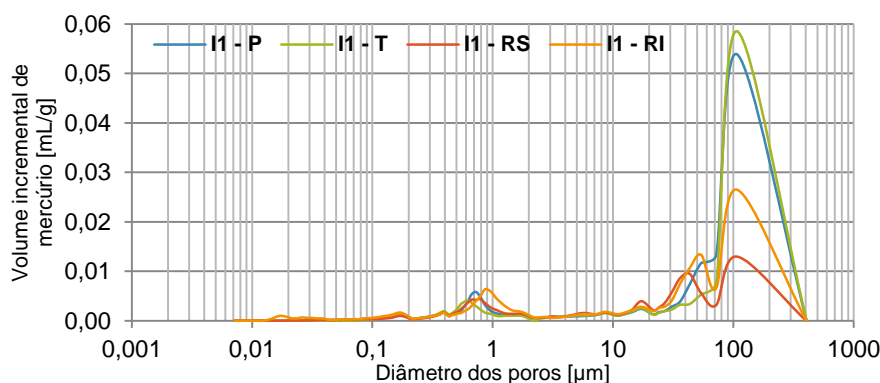
| CL3 | | | | | | | |
|-------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|---------------------------|
| Níveis | Tempo [μs] | V _{us} [m/s] | Tempo [μs] | V _{us} [m/s] | Tempo [μs] | V _{us} [m/s] | Média de cada nível [m/s] |
| Nível 1 | AB | | AC | | AD | | 853 |
| | 51,6 | 969 | 122 | 820 | 194,9 | 770 | |
| Nível 2 | AB | | AC | | AD | | 837 |
| | 54,9 | 911 | 125,3 | 798 | 186,7 | 803 | |
| Nível 3 | AB | | AC | | AD | | 742 |
| | 68,7 | 728 | 135,1 | 740 | 198,1 | 757 | |
| Nível 4 | AB | | AC | | AD | | 529 |
| | 61,3 | 816 | 242,8 | 412 | 417,7 | 359 | |
| Média total [m/s] | 740 | | | | | | |
| DP | 172 | | | | | | |

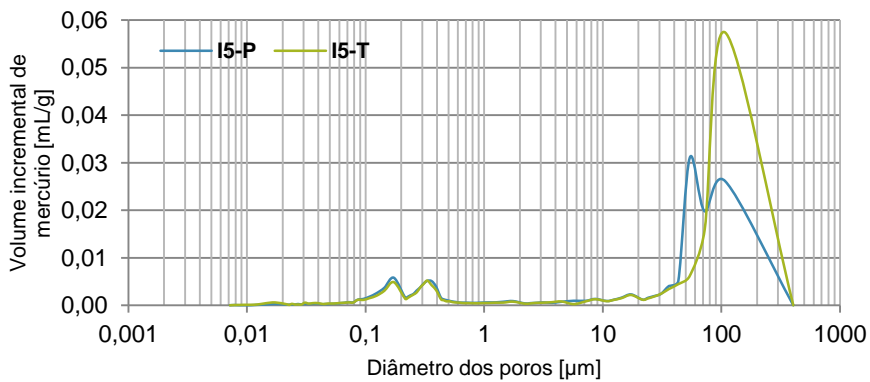
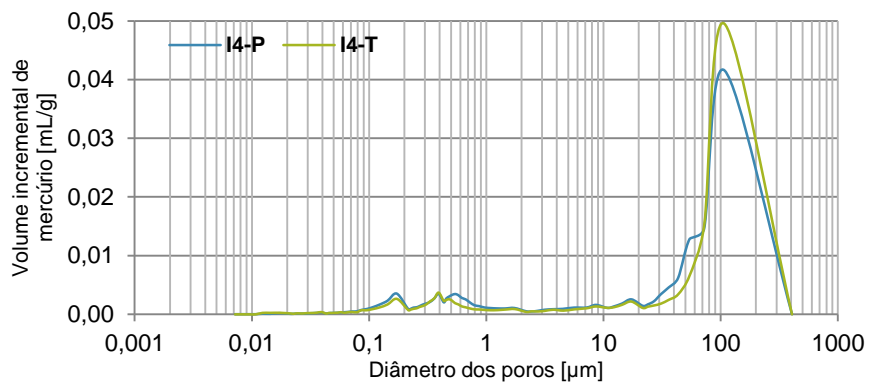
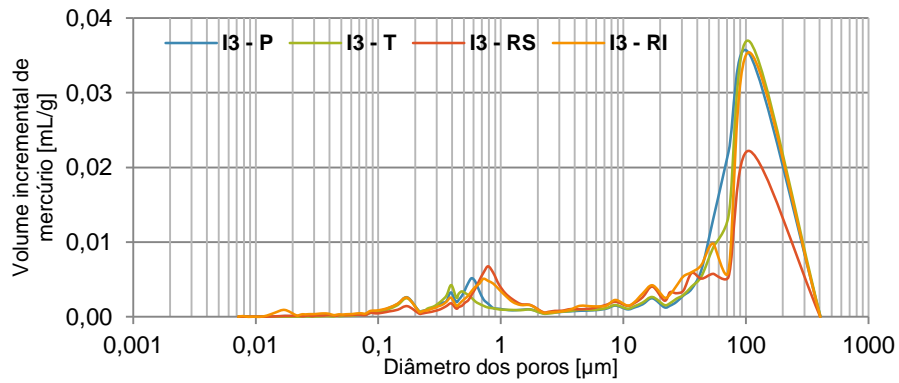
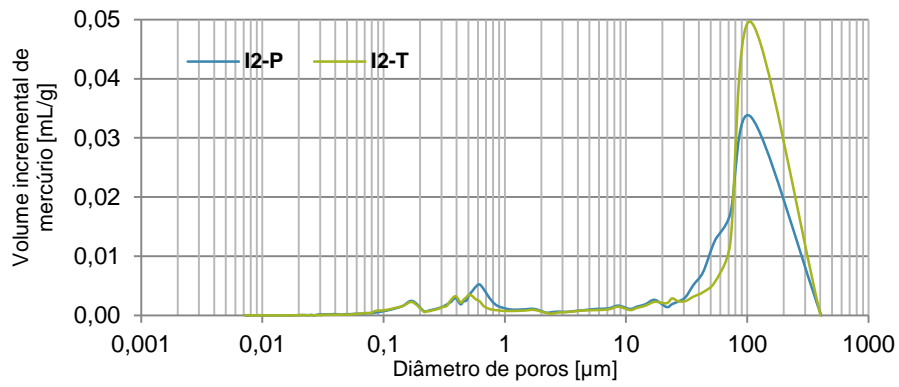
- Absorção de água sob baixa pressão: Tubos de Karsten

| Tempo [minutos] | Quantidade de água absorvida [ml] | | | | | | | |
|-----------------|-----------------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|------|
| | CL3_10t(ArF) | | | | CL3 | | | |
| | Tubo 1 | Tubo 2 | Média | DP | Tubo 3 | Tubo 4 | Média | DP |
| 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 5,20 | 15,70 | 10,45 | 5,25 | 7,50 | 8,90 | 8,20 | 0,70 |
| 10 | 10,20 | 32,20 | 21,20 | 11,00 | 16,50 | 15,70 | 16,10 | 0,40 |
| 15 | 14,60 | 48,20 | 31,40 | 16,80 | 22,40 | 20,30 | 21,35 | 1,05 |
| 30 | 23,90 | 84,30 | 54,10 | 30,20 | 39,30 | 36,30 | 37,80 | 1,50 |
| 60 | 41,90 | 163,30 | 102,60 | 60,70 | 67,30 | 66,30 | 66,80 | 0,50 |

| Argamassas | Tempo para absorver 4 ml | | | |
|--------------|--------------------------|-----------|-------------|------|
| | Segundos | Média [s] | Média [min] | DP |
| CL3_10t(ArF) | 315 | 163 | 239,00 | 3,98 |
| CL3 | 318 | 292 | 305,00 | 5,08 |

A.10. Porosimetria de mercúrio – provetes prismáticos, provetes em suporte de tijolo e reboco aplicado no murete de taipa (90 dias)





A.11. Divulgação de resultados



Vantagens da utilização de terra argilosa e fibras naturais em argamassas de cal aérea

Tema: Tema: Sistemas, processos, tecnologias e materiais de construção

Argamassas de cal aérea, terra e fibras naturais

Tradicionalmente muito utilizadas, em Portugal e pelo Mundo; atualmente utilizadas em muitos países especialmente em países desenvolvidos por questões ecológicas

Vantagens:

- Menor impacto ambiental → ligante menos consumidor de energia face a ligantes hidráulicos; menor incorporação de ligante devido a utilização de terra argilosa; menor utilização de areias por utilização de terra argilosa; utilização de terra argilosa local, minorando necessidades de transporte; controlo de retração pela adição de fibras naturais resultantes de resíduos
- Compatibilidade com edifícios a necessitar de reabilitação de rebocos e de refecimento de juntas e autocoloração, devido aos tons da terra



Campanha experimental

Foram preparadas 2 argamassas de referência de traços volumétricos 1:2 e 1:3, compostas por: Cal aérea cálcica (CL) da LUSICAL e Mistura de 3 Areias siliciosas lavadas e calibradas, na proporção volumétrica de 1 APAS12 + 1,5 APAS20 + 1,5 APAS30. Realizaram-se argamassas com substituições parciais de massa de cal aérea por terra argilosa no traço volumétrico 1:2 e do agregado fino por terra argilosa no traço volumétrico 1:3. Posteriormente, foram ainda adicionadas fibras naturais (vegetais e animais) às argamassas com 25% e 10% de terra dos traços 1:2 e 1:3 respetivamente.

As fibras utilizadas foram casca de arroz, crina de cavalo e lã de ovelha, cada uma em duas dosagens mássicas distintas. A primeira quantidade de fibra utilizada foi determinada empiricamente, pela massa máxima que possibilitou fácil amassadura, e a segunda correspondeu a metade desta mesma quantidade.

Foram efetuados provetes prismáticos 40x40x160 (mm³) e aplicações sobre tijolo, que foram aspergidos durante 4 dias e submetidos a cura em ambiente controlado (20±2°C e 65±5%HR). Foram aplicadas algumas das argamassas com 25% e 10% de terra num reboco sobre um muro de taipa em exposição natural.



Quadro resumo da composição e consistência das argamassas

| Argamassa | Terra [w% CL ou Areia fina] | Fibras [w% CL] | Traço Volumétrico (CL:Terra:Areias) | Traço Ponderal (CL:Terra:Areias) | Rel. Água/(CL+Terra) [-] | Consist. [mm] |
|------------------------|-----------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|---------------|
| CL2 | 0 | 0 | 1:2 | 1:0:7,7 | 1,7 | 147 |
| CL2_5(L) | 5 | 0 | 1:2 | 1:0:18,1 | 1,8 | 150 |
| CL2_10(L) | 10 | 0 | 1:2 | 1:0:18,6 | 1,8 | 155 |
| CL2_25(L) | 25 | 0 | 1:2 | 1:0:3:10,3 | 1,8 | 150 |
| CL2_50(L) | 50 | 0 | 1:2 | 1:1:15,5 | 1,8 | 149 |
| CL2_25(L)_0,5FV | 25 | 9 | 1:2 | 1:0:3:10,3:0,09 | 2,0 | 143 |
| CL2_25(L)_FV | 25 | 18 | 1:2 | 1:0:3:10,3:0,18 | 2,3 | 146 |
| CL2_25(L)_0,5FAcrina | 25 | 5 | 1:2 | 1:0:3:10,3:0,05 | 2,1 | 145 |
| CL2_25(L)_FAcrina | 25 | 10 | 1:2 | 1:0:3:10,3:0,10 | 2,1 | 147 |
| CL2_25(L)_FALã | 25 | 2 | 1:2 | 1:0:3:10,3:0,02 | 2,3 | 159 |
| CL2_25(L)_0,5FALã | 25 | 3 | 1:2 | 1:0:3:10,3:0,03 | 2,0 | 155 |
| CL3 | 0 | 0 | 1:3 | 1:0:11,6 | 2,5 | 151 |
| CL3_5(ArF) | 5 | 0 | 1:3 | 1:0:2:11,4 | 2,1 | 161 |
| CL3_10(ArF) | 10 | 0 | 1:3 | 1:0:4:11,2 | 1,8 | 149 |
| CL3_15(ArF) | 15 | 0 | 1:3 | 1:0:6:11 | 1,8 | 155 |
| CL3_25(ArF) | 25 | 0 | 1:3 | 1:1:1:10,5 | 1,3 | 147 |
| CL3_10(ArF)_0,5FV | 10 | 10 | 1:3 | 1:0:4:11,2:0,10 | 2,1 | 150 |
| CL3_10(ArF)_FV | 10 | 21 | 1:3 | 1:0:4:11,2:0,21 | 2,3 | 142 |
| CL3_10(ArF)_0,5FAcrina | 10 | 6 | 1:3 | 1:0:4:11,2:0,06 | 2,1 | 143 |
| CL3_10(ArF)_FAcrina | 10 | 11 | 1:3 | 1:0:4:11,2:0,11 | 2,1 | 145 |
| CL3_10(ArF)_FALã | 10 | 2 | 1:3 | 1:0:4:11,2:0,02 | 2,3 | 155 |
| CL3_10(ArF)_0,5FALã | 10 | 4 | 1:3 | 1:0:4:11,2:0,04 | 2,1 | 148 |

A campanha experimental continua em curso mas até à data há fortes indícios no sentido de algumas das argamassas estudadas serem muito eficientes para serem aplicadas com vantagens como reboco exterior e interior ou em refecimento de juntas de edifícios antigos ou de paredes de terra

Ensaio de caracterização



Módulo de elasticidade dinâmico

Capilaridade

Resistências à tração e à compressão



Absorção sob baixa pressão

Secagem

Porosimetria



Avaliação in situ



Ultrassons

Condução térmica



HABITAÇÃO, CIDADE, TERRITÓRIO E DESENVOLVIMENTO
Congresso Internacional da Habitação no Espaço Lusófono
2º CIHEL - LNEC - LISBOA - PORTUGAL - 13 A 15 MARÇO 2013

VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DE TERRA ARGILOSA E FIBRAS NATURAIS EM ARGAMASSAS DE CAL AÉREA

Advantages of air lime based mortars with clay and natural fibers

Paulina Faria¹, Vitor Silva², Inês Dias³, Naila Jamu⁴, Pedro Santos⁵



Prof. Paulina Faria
DEC – FCT UNL
Portugal

Eng. Vitor Silva
DEC – FCT UNL
Portugal

Lic. Inês Dias
DEC – FCT UNL
Portugal

Lic. Naila Jamu
DEC – FCT UNL
Portugal

Lic. Pedro Santos
DEC – FCT UNL
Portugal

¹Dep. Eng. Civil, Universidade Nova de Lisboa (Prof. Associado, 2829-516 Caparica, paulina.faria@fct.unl.pt)

²Dep. Eng. Civil, Universidade Nova de Lisboa (Bolseiro, 2829-516 Caparica, vmd.silva@fct.unl.pt)

³Dep. Eng. Civil, Universidade Nova de Lisboa (Mestranda, 2829-516 Caparica, inesmorgadodias@hotmail.com)

⁴Dep. Eng. Civil, Universidade Nova de Lisboa (Mestranda, 2829-516 Caparica, nailaspj@gmail.com)

⁵Dep. Eng. Civil, Universidade Nova de Lisboa (Mestrando, 2829-516 Caparica, pedroacbsantos@hotmail.com)

Palavras-chave: cal aérea, argila, fibras naturais, ligante, agregado, argamassa, caracterização

Resumo

Uma argamassa é tradicionalmente efetuada a partir de uma mistura de agregados finos com um ligante e água. Para utilização em rebocos interiores e exteriores devem utilizar-se argamassas que possuam características que sejam compatíveis com as da parede sobre a qual vão ser aplicadas e com as solicitações a que vão estar sujeitas. Em paredes realizadas com base em terra (através de técnicas de taipa, alvenaria de adobe ou de blocos de terra comprimida) utilizavam-se tradicionalmente argamassas só de terra (em interiores) ou de misturas de terra e cal aérea. Embora recentemente não sejam tão correntes, este tipo de argamassas de terra ou particularmente as mistas são muito utilizadas em alguns países desenvolvidos, como é o caso de vários países do Norte da Europa, particularmente devido a aspetos de sustentabilidade e qualidade do ar ambiente. Noutros países, como é o caso da Escócia, estas argamassas voltaram também a ser usadas para o tratamento e refecimento de juntas de assentamento de alvenarias históricas. A adição de fibras naturais (vegetais ou animais) pode ainda otimizar algumas características deste tipo de argamassas, como sejam através da diminuição da condutibilidade térmica e da suscetibilidade à fendilhação.

Particularmente as argamassas com incorporação de terra são também objeto de projetos internacionais com vista à implementação de cursos profissionais na área, de forma a poderem vir a ser de novo aplicadas por pessoal qualificado. Pelo facto de não se encontrarem devidamente caracterizadas está em curso uma linha de investigação que pretende desenvolver, caracterizar e otimizar este tipo de argamassas com base em cal aérea e argila.

Nesta linha realizaram-se argamassas ao traço volumétrico de 1:2 e 1:3 de cal aérea e areia. A cal aérea utilizada foi a H100 disponibilizada pela LUSICAL. A areia utilizada foi uma mistura de areias siliciosas lavadas e graduadas, constituída por areias de três gamas granulométricas distintas, que tem vindo a ser utilizada nos projetos METACAL e LIMECONTECH. Nas argamassas ao traço 1:2 procedeu-se à substituição gradual de cal aérea por uma terra argilosa (disponibilizada pela SORGILA e escolhida entre argilas com baixa expansibilidade) em quatro dosagens até 50%; nas argamassas ao traço 1:3 procedeu-se à substituição gradual da areia mais fina da mistura por argila, em quatro dosagens até 25%, ou pela adição simples de argila. Nas argamassas mistas que no estado fresco se revelaram como mais interessantes (25% em substituição no caso do traço 1:2 e 10% em adição no caso do traço 1:3), procedeu-se ainda à adição de três tipos de fibras naturais, cada uma em duas dosagens: casca de arroz, *blouces* de lã de ovelha com pelo morto (resíduo da indústria têxtil, disponibilizado pela MULTILÁS) e crina de cavalo; apenas esta última teve de ser previamente cortada.

Todas as argamassas foram caracterizadas no estado fresco, tendo-se registado genericamente uma boa trabalhabilidade e alguma variabilidade face à água. A utilização de algumas das fibras por vezes implicou alterações no procedimento de mistura, mas que poderão facilmente ser implementados em obra.

Foram preparados provetes prismáticos para ensaios de caracterização mecânica, física e química, e também provetes com aplicações sobre a superfície de tijolos, também para incluir a influência da sucção do suporte para caracterização quanto à retração, à dureza superficial e à absorção de água. Todos os provetes foram submetidos a curas em ambiente controlado a 65% de humidade relativa e 20°C de temperatura, com aspersão diária durante os primeiros dias. As argamassas que se revelaram mais interessantes em ensaios preliminares foram aplicadas sobre um murete de taipa em ambiente exterior, no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa, e sobre elas decorre uma campanha de caracterização do mesmo tipo da efetuada sobre tijolo mas a uma escala mais próxima da real. Na aplicação sobre o murete aplicou-se um salpisco da mesma argamassa um pouco mais fluida e depois uma camada de base com a mesma quantidade de água utilizada nos provetes; também se procedeu a aspersão diária durante os primeiros dias de aplicação.

Através da caracterização entretanto efetuada aferiu-se desde já, e de uma forma sistematizada, a viabilidade destas argamassas mistas de cal aérea e argila, eventualmente com fibras naturais, o que comprova o seu uso muito corrente no passado e abre boas perspectivas para uma mais abrangente e renovada utilização no futuro. Em função das características observadas, a sua utilização não tem de restringir-se à aplicação em paredes realizadas com base em terra, mas pode estender-se a outros suportes, nomeadamente a paredes de alvenaria argamassada antigas, tão frequentes também no património arquitetónico do espaço lusófono e, na maioria dos casos, com necessidades de intervenção com vista à sua conservação e manutenção prementes.

Estas argamassas apresentam vantagens económicas, técnicas e ambientais. São vantagens ambientais e económicas poderem utilizar-se menores teores de ligante produzido especificamente, substituindo-o parcialmente por terra argilosa do local, ou menores teores de areia fina explorada e transportada, substituindo-a parcialmente pela terra argilosa, ou traços mais fracos em ligante, adicionando complementarmente terra argilosa, ou ainda a adição de fibras que são resíduos agroindustriais. São vantagens técnicas a obtenção de uma boa trabalhabilidade, uma retração controlada, uma menor condutibilidade térmica e uma compatibilidade com uma grande gama de suportes. Mas estas argamassas apresentam ainda a vantagem de se apresentarem naturalmente pigmentadas, o que pode ser muito interessante para determinados tipos de aplicações, nomeadamente em rebocos e no tratamento de juntas. Pretende-se, através de poster, dar conta desta linha experimental e de alguns dos resultados obtidos.

Agradecimentos

Agradece-se o financiamento aos projetos LIMECONTECH, PQREN/216586/2011 e PIRATE – ECVET Earthbuilding Europe, e às empresas Lusical, Sorgila e Multilás pela disponibilização de materiais.

Referências bibliográficas

- Faria, P. – Argamassas sustentáveis. II CRSEEL – Conferência de Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono. Caparica, FCT UNL, 26-27 Abril 2012 (CD-rom).
- Faria, P.; Amado, M.P.; Cartaxo, F. – Produção local de materiais para a sustentabilidade da construção. Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia (CLME 2011), J. Silva Gomes et al. (Ed.), Maputo, Setembro 2011, 373-378.