



Tânia Raquel Alves dos Santos

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Argamassas de terra para rebocos interiores

Ensaio de caracterização e influência da formulação

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

Orientador: Maria Paulina Faria Rodrigues, Professora Associada, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professor Doutor Armando Manuel Sequeira Nunes Antão
Arguente: Doutora Maria do Rosário da Silva Veiga
Vogal: Professora Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Julho de 2014

‘Copyright’ Tânia Raquel Alves dos Santos, 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

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à orientadora desta dissertação de mestrado, Professora Doutora Paulina Faria, pela sua excelente orientação que, com a sua exigência, conhecimento, disponibilidade permanente e vontade de querer sempre mais e melhor, me proporcionou uma experiência enriquecedora com a realização da presente dissertação.

Há também que agradecer ao Engenheiro Vítor Silva pelo acompanhamento de todo o trabalho experimental e pelo apoio e esclarecimento das dúvidas que surgiram.

Ao Arquiteto José Lima pela ajuda prestada na realização dos provetes de argamassas formuladas em laboratório.

Um agradecimento ao Joachim Reinecke, da empresa EMBARRO, pela disponibilização das argamassas pré-doseadas de terra e pelos constituintes das argamassas formuladas em laboratório, assim como pela ajuda disponibilizada na realização dos provetes de argamassa formuladas em laboratório.

Ao Miguel Teixeira pela ajuda prestada nos últimos ensaios da campanha experimental.

Ao meu namorado Joaquim Miguel Grancho por todo o apoio, confiança, amizade e principalmente pela paciência e compressão demonstradas ao longo destes últimos dois anos de curso que nunca me deixou ir a baixo e desistir. Os concelhos e a força transmitida foram essenciais para o meu crescimento enquanto pessoa e em todo o meu percurso tanto na vida académica como fora dela.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais e irmã. Ao meu pai Francisco Santos, pois apesar de já ter partido, o desejo dele era que eu concluísse um curso académico e sempre que alguma adversidade acontecia no meu caminho era nele que pensava para ir buscar as forças necessárias para superar e alcançar o objetivo; foi por ele que nunca desisti porque ele foi, é e sempre será o meu herói e o meu exemplo de vida. À minha mãe Sara Dias, pelo apoio incondicional, pela confiança, força, amizade, conselhos transmitidos e acima de tudo pela paciência.

Queria agradecer a todos os meus amigos, dentro e fora da faculdade, que com os momentos de estudo, de divertimento, de partilha, de cansaço mas também de descanso, estiveram sempre presente, mas também aqueles que estiveram presente e quando mais precisei me viraram as costas pois foram esses que, ao contrário do que pensam, me tornaram mais forte. À Inês Ruivo, ao Paulo Reguengos, à Sofia Alves, ao Sérgio Pires e à minha "Mira" pelo apoio, compreensão, conselhos, companheirismo e união dos últimos tempos. Ao Paulo Pintassilgo, pela ajuda na tradução da norma alemã.

Por fim, queria agradecer à Ana Maria Grancho, ao Carlos Grancho e à Ana Isabel Grancho pelo apoio, compreensão, conselhos e amizade que me transmitiram, mas também às minhas pequeninas Jéssica e Patrícia pelos vossos sorrisos, beijinhos e abraços apertados nos bons e nos maus momentos.

RESUMO

As argamassas de terra foram muito utilizadas no passado em Portugal para rebocos interiores e para o assentamento de algumas alvenarias revestidas. Durante algumas décadas a sua utilização cessou e o conhecimento empírico inerente à sua aplicação praticamente perdeu-se.

As qualidades ecológicas das argamassas de terra já são bem conhecidas. A eficiência técnica destas argamassas quando aplicadas em sistemas de reboco e, particularmente, as suas características, necessitam de ser avaliadas através de procedimentos normalizados, de modo a poderem ser comparadas entre diferentes argamassas à base de terra e com os requisitos de argamassas de reboco.

O interesse por este tipo de argamassas tem aumentado a nível científico e da indústria. A prova desse interesse é o facto de a Alemanha ter publicado em 2013 uma norma DIN que estabelece os termos, definições, requisitos e métodos de ensaio de argamassas de terra sem estabilização química por outro ligante para rebocos.

A presente dissertação tem como por objetivo estabelecer procedimentos experimentais e caracterizar várias argamassas de terra, umas pré-doseadas outras formuladas em laboratório com diferentes areias e adições (fibras e material de mudança de fase), para que seja possível determinar as propriedades, vantagens e desvantagens em relação a outros tipos de argamassas.

A principal conclusão é que as argamassas de terra, que só podem ser utilizadas no exterior eficientemente protegidas, constituem sistemas de reboco interior eco-eficientes. Este tipo de argamassas, com baixa energia incorporada em termos de matérias-primas utilizadas, apresentam características mecânicas e físicas que cumprem genericamente os requisitos definidos para rebocos interiores. A higroscopicidade destas argamassas pode ser salientada como uma das vantagens; tendo em conta que têm a capacidade de adsorver e libertar grandes quantidades de vapor de água, podem contribuir para a melhoria do conforto interior dos espaços. Quando incorporado um material de mudança de fase nas argamassas de terra, estas apresentam um decréscimo ao nível da sua resistência.

Termos chave: reboco, argamassa, terra, fibra vegetal, PCM, ensaio, caracterização

ABSTRACT

Earth mortars were heavily used in the past in Portugal for interior plasters and as masonry mortar of some rendered walls. For some decades their use has ceased and empirical knowledge inherent to its application practically lost.

The environmental qualities of the earth mortars are well known. The efficiency of plasters and particularly the characteristics of earth mortars need to be evaluated by standard procedures, so they can be compared between different mortars and with plaster requirements.

The interest on this type of mortar has increased in the scientific and industrial communities. The proof of this interest is the fact that Germany had published in 2013 one DIN standard that establishes the terms, definitions, requirements and test methods for earth mortars without chemical stabilization.

This dissertation is aimed at establishing experimental testing procedures and to characterize several earth mortars, some prebatched and other formulated in the laboratory with different sands and additions (fiber and phase change material). The properties of the mortars are determined and can be compared to other types of mortars. Advantages and disadvantages are highlighted.

The main conclusion is that earth mortars can only be used as renders if efficiently protected but are eco-efficient plasters. With low embodied energy in terms of materials, they present mechanical and physical characteristics that generically fulfill plastering requirements. The hygroscopicity of these mortars is one of the advantages, taking into account that they have the ability to adsorb and release large quantities of water vapor and, therefore, contribute to improve the indoor comfort. The mechanical resistance show a decrease when a phase change material is included in the mortar' composition.

Keywords: plaster, mortar, earth, vegetal fiber, PCM, test, characterization

SIMBOLOGIA

Argamassas

CS – Argamassa ao traço volumétrico 1:3 (argila: areia grossa) e com 17% (volume total) de água

CS_PCM20 – Argamassa com base no traço vol. 1:3 (argila: areia grossa), com 17% (vol. total) de água e 20% do volume de areia grossa substituída por PCM

CS45_FS30 – Argamassa ao traço vol. de 1:3 (argila: agregado) em que 45% do agregado é areia grossa e 30% é areia fina, com 20% (vol. total) de água

CS30_FS45 – Argamassa ao traço vol. 1:3 (argila: agregado) em que 30% do agregado é areia grossa e 45% é areia fina, com 20% (vol. total) de água

CS30_FS25_PCM20 – Argamassa com base no traço vol. 1:3 (argila: agregado) em que 30% do agregado é areia grossa, 25% é areia fina e 20% de PCM, com 20% (vol. total) de água

CS30_FS15_PCM30 – Argamassa com traço vol. 1:3 (argila: agregado) em que 30% do agregado é areia grossa, 15% é areia fina e 30% de PCM, com 20% (vol. total) de água

CS30_FS45_F5 – Argamassa com traço vol. de 1:3 (argila: agregado) em que 30% do agregado é areia grossa e 45% é areia fina, com 5% do volume total de fibras, com 25% (vol. total) de água

FS – Argamassa com traço vol. de 1:3 (argila: areia fina) e com 20% (vol. total) de água

FS_PCM20 – Argamassa com base no traço vol. 1:3 (argila: areia fina), com 20% (vol. total) de água e 20% do volume de areia fina substituída por PCM

P – Argamassa pré-doseada (com fibras e areia fina) com 20% (vol. total) de água

P₀_L – Argamassa pré-doseada da fase experimental inicial, realizada em laboratório

P₀_W – Argamassa pré-doseada da fase experimental inicial

Ensaio e determinações

Ab – Abrasão

Ad. – Aderência ao suporte

CC – Coeficiente de capilaridade

Csup – Coesão superficial

DP – Desvio-padrão

DSdur – Dureza superficial por durómetro

Ed – Módulo de elasticidade dinâmico

IS – Índice de secagem

MV_{aparente} – Massa volúmica aparente (estado endurecido)

Rc – Resistência à compressão

R_{dva} – Resistência a difusão do vapor de água

Rt – Resistência à tração (por flexão)

Sd – Espessura da camada de ar de difusão de vapor de água equivalente

TS – Taxa de secagem

u_{US} – Velocidade de propagação de ultrassons

λ – Condutibilidade térmica

ÍNDICE DE TEXTO

| | |
|---|-----------|
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1. Motivação e enquadramento do tema | 1 |
| 1.2. Objetivos e metodologia | 3 |
| 1.3. Plano e estrutura de trabalho | 3 |
| 2. A terra como material de construção | 5 |
| 2.1. Considerações gerais | 5 |
| 2.2. Terra (ou solo) | 7 |
| 2.3. Composição da terra | 9 |
| 2.4. Propriedades da terra como material de construção | 11 |
| 2.5. Impacto energético e ambiental | 13 |
| 3. Argamassas de terra | 15 |
| 3.1. Considerações gerais | 15 |
| 3.2. Agregados e adições | 15 |
| 3.3. Caso particular da adição de fibras | 17 |
| 3.4. Preparação da argamassa de terra | 17 |
| 3.5. Características gerais das argamassas | 18 |
| 3.6. Características das argamassas de terra | 19 |
| 3.6.1. Reação ao fogo | 19 |
| 3.6.2. Humidade do ar interior | 20 |
| 3.6.3. Conforto térmico | 20 |
| 3.6.4. Salubridade do ar interior | 21 |
| 3.6.5. Renovação do ar interior | 21 |
| 3.6.6. Toxicidade do ar interior | 22 |
| 3.6.7. Conforto acústico | 22 |
| 4. Nanotecnologias em argamassas | 23 |
| 4.1. Considerações gerais | 23 |
| 4.2. Materiais de mudança de fase | 23 |
| 4.3. Desempenho dos materiais de mudança de fase em argamassas | 28 |
| 4.3.1. Ensaio com célula de teste | 29 |
| 4.3.2. Termografia | 29 |
| 5. Normalização e procedimentos de ensaio de argamassas de terra | 31 |
| 5.1. Considerações gerais | 31 |
| 5.2. Teor de sais | 32 |
| 5.3. Preparação de argamassas e provetes de ensaio | 32 |
| 5.4. Retração linear por secagem | 32 |
| 5.5. Massa volúmica aparente | 33 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5.6. | Resistências à flexão e à compressão | 33 |
| 5.7. | Aderência ao suporte | 34 |
| 5.8. | Resistência à difusão do vapor de água | 34 |
| 5.9. | Condutibilidade térmica..... | 35 |
| 5.10. | Reação ao fogo | 35 |
| 5.11. | Resistência à abrasão..... | 35 |
| 5.12. | Adsorção do vapor de água | 36 |
| 6. | Planificação da campanha experimental | 39 |
| 6.1. | Caracterização dos suportes | 39 |
| 6.2. | Caracterização dos materiais constituintes das argamassas..... | 40 |
| 6.3. | Caracterização das argamassas..... | 40 |
| 6.3.1. | Ensaio no estado fresco e realização provetes | 40 |
| 6.3.2. | Ensaio no estado endurecido – provetes simples | 41 |
| 6.3.3. | Ensaio no estado endurecido – rebocos e provetes de argamassa sobre tijolo e blocos de betão | 42 |
| 7. | Materiais, constituição das argamassas, rebocos e provetes | 43 |
| 7.1. | Constituintes das argamassas | 43 |
| 7.1.1. | Argamassas pré-doseadas..... | 43 |
| 7.1.2. | Terra argilosa..... | 43 |
| 7.1.3. | Água e areia | 43 |
| 7.1.4. | Fibras | 44 |
| 7.1.5. | Material de mudança de fase | 44 |
| 7.2. | Constituição e produção das argamassas..... | 45 |
| 7.3. | Aplicação de rebocos de argamassa de terra nos muretes | 47 |
| 7.4. | Execução de provetes de argamassa..... | 47 |
| 8. | Caracterização dos suportes e da argamassa da fase experimental inicial..... | 51 |
| 8.1. | Suportes – Absorção de água sob baixa pressão | 51 |
| 8.2. | Produto pré-doseado | 52 |
| 8.2.1. | Baridade | 52 |
| 8.2.2. | Análise granulométrica | 53 |
| 8.2.3. | Reação ao fogo | 54 |
| 8.3. | Argamassa no estado fresco | 55 |
| 8.3.1. | Consistência por espalhamento | 55 |
| 8.3.2. | Massa volúmica | 56 |
| 8.3.3. | Teor de ar | 56 |
| 8.3.4. | Retenção de água | 57 |
| 8.3.5. | Consistência por penetrómetro | 58 |
| 8.3.6. | Teor de água | 59 |
| 8.3.7. | Retração linear por secagem | 59 |
| 8.3.8. | Abaixamento por espalhamento..... | 60 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 8.4. | Argamassa no estado endurecido – provetes simples | 61 |
| 8.4.1. | Massa volúmica aparente | 62 |
| 8.4.2. | Condutibilidade térmica | 62 |
| 8.4.3. | Módulo de elasticidade dinâmico | 64 |
| 8.4.4. | Resistência à tração por flexão | 65 |
| 8.4.5. | Resistência à compressão | 66 |
| 8.4.6. | Absorção de água por capilaridade | 66 |
| 8.4.7. | Secagem | 69 |
| 8.4.8. | Resistência à difusão do vapor de água | 70 |
| 8.4.9. | Adsorção do vapor de água | 73 |
| 8.4.10. | Resistência à abrasão | 74 |
| 8.4.11. | Porosimetria de mercúrio | 75 |
| 8.5. | Argamassa no estado endurecido – provetes sobre tijolo | 76 |
| 8.5.1. | Condutibilidade térmica | 76 |
| 8.5.2. | Velocidade de propagação dos ultrassons | 77 |
| 8.5.3. | Dureza superficial por durómetro | 78 |
| 8.5.4. | Coesão superficial | 79 |
| 8.5.5. | Aderência ao suporte | 80 |
| 8.5.6. | Resistência à abrasão | 81 |
| 8.5.7. | Porosimetria de mercúrio | 81 |
| 8.6. | Argamassa no estado endurecido – reboco dos muretes | 82 |
| 8.6.1. | Dureza superficial por durómetro | 82 |
| 8.6.2. | Resistência superficial por esclerómetro | 83 |
| 8.6.3. | Velocidade de propagação dos ultrassons | 84 |
| 8.6.4. | Coesão superficial | 85 |
| 8.6.5. | Resistência superficial e deformabilidade com choque da esfera | 85 |
| 8.6.6. | Aderência ao suporte | 87 |
| 8.6.7. | Porosimetria de mercúrio | 87 |
| 8.7. | Síntese da caracterização da argamassa pré-doseada de terra da fase experimental inicial | 88 |
| 8.7.1. | Resultados da argamassa | 88 |
| 8.7.2. | Procedimentos de ensaio | 94 |
| 9. | Caracterização das argamassas formuladas em laboratório | 95 |
| 9.1. | Constituintes das argamassas | 95 |
| 9.1.1. | Baridade | 95 |
| 9.1.2. | Análise granulométrica | 96 |
| 9.1.3. | Reação ao fogo | 97 |
| 9.2. | Argamassas no estado fresco | 97 |
| 9.2.1. | Consistência por espalhamento | 97 |
| 9.2.2. | Massa volúmica | 97 |
| 9.2.3. | Retração por secagem | 97 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 9.3. | Argamassas no estado endurecido – provetes simples | 98 |
| 9.3.1. | Massa volúmica aparente..... | 98 |
| 9.3.2. | Condutibilidade térmica | 98 |
| 9.3.3. | Módulo de elasticidade dinâmico | 99 |
| 9.3.4. | Resistência à tração por flexão | 100 |
| 9.3.5. | Resistência à compressão | 100 |
| 9.3.6. | Absorção de água por capilaridade..... | 101 |
| 9.3.7. | Secagem..... | 101 |
| 9.3.8. | Resistência à difusão do vapor de água | 102 |
| 9.3.9. | Adsorção do vapor de água | 103 |
| 9.4. | Argamassa no estado endurecido – provetes sobre o tijolo e bloco de betão | 103 |
| 9.4.1. | Condutibilidade térmica | 103 |
| 9.4.2. | Velocidade de propagação dos ultrassons | 104 |
| 9.4.3. | Dureza superficial por durómetro | 105 |
| 9.4.4. | Coesão superficial | 105 |
| 9.4.5. | Aderência ao suporte..... | 106 |
| 9.4.6. | Resistência à abrasão | 106 |
| 9.4.7. | Análise termográfica..... | 107 |
| 9.5. | Argamassa no estado endurecido – reboco dos muretes | 108 |
| 9.5.1. | Dureza superficial por durómetro | 108 |
| 9.5.2. | Velocidade de propagação dos ultrassons | 108 |
| 9.6. | Síntese dos resultados das argamassas formuladas em laboratório | 110 |
| 10. | Discussão e comparação dos resultados | 113 |
| 10.1. | Matéria-prima e estado fresco | 113 |
| 10.2. | Estado endurecido | 114 |
| 10.3. | Comparação de resultados com outros autores | 124 |
| 10.4. | Características das argamassas de terra face aos locais de aplicação | 127 |
| 11. | Conclusões | 129 |
| 11.1. | Considerações finais..... | 129 |
| 11.2. | Propostas de trabalhos futuros | 130 |
| | Bibliografia | 131 |
| | Anexos..... | 135 |
| A.1. | Ficha Técnica do PCM | 135 |
| A.2. | Resultados individuais obtidos na caracterização da argamassa da fase experimental inicial | 136 |
| A.3. | Resultados individuais obtidos na caracterização das argamassas formuladas em laboratório | 150 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Construções com terra a nível mundial..... | 6 |
| Figura 2.2 – Construções em terra na região do Alentejo | 7 |
| Figura 2.3 – a) b) c) d) e) f) Degradação dos rebocos em construções de terra; g) h) Problemas decorrentes da aplicação de argamassas exteriores de cal e cimento sobre construções de terra; i) Problemas decorrentes da aplicação de argamassas de reboco interior em construções de terra | 8 |
| Figura 2.4 – Constituição do solo | 9 |
| Figura 2.5 – Representação esquemática de partículas de argila..... | 9 |
| Figura 3.1 – Exemplo de uma misturadora mecânica..... | 18 |
| Figura 4.1 – Oferta mundial de energia primária total de combustível em 2010 | 23 |
| Figura 4.2 – Energia consumida através do setor da construção nos EUA | 24 |
| Figura 4.3 – Processo de mudança de fase de um PCM | 26 |
| Figura 4.4 – Classificação dos materiais de mudança de fase segundo Abhat | 26 |
| Figura 4.5 – Distribuição das diferentes categorias de PCM em função da entalpia e da temperatura de fusão | 27 |
| Figura 4.6 – a) Cápsula em bola metálica; b) Bolas esféricas; c) PCM em alumínio; d) PCM em painéis de alumínio; e) PCM em polipropileno; f) Encapsulamento em tubo | 28 |
| Figura 5.1 – Dispositivo de carregamento e realização do ensaio de corte | 35 |
| Figura 5.2 – a) Realização do ensaio de abrasão <i>in situ</i> ; b) Realização do ensaio de abrasão em laboratório | 36 |
| Figura 5.3 – Efeito do ensaio de abrasão sobre várias amostras de argamassas de terra..... | 36 |
| Figura 7.1 – Argamassa pré-doseada da fase experimental inicial | 43 |
| Figura 7.2 – Argila | 44 |
| Figura 7.3 – Areia fina; Areia branca grossa..... | 44 |
| Figura 7.4 – Fibras vegetais de palha de aveia cortada e PCM utilizados | 45 |
| Figura 7.5 – Observação visual do reboco aplicado num dos muretes de alvenaria - cor, textura e presença das fibras vegetais | 45 |
| Figura 7.6 – Muretes de alvenaria de tijolo furado, de adobe, de blocos de betão e de pedra argamassada; Proteção dos muretes vista pela fachada Sul | 47 |
| Figura 7.7 – Degradação da argamassa de terra no lado Sul dos muretes | 48 |
| Figura 7.8 – Mistura em laboratório da argamassa pré-doseada; Molde de 500x200x15 [mm] em aço inoxidável; Preparação dos provetes circulares de 90 mm de diâmetro e 15 mm e 2 mm de espessura | 49 |
| Figura 8.1 – Aplicação dos tubos de Karsten sobre os tijolos do murete de tijolo furado | 51 |
| Figura 8.2 – Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten nos suportes ao fim de 1h | 52 |
| Figura 8.3 – Material necessário para o ensaio de baridade; Ensaio de baridade à argamassa pré-doseada | 53 |
| Figura 8.4 – Peneiros de malha quadrada e máquina de vibração horizontal; Amostra recolhida em cada peneiro | 54 |
| Figura 8.5 – Curva granulométrica da argamassa pré-doseada..... | 54 |

| | |
|---|----|
| Figura 8.6 – a) Aspeto da argamassa de terra sobre a mesa de espalhamento; b) Aspeto da argamassa após as 15 pancadas da mesa de espalhamento; c) Medição do espalhamento..... | 55 |
| Figura 8.7 – Aspeto da argamassa no recipiente próprio para o ensaio de teor de ar; Equipamento para determinação do teor de ar..... | 57 |
| Figura 8.8 – Conjunto invertido com um peso de 2 kg; Aspeto das folhas de papel de filtro após o ensaio | 58 |
| Figura 8.9 – Penetrómetro e molde com argamassa; Escala de medição do penetrómetro; Aspeto da argamassa após o ensaio..... | 59 |
| Figura 8.10 – Caixa de contraplacado marítimo com o provete de argamassa de terra..... | 60 |
| Figura 8.11 – Ensaio de abaixamento..... | 60 |
| Figura 8.12 – Esquema de ensaios aos provetes prismáticos, circulares e planares | 61 |
| Figura 8.13 – Medição das dimensões dos provetes prismáticos | 62 |
| Figura 8.14 – Ensaio de condutibilidade térmica nas bolachas de argamassas; Equipamento ISOMET 2104 e ensaio de condutibilidade térmica nos prismas de argamassa..... | 63 |
| Figura 8.15 – Resultados obtidos no ensaio de condutibilidade térmica nos diversos provetes..... | 63 |
| Figura 8.16 – Equipamento “ZEUS Resonance Meter” e provete em ensaio..... | 64 |
| Figura 8.17 – Equipamento Zwick/Rowell Z050; Ensaio de resistência à tração por flexão | 65 |
| Figura 8.18 – Ensaio de Resistência à compressão; Aspeto do provete após o ensaio de resistência à compressão | 66 |
| Figura 8.19 – Ascensão capilar a meia altura do provete impermeabilizado com película aderente de polietileno; Provede impermeabilizado com resina <i>epóxi</i> | 68 |
| Figura 8.20 – Curvas de absorção de água por capilaridade correspondentes a cada tipo de impermeabilização | 68 |
| Figura 8.21 – Provetes com impermeabilização com película aderente de polietileno durante o ensaio de secagem; Provetes com impermeabilização com resina <i>epóxi</i> | 69 |
| Figura 8.22 – Curvas de secagem correspondentes a cada tipo de impermeabilização | 70 |
| Figura 8.23 – Representação do método de tina seca e tina húmida..... | 71 |
| Figura 8.24 – Preparação da cápsula com água destilada e algodão; Conjunto de ensaio; Ensaio de resistência à difusão do vapor de água | 72 |
| Figura 8.25 – Relação linear entre a variação de massa e o tempo decorrido no ensaio de resistência à difusão do vapor de água | 72 |
| Figura 8.26 – Impermeabilização dos provetes circulares de 90 mm de diâmetro e 15 e 20 mm de espessura; Impermeabilização do provete prismático de 500x200x15 [mm]; Ensaio de adsorção do vapor de água | 73 |
| Figura 8.27 – Curvas de adsorção e desadsorção do vapor de água dos vários provetes..... | 74 |
| Figura 8.28 – Escova com o dispositivo adequado ao ensaio; Aspeto dos provetes circulares após o ensaio..... | 74 |
| Figura 8.29 – Resultados obtidos no ensaio de abrasão com diferentes tipos de escovas | 75 |
| Figura 8.30 – Curva de distribuição do tamanho do diâmetro dos poros em argamassa simples | 76 |
| Figura 8.31 – Ensaio de condutibilidade térmica em argamassa sobre tijolo; Esquema dos pontos analisados | 77 |

| | |
|--|----|
| Figura 8.32 – Esquemas de: a) transmissão direta dos transdutores; b) transmissão semi-direta dos transdutores; c) transmissão indireta dos transdutores..... | 78 |
| Figura 8.33 – Equipamento do ensaio de velocidade de propagação de ultrassons e provete de argamassa sobre tijolo com os pontos a ensaiar; Esquema dos pontos analisados..... | 78 |
| Figura 8.34 – Durómetro Shore A, PCE Group; Ensaio de dureza superficial..... | 79 |
| Figura 8.35 – Aplicação da fita-cola sobre o tijolo; Material retido na fita-cola..... | 79 |
| Figura 8.36 – Tipologias de rotura definidas pela norma EN 1015-12..... | 81 |
| Figura 8.37 – Corte da área de ensaio sobre o tijolo; Aplicação das pastilhas metálicas de 50 mm de diâmetro sobre a argamassa; Ensaio de aderência ao suporte sobre o tijolo..... | 81 |
| Figura 8.38 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à abrasão da argamassa sobre tijolo com escova dura e média..... | 81 |
| Figura 8.39 – Curva de distribuição do tamanho do diâmetro dos poros em argamassa sobre o tijolo..... | 82 |
| Figura 8.40 – Ensaio de dureza superficial por durómetro Shore A no reboco sobre um murete..... | 82 |
| Figura 8.41 – Resultados de dureza superficial por durómetro nos rebocos aplicados sobre diversos muretes..... | 83 |
| Figura 8.42 – Ensaio de resistência superficial com esclerómetro pendular num reboco..... | 83 |
| Figura 8.43 – Resultados de resistência superficial com esclerómetro pendular nos rebocos aplicados em diversos muretes..... | 84 |
| Figura 8.44 – Ensaio da velocidade de propagação dos ultrassons; Esquema de medição do ensaio da velocidade de propagação dos ultrassons pelo método utilizado..... | 84 |
| Figura 8.45 – Resultados de velocidade de propagação dos ultrassons do reboco aplicado sobre os diversos muretes..... | 84 |
| Figura 8.46 – Fita adesiva com o material retido; Mapeamento das zonas de ensaio..... | 85 |
| Figura 8.47 - Resultados do ensaio de coesão superficial em duas faixas dos rebocos sobre os muretes em condições climáticas diferentes..... | 85 |
| Figura 8.48 – Esquema do aparelho de <i>Martinet-Baronnie</i> e do ensaio do choque da esfera..... | 86 |
| Figura 8.49 – Equipamento de <i>Martinet-Baronnie</i> ; Medição do diâmetro da moessa; Moessa provocada pelo equipamento..... | 86 |
| Figura 8.50 – Resultados obtidos no ensaio de resistência superficial com choque da esfera sobre os rebocos aplicados nos muretes, em diferentes condições climáticas..... | 87 |
| Figura 8.51 – Rotura na interface pastilha/argamassa; Rotura na interface argamassa/suporte..... | 87 |
| Figura 8.52 – Curva de distribuição do tamanho do diâmetro dos poros em argamassa de rebocos aplicada sobre diferentes muretes..... | 88 |
| Figura 8.53 – Efeito de cada escova nos provetes circulares..... | 92 |
| Figura 9.1 – Ensaio de baridade dos PCM; Ensaio de baridade das fibras vegetais..... | 95 |
| Figura 9.2 – Resultados médios e desvio-padrão do ensaio de baridade..... | 96 |
| Figura 9.3 – Curvas granulométricas da argamassa pré-doseada P e dos constituintes das argamassas formuladas em laboratório..... | 96 |
| Figura 9.4 – Resultados obtidos no ensaio de consistência por espalhamento..... | 97 |
| Figura 9.5 – Resultados obtidos de massa volúmica das argamassas..... | 98 |
| Figura 9.6 – Resultados médios e desvios-padrão de retração diametral por secagem em provetes circulares com 90 mm de diâmetro..... | 98 |

| | |
|---|-----|
| Figura 9.7 – Resultados médios e desvios-padrão da massa volúmica aparente..... | 99 |
| Figura 9.8 – Resultados médios e desvio padrão da condutibilidade térmica aferida nos provetes circulares e prismáticos | 99 |
| Figura 9.9 – Resultados em termos médios e desvio-padrão do módulo de elasticidade dinâmico | 100 |
| Figura 9.10 – Resultados em termos médios e desvio-padrão de resistência à tração por flexão | 100 |
| Figura 9.11 – Resultados em termos médios e desvio-padrão de resistência à compressão | 101 |
| Figura 9.12 – Curvas de capilaridades correspondentes a cada argamassa | 101 |
| Figura 9.13 – Curvas de secagem correspondentes a cada argamassa..... | 102 |
| Figura 9.14 – Resultados da difusão do vapor de água das argamassas | 102 |
| Figura 9.15 – Curvas de adsorção e desadsorção obtidas no ensaio de adsorção de vapor de água.... | 103 |
| Figura 9.16 – Ensaio de condutibilidade térmica sobre os blocos de betão | 104 |
| Figura 9.17 – Resultados da condutibilidade térmica da argamassa aplicada em tijolo e bloco de betão | 104 |
| Figura 9.18 – Resultados em termos médios e desvio-padrão da velocidade de propagação dos ultrassons..... | 104 |
| Figura 9.19 – Resultados em termos médios e desvio-padrão da dureza superficial sobre os tijolos | 105 |
| Figura 9.20 – Resultados em termos médios e desvio-padrão da coesão superficial das argamassas sobre tijolo..... | 105 |
| Figura 9.21 – Ensaio de aderência ao suporte no provete de argamassa sobre o tijolo; Ensaio de aderência ao suporte no provete de argamassa sobre o bloco de betão | 106 |
| Figura 9.22 – Resultados em termos médios e desvio-padrão da aderência das argamassas ao tijolo e ao bloco de betão | 106 |
| Figura 9.23 – Aspeto do tijolo após o ensaio de resistência à abrasão; Material recolhido durante o ensaio de resistência à abrasão | 107 |
| Figura 9.24 – Resultados em termos médios e desvio-padrão da abrasão das argamassas no tijolo | 107 |
| Figura 9.25 – Termogramas obtidos no ensaio de termografia em que: a) P; b)FS_PCM20; c) CS30_FS45; d) CS30_FS25_PCM20; e) CS30_FS15_PCM30; f) CS30_FS45_F5 | 108 |
| Figura 9.26 – Resultados em termos médios e desvio-padrão da dureza superficial por durómetro dos rebocos no murete de tijolo..... | 109 |
| Figura 9.27 – Ensaio de velocidade de propagação de ultrassons sobre faixas de rebocos de argamassa no murete de tijolo | 109 |
| Figura 9.28 – Resultados obtidos no ensaio de velocidade de propagação dos ultrassons | 109 |
| Figura 10.1 – Consistência por espalhamento e massa volúmica das argamassas e limites definidos pela norma DIN 18947 | 113 |
| Figura 10.2 – Consistência por espalhamento e razão água/terra das diferentes argamassas formuladas em laboratório | 114 |
| Figura 10.3 – Massa volúmica das argamassas no estado endurecido e limites inferiores das classes de massa volúmica definidas pela norma DIN 18947 | 115 |
| Figura 10.4 – Condutibilidade térmica das diferentes argamassas em diferentes provetes | 115 |
| Figura 10.5 – Relação entre a massa volúmica aparente e a condutibilidade térmica das argamassas de terra..... | 116 |
| Figura 10.6 – Resistências mecânicas das diferentes argamassas | 116 |

| | |
|--|-----|
| Figura 10.7 – Relação entre a condutibilidade térmica e as resistências à compressão e à tração das argamassas de terra | 117 |
| Figura 10.8 – Relação entre a massa volúmica aparente e a resistência à compressão das argamassas | 117 |
| Figura 10.9 – Relação entre a massa volúmica aparente e a resistência à tração por flexão das argamassas de terra | 118 |
| Figura 10.10 – Relação entre a resistência à tração e o módulo de elasticidade dinâmico | 118 |
| Figura 10.11 – Relação entre a resistência à compressão e ao módulo de elasticidade dinâmico | 118 |
| Figura 10.12 – Resultados obtidos no ensaio de aderência e valores mínimos definidos pelas classes de aderência ao suporte definidas pela norma DIN 18947 | 119 |
| Figura 10.13 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à abrasão e os valores máximos das classes definidas na norma DIN 18947 | 119 |
| Figura 10.14 – Resultados obtidos no ensaio de coesão superficial | 120 |
| Figura 10.15 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à difusão do vapor de água | 120 |
| Figura 10.16 – Distribuição do tamanho dos poros das amostras da argamassa P ₀ analisadas – sobre muretes de alvenaria, sobre tijolo e de provetes simples, sem suporte poroso..... | 121 |
| Figura 10.17 – Distribuição do tamanho dos poros das amostras da argamassa P ₀ no intervalo entre 0,01 µm e 10 µm em amostra de argamassa sobre murete pedra, betão e adobe | 122 |
| Figura 10.18 – Resultados obtidos no ensaio de adsorção de vapor de água | 124 |

ÍNDICE DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 2.1 – Frações granulométricas dos solos..... | 10 |
| Quadro 3.1 – Gamas de algumas características de argamassas para aplicação em edifícios antigos.... | 19 |
| Quadro 3.2 – Classificação das propriedades das argamassas endurecidas segundo a norma NP EN 998-1 | 19 |
| Quadro 5.1 – Massa volúmica de argamassa de reboco de terra | 33 |
| Quadro 5.2 – Classe de resistência de rebocos de terra | 34 |
| Quadro 5.3 – Ensaio de resistência ao fogo de argamassas de reboco de terra | 35 |
| Quadro 5.4 – Abrasão máxima do reboco | 36 |
| Quadro 5.5 – Classes de adsorção do vapor de água de argamassas de reboco de terra | 37 |
| Quadro 6.1 – Ensaio a realizar aos suportes e documentos de base ao procedimento de ensaio..... | 40 |
| Quadro 6.2 – Ensaio a realizar aos constituintes das argamassas e documentos de base ao procedimento de ensaio..... | 40 |
| Quadro 6.3 – Ensaio a realizar à argamassa no estado fresco e documentos de base ao procedimento de ensaio..... | 41 |
| Quadro 6.4 – Ensaio realizado aos provetes de argamassa no estado endurecido e documentos de base ao procedimento de ensaio..... | 41 |
| Quadro 6.5 – Ensaio a realizar ao reboco aplicado nos muretes, à argamassa sobre o tijolo e sobre o bloco de betão e documentos de base ao procedimento de ensaio | 42 |
| Quadro 7.1 – Designação e composição das argamassas..... | 46 |
| Quadro 7.2 – Provetes realizados com argamassas produzidas em fevereiro de 2014 | 49 |
| Quadro 8.1 – Valores médios e desvio-padrão do coeficiente de absorção para cada suporte | 52 |
| Quadro 8.2 – Pressão de saturação em função da temperatura | 71 |
| Quadro 8.3 – Resultados obtido no ensaio de porosimetria de mercúrio | 76 |
| Quadro 8.4 – Resultados obtidos no ensaio de porosimetria de mercúrio | 82 |
| Quadro 8.5 – Resultados obtidos através do ensaio de porosimetria de mercúrio | 88 |
| Quadro 8.6 – Resultados médios e desvios-padrões das amassaduras da argamassa P0 no estado fresco | 89 |
| Quadro 8.7 - Resultados médios e desvios-padrão da retração nos provetes da argamassa P0 | 89 |
| Quadro 8.8 – Resultados obtidos, em termos médios e de desvio-padrão, nos ensaios de resistência, de absorção capilar, de secagem e de resistência à difusão do vapor de água..... | 90 |
| Quadro 8.9 - Resultados obtidos, em termos médios e de desvios-padrão, no ensaio de condutibilidade térmica | 90 |
| Quadro 8.10 – Resultados obtidos, em termos médios e desvio-padrão, nos ensaios de aderência ao suporte, abrasão, coesão superficial, dureza superficial e resistência superficial por esclerómetro e choque de esfera | 91 |
| Quadro 8.11 – Resultados médios do ensaio de adsorção de vapor de água | 93 |
| Quadro 8.12 – Resultados obtidos no MIP para massa volúmica aparente e porosidade, e de massa volúmica aparente também por método geométrico | 93 |
| Quadro 9.1 – Traços volumétricos das argamassas formuladas..... | 95 |

| | |
|---|-----|
| Quadro 9.2 – Traços em massa das argamassas formuladas | 96 |
| Quadro 9.3 – Resultados obtidos nos ensaios de caracterização no estado fresco | 110 |
| Quadro 9.4 - Resultados médios e desvios-padrão obtidos nos ensaios realizados às argamassas com os diferentes provetes..... | 111 |
| Quadro 9.5 – Resultados em termos médios e desvio-padrão de adsorção e desadsorção do vapor de água dos provetes de argamassa | 112 |

DISSEMINAÇÃO DE RESULTADOS

No âmbito da campanha experimental desenvolvida na presente dissertação já foram realizadas algumas publicações preliminares:

SANTOS, T.; FARIA, P.; SILVA, V. (2014) – Caracterização de argamassa pré-doseada de terra. Argamassas 2014 - I Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento, Univ. Coimbra, 5-6 Junho de 2014 (CD, ID04).

FARIA, P.; SANTOS, T.; SILVA, V. (2014) – Earth-based mortars for masonry plastering. 9th International Masonry Conference, 7-9 July 2014, Univ. Minho, Guimarães (CD, ID 1333).

Foi submetido a revista científica o artigo:

“Avaliação de argamassas de terra para rebocos interiores”. Construlink

Com base apenas na caracterização da argamassa pré-doseada da fase experimental inicial estão atualmente a ser ultimados para submissão a revistas científicas os seguintes artigos:

“Characterization of an earth plasters – A contribution for the establishment of test procedures for an international standard”. Building and Environment.

“Earth plasters – Assessment of characteristic based on different formulation”. Construction and Building Materials.

Foram submetidos e estão a aguardar aprovação os seguintes resumos para artigos:

“Thermohygrometric behaviour of earthen plasters for sustainable housing construction”. 40th IAHS World Congress on Housing. Sustainable Housing Construction. Funchal, 16-19 December 2014.

“Argamassas de terra. Comportamento higratérmico em função da granulometria da areia”. PATORREB 2015 – 5ª Conferência sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, 26-28 Março 2015, Porto, FEUP.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação e enquadramento do tema

A terra é um material disponível em qualquer parte do Mundo, razão pela qual as argamassas de terra têm vindo a ser utilizadas desde há milhares de anos tanto em simples formas como em estruturas complexas, constituindo assim um importante património da Humanidade.

No passado, as argamassas de terra foram muito utilizadas, nomeadamente em rebocos interiores de paredes construídas com terra (nas técnicas construtivas monolíticas da taipa, em alvenarias de adobe ou em paredes ligeiras de tabique) mas também em paredes de alvenaria de pedra argamassada. Foram também muito usadas como argamassas de assentamento em alvenarias por exemplo de xisto [Santos et al., 2014]. Ao longo do tempo, em Portugal, as argamassas de terra começaram a ser esquecidas e, devido a este facto, são poucas as pessoas que ainda conhecem as suas técnicas de formulação e aplicação.

As possibilidades de utilização da terra como material de construção têm evoluído nos últimos anos em todo o Mundo, permitindo que esta possa ser cada vez mais utilizada. Atualmente, na construção nova existe um reconhecimento crescente da validade das técnicas construtivas da terra, que caíram em desuso mas estão de novo a chamar à atenção dos intervenientes da construção devido à consciencialização face à ecoeficiência baseada no uso de recursos locais reutilizáveis.

As vantagens associadas ao uso das argamassas de terra residem no facto da terra ser uma matéria-prima abundante, podendo muitas vezes ser utilizada para a construção a terra escavada para a execução de estruturas enterradas. Por outro lado, a sua utilização não necessita de processos de transformação dispendiosos em termos de energia. A utilização da terra em argamassas pode contribuir para a melhoria do comportamento térmico e acústico. A terra pode ser reutilizada, desde que não estabilizada com ligantes, é incombustível e não é tóxica. Para além destes aspetos e no que respeita à utilização da terra em argamassas de reboco interior, destacam-se ainda eventuais qualidades estéticas, juntamente com efeitos benéficos a nível do clima interior e de bem-estar geral, tais como a capacidade de contribuir para regular a humidade relativa do ar interior [Lima, 2013; Pires, 2013]. Esta última vantagem advém das argamassas de terra serem muito permeáveis ao vapor de água e muito higroscópicas. Para além disso, o seu comportamento mecânico é semelhante ao de uma parede de terra. Esta situação faz com que estas argamassas sejam mais compatíveis com estas paredes (e com paredes de características mecânicas semelhantes) do que as argamassas à base de cimento que, apesar de apresentarem melhor comportamento face à ação da água, são excessivamente rígidas para este tipo de alvenarias [Hamard et al., 2013]. A aparência, cor, granulometria e tratamentos de superfície, com a eventual contribuição de adições tais como fibras, oferecem possibilidades infinitas a argamassas deste tipo. Estas argamassas de terra (argilosa) não estabilizada por adição de ligantes, devido à sua constituição, são também conhecidas pela rápida degradação sob ação da água e daí não poderem ser aplicadas quando se prevê contacto direto com a chuva incidente [Jamú, 2013].

As técnicas atualmente utilizadas, na construção e na reabilitação de construções com terra, surgem de forma geral como uma evolução dos processos ancestrais. Mantêm, no entanto, um carácter essencialmente empírico e não estão ainda totalmente adaptadas às novas realidades e exigências. De facto, a perda do saber relativo às artes tradicionais, bem como a falta de conhecimento sobre os processos de

degradação dos materiais de terra e da sua compatibilidade com os materiais modernos de construção, nem sempre permitem uma correta especificação das técnicas a utilizar, quer em construção nova, quer na conservação e reabilitação de construções existentes [Gomes, 2013].

Em Portugal os recursos naturais necessários à construção com terra existem de forma abundante. Contudo, na maior parte das construções a construir, reabilitar, reparar ou manter, não são em geral tomadas em consideração as características específicas da matéria-prima original nem do próprio sistema construtivo. Isto conduz ao aparecimento prematuro de anomalias nos edifícios (muitas vezes após um curto intervalo de tempo após a intervenção). A um nível nacional, as técnicas inadequadas adotadas frequentemente para este tipo de construção, a falta de documentos de referência, a falta de formação específica dos técnicos nesta área, nomeadamente a escassez de cursos de formação para a aquisição e atualização de conhecimentos, não permitem responder adequadamente às exigências emergentes, levando a soluções menos duráveis e ao aparecimento de anomalias expressivas nos edifícios [Gomes, 2013].

Um exemplo do interesse e atualidade dos rebocos de terra é a nova norma alemã sobre estas argamassas, DIN 18947 [NABau, 2013], especificamente para argamassas de terra sem qualquer estabilização química por outros ligantes. Esta norma mostra a importância e a necessidade da definição de termos, requisitos e métodos de ensaio para este tipo de produto de construção.

É importante caracterizar as argamassas de terra no seu estado fresco mas também no seu estado endurecido. A adição de fibras é um aspeto relevante, uma vez que é frequentemente referida na literatura especializada como podendo ser um bom contributo para a diminuição da retração nas argamassas assim como contribui para melhorar a trabalhabilidade [Röhlen & Ziegert, 2011]. Estudos realizados mostram ainda que a resistência à tração aumenta com a utilização de uma pequena percentagem de fibras, tanto naturais como artificiais, enquanto a resistência à compressão diminui. No caso de elevadas quantidades de fibras não há melhorias no comportamento e pode, em certos casos, ser prejudicial. O tamanho e a forma das fibras são fatores importantes a ter em conta [Aymerich et al., 2012; Binici et al., 2005; Ghavami et al., 1999; Yetgin et al., 2008, citados por Jamú, 2013]. Podem também surgir melhorias na resistência ao corte e um aumento da coesão [Prabakar & Sridhar, 2002, citados por Jamú, 2013].

Esta dissertação desenvolve-se na continuação dos projetos “Parede Eco-estrutural” e “PIRATE” e de um seminário e *workshop* sobre rebocos de terra que teve lugar no Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL). Durante o *workshop*, que teve lugar com a parceria da empresa EMBARRO, uma argamassa pré-doseada de terra comercializada por esta empresa foi preparada e aplicada sobre diferentes muretes experimentais, localizados na Estação de Exposição Natural de Revestimentos do DEC da FCT-UNL. A Estação Experimental fica a cerca de 3 km da costa atlântica. Os rebocos de argamassa de terra aplicados nos muretes foram caracterizados *in situ*. A mesma argamassa foi produzida em laboratório. Paralelamente, vários provetes de argamassa foram produzidas em laboratório com a mesma argamassa pré-doseada de terra preparada *in situ* e caracterizados em laboratório [Faria et al, 2014]. Nesta fase experimental, para além da caracterização da argamassa, procedeu-se ainda a uma análise dos procedimentos de ensaio, com base na norma DIN [NABau, 2013] mas também em normalização e procedimentos experimentais implementados nos laboratórios da Construção do DEC.

Numa fase experimental seguinte, procedeu-se à preparação de diversas argamassas constituídas pela mesma terra argilosa, com dois tipos de areias, com um tipo de fibras e um tipo de material de mudança

de fase (PCM – *Phase Change Material*), variando as proporções na formulação. Foram preparados provetes, que foram, por sua vez, caracterizados.

1.2. Objetivos e metodologia

O objetivo desta dissertação é contribuir para um mais aprofundado conhecimento de argamassas de terra para rebocos. Em termos específicos pretende-se avaliar as características físicas e mecânicas de um conjunto de argamassas formuladas com uma terra nacional sem qualquer tipo de ligante, exceto a própria argila. Esta caracterização será realizada através de ensaio de provetes em laboratório e, em condições mais aproximadas da realidade, de rebocos de argamassa aplicados sobre vários suportes de alvenaria – no caso, muretes experimentais de alvenaria de pedra argamassada, de blocos de betão, de adobes e de tijolo furado.

Com vista aos objetivos definidos procede-se à avaliação das características de uma argamassa pré-doseada utilizada num *workshop* que decorreu em julho de 2013 na FCT-UNL. Para além desta argamassa pré-doseada foi ainda avaliada uma argamassa pré-doseada semelhante fornecida pela empresa EMBARRO e nove novas argamassas com um traço volumétrico de 1:3 (terra argilosa: areia), realizadas em laboratório em fevereiro de 2014. O objetivo do estudo destas argamassas é o de avaliar a influência de adição de fibras, de diferentes granulometrias e proporções de areias e de diferentes quantidades de um material de mudança de fase.

Com vista aos objetivos definidos procede-se à caracterização das argamassas com base na norma alemã DIN 18947 [NABau, 2013] sobre argamassas de terra para reboco, publicada em 2013, para além de outros documentos normativos e procedimentos de ensaio estabelecidos propositadamente.

1.3. Plano e estrutura de trabalho

Primeiramente realizou-se uma pesquisa bibliográfica sobre o tema proposto, de forma a tomar conhecimento sobre o tema, o tipo de ensaios a realizar e as adaptações necessárias aos ensaios devido à especificidade das argamassas de terra fase ao vento e à água. De seguida realizou-se um planeamento sequencial dos ensaios, das durações e dos materiais necessários, bem como as condições de ambiente controlado em que os mesmos se iriam realizar. Concluída toda a fase de ensaios, iniciou-se a análise, a discussão dos resultados obtidos e concluiu-se o trabalho.

Dividiu-se assim o texto em capítulos que se descrevem de seguida.

A **Introdução**, o primeiro e presente capítulo, inclui o enquadramento do tema, a descrição dos objetivos estabelecidos e do plano de trabalhos seguido.

O segundo capítulo, **A terra como material de construção**, abrange a bibliografia pesquisada dividida por tópicos relacionados com o tema, onde se insere as propriedades da terra enquanto material de construção, a composição da terra e o impacto ambiental e energético provocado pela sua utilização.

Argamassas de terra constitui o terceiro capítulo, que detalha os constituintes complementares das argamassas de terra, particularizando as adições de fibras, a preparação das argamassas de terra, assim como as características das argamassas em geral e as de terra em particular.

Nanotecnologias em argamassas é o quarto capítulo, onde, de forma sintética, se refere a utilização de materiais de mudança de fase em argamassas e ensaios que permitam avaliar o desempenho destes materiais nas argamassas.

No quinto capítulo, **Normalização e procedimentos de ensaios de argamassas de terra**, refere-se a norma alemã e os ensaios definidos por esta e por outros autores.

A **Planificação da campanha experimental** constitui o sexto capítulo, onde é explicada a estrutura, sequência e organização dos ensaios realizados às argamassas em cada fase.

Materiais, constituição das argamassas, rebocos e provetes constitui o sétimo capítulo, que dá a conhecer os materiais que constituem a argamassa pré-doseada de terra da fase experimental inicial e as restantes argamassas de terra, assim como os ensaios necessários para a caracterização destes materiais; aborda-se a constituição e produção das argamassas, a aplicação dos rebocos e a execução dos provetes.

No oitavo capítulo, **Caracterização dos suportes e da argamassa a fase experimental inicial**, apresentam-se a argamassa e os ensaios e resultados de caracterização dos diferentes muretes de suporte, assim como os ensaios e resultados da caracterização da argamassa da fase experimental inicial no estado fresco e no estado endurecido, aplicada nos muretes de alvenaria de pedra argamassada, de blocos de betão, de tijolo furado e de adobe, bem como a partir dos provetes realizados em laboratório.

Caracterização das argamassas formuladas em laboratório constitui o nono capítulo, no qual se apresentam os ensaios e os resultados da caracterização no estado fresco e no estado endurecido das argamassas formuladas em laboratório, seguindo os ensaios e procedimentos de ensaio definidos como mais adequados no capítulo anterior.

No décimo capítulo, de **Discussão e comparação dos resultados**, tal como o nome indica realiza-se uma discussão cuidada dos resultados obtidos ao longo de toda a campanha experimental realizada para todas as argamassas, assim como a comparação com resultados de outros autores.

Por fim, as **Conclusões** constituem o décimo primeiro capítulo, onde se apresenta uma síntese do trabalho desenvolvido.

Seguem-se as referências bibliográficas mencionadas ao longo do trabalho e que o sustentam.

Em anexo apresentam-se as tabelas de resultados individuais obtidos em cada ensaio e trecho da ficha técnica do material de mudança de fase utilizado.

2. A TERRA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

2.1. Considerações gerais

A terra é o material de construção mais antigo que se conhece. Há construções de terra datadas de há mais de 9000 anos [Minke, 2006] mas existem registos até já do período pré-histórico [Bruno et al., 2010]. Este material tem sido utilizado em todo o mundo durante milhares de anos, sendo atualmente um material de construção também contemporâneo.

A construção em terra tradicional, como aliás toda a construção tradicional, assentava em conhecimentos empíricos. O conhecimento do material e das suas características físicas era escasso, o que colocava dificuldades relativamente a um fator essencial para a construção de terra – a escolha da matéria-prima relativamente estável e com características apropriadas para a construção. Mas, por outro lado, a experiência e o conhecimento eram passados de mestres para aprendizes, de pais para filhos, ao longo de gerações [Faria et al., 2010].

A falta de conhecimentos relativamente a aspetos de resistência estrutural e processos construtivos apropriados, mas principalmente a associação a construção de fracos recursos financeiros, foram motivos para considerar esta técnica construtiva pobre e fraca. De facto, a terra como material de construção não tem uma resistência mecânica elevada a esforços de compressão quando comparada com outros materiais atuais, para além de praticamente não resistir a esforços de tração. Tendo em conta os padrões atuais de segurança e durabilidade das construções, não será lógico nem sensato fazer uma apologia da construção em terra simples para qualquer tipo de aplicação, sem recurso a outros materiais complementares. Atualmente, e para credibilizar a sua utilização, foi necessário aprofundar os conhecimentos e racionalizar processos e técnicas construtivas.

A terra é ainda hoje um dos materiais mais utilizados na construção das habitações, pela sua abundância e acessibilidade, de fácil extração e transformação, totalmente reutilizável e reciclável, incombustível, sendo o seu ciclo de vida caracterizado por um reduzido impacto ambiental e energético [Minke, 2006]. Devido a todas estas características a terra é amplamente utilizada em inúmeras zonas do mundo, estando em geral, mas nem sempre, diretamente relacionada com a escassez de recursos financeiros das populações.

A partir da década de 80, os problemas energéticos e económicos sentidos a nível mundial, e o interesse por questões ambientais e ecológicas conduziram a uma mudança de mentalidades nos escalões privilegiados das sociedades desenvolvidas e a terra, como material de construção, deixou de ser sinónimo de desconforto e pobreza para começar a ser vista como um material alternativo e valorizado. Nas últimas décadas começou assim a haver um interesse renovado, quer a nível internacional, quer nacional, pela arquitetura de terra. Reconhece-se que a utilização de uma forma sistemática dos recursos materiais locais minimiza o impacto ambiental [Morel et al. 2001 citado por Gomes, 2013]. A terra apresenta a sua maior valia no baixo consumo energético aliado à sua produção. Para além disso a terra não gera resíduos, ao contrário de outros materiais de construção frequentemente utilizados, na sua preparação, transporte e aplicação [Minke, 2006; Gomes, 2013].

A utilização da terra em argamassas de reboco apresenta propriedades muito importantes para a melhoria da qualidade e conforto do ambiente interior dos edifícios, sendo por isso recomendadas para os

revestimentos de paramentos interiores e tetos, destacando-se ainda a elevada capacidade de absorção de vapor de água e a ausência de toxicidade, contribuindo assim para o equilíbrio higrométrico dos ambientes interiores e, conseqüentemente, para a suavização dos problemas de saúde associados a estados limite de humidade [Lima, 2013]. Para além destas características, as argamassas de reboco de terra apresentam um bom contributo para a melhoria do comportamento térmico e acústico, para além de vantagens ambientais associadas à economia de energia no fabrico.

Na atualidade um terço da população mundial vive em construções de terra, sendo que nos países em desenvolvimento, este valor aumenta para metade da população (Figura 2.1) [Minke, 2006].



Figura 2.1 – Construções com terra a nível mundial [Grandeau e Delboy, citado por Anger et al. 2011 e Gomes, 2013]

No futuro, em especial nos países em desenvolvimento, prevê-se que a terra como material de construção continue a assumir um papel muito relevante, dada a urgente necessidade de promover uma grande quantidade de habitações condignas para as populações desses países. No contexto atual do Mundo, mesmo nos países desenvolvidos, é pouco expectável que os materiais e sistemas construtivos industrializados consigam assegurar o programa sustentável da humanidade [Minke, 2006].

Portugal tem uma tradição construtiva que se identifica com as técnicas empregues na bacia do Mediterrâneo, sendo um dos países que mais construiu em terra em todo o mundo (Figura 2.1). No Sul da Europa recorreu-se essencialmente à terra, não apenas por questões de maior abundância, mas também por maior conveniência em termos de conforto higrotérmico. O mesmo aconteceu em Portugal, essencialmente no Sul do País, até meados do século passado, altura em que se introduziu nesta região a estrutura de betão armado e se passou a recorrer com mais frequência à alvenaria de tijolo cozido (Figura 2.2).

As argamassas de terra, em que o ligante é a argila, foram muito utilizadas no passado, como já foi referido anteriormente. Hoje em dia, materiais com base em cimento são normalmente utilizados, inclusive para a reparação de paramentos de taipa ou de alvenaria de adobe, levando a resultados menos duráveis e ao aparecimento de anomalias expressivas nas edificações [Kita, 2013] (Figura 2.3 g), h) e i)).

Estudos sobre argamassas com base em cimento ou cal, no seu estado fresco ou endurecido, são comuns. Todavia, existem muitas lacunas no conhecimento sobre argamassas de terra [Kita, 2013].



Figura 2.2 – Construções em terra na região do Alentejo

2.2. Terra (ou solo)

A definição do que é uma terra (ou solo) não é exatamente a mesma para um Engenheiro, para um Geólogo ou para um leigo. Para um Engenheiro, solo é o material orgânico ou inorgânico que se sobrepõe ao maciço rochoso. Segundo a especificação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil E-219 [LNEC, 1968], solo é *“todo o conjunto natural de partículas que podem ser separadas por agitação em água. No entanto, apesar de esta definição aparentar referir-se apenas às partículas, na palavra solo inclui-se normalmente, para além destas, a água e o ar”* [Antão, 2011].

O solo é constituído maioritariamente por materiais que resultam do intemperismo (ou meteorização) das rochas, por desintegração física (fragmentação mecânica da rocha), química (minerais alterados ou dissolvidos por reações químicas) ou de origem biológica (rocha adulterada por ação direta de organismos vivos). Estas, quando expostas na superfície da Terra, estão sujeitas à ação de processos naturais de aquecimento e arrefecimento (dia/noite), à ação do vento e da água que se infiltra através das fissuras. A estes processos que desintegram e/ou decompõem a rocha, dá-se o nome de intemperismo [Gomes, 2013].

Após o intemperismo da rocha, o solo começa a sofrer transformações e começa a organizar-se em horizontes paralelos à superfície do terreno, com aspeto e características distintas, nomeadamente características físicas, químicas, mineralógicas, biológicas e microestruturais, levando à formação de um perfil.

O solo é constituído por matéria mineral e matéria orgânica, contendo ainda espaços vazios (poros) que são preenchidos por água ou ar. A matéria orgânica é proveniente de organismos animais ou vegetais, vivos ou em processos de decomposição, e denominam-se por húmus. A matéria mineral é proveniente da desagregação da rocha mãe, variando em composição consoante a proporção e natureza dos diferentes

constituíntes minerais [Gomes, 2013]. No caso de o solo ter sido movido do seu local de origem pela ação da gravidade, pela água ou pelo vento, define-se como um solo sedimentar [Antão, 2011].



Figura 2.3 – a) b) c) d) e) f) Degradação dos rebocos em construções de terra; g) h) Problemas decorrentes da aplicação de argamassas exteriores de cal e cimento sobre construções de terra; i) Problemas decorrentes da aplicação de argamassas de reboco interior em construções de terra

O solo é um meio trifásico, por ter constituintes nas três fases da matéria: as partículas sólidas (fase sólida), a água (fase líquida) e o ar (fase gasosa) (Figura 2.4). No caso de o solo não conter água, este diz-se seco e no caso de não conter ar, diz-se saturado [Antão, 2011].

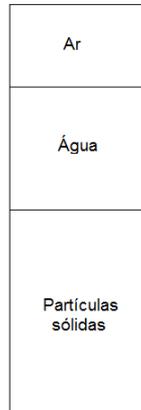


Figura 2.4 – Constituição do solo [Antão, 2011]

As partículas sólidas, quando resultam da desagregação mecânica das rochas, têm uma forma que depende de fatores como a rocha de que derivam, a idade e o processo de transporte. Estas partículas têm habitualmente dimensões superiores a 0,002 mm e podem apresentar formas que variam de muito angulosas a arredondadas. No caso de ocorrer um processo químico a interferir na formação do solo, as partículas têm habitualmente dimensões inferiores a 0,002 mm, sendo estas partículas designadas por partículas de argila, apresentando uma forma lamelar (Figura 2.5).



Figura 2.5 – Representação esquemática de partículas de argila [Gomes Correia citado por Antão, 2011]

De acordo com a especificação E-219 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil [LNEC, 1968] as principais frações granulométricas são as que se indicam no Quadro 2.1.

A partir daqui vai optar-se sempre pela designação de terra para o material.

2.3. Composição da terra

Para fabricar, preparar e aplicar corretamente um material de construção para uma finalidade específica é necessária uma compreensão fundamental da matéria-prima a partir do qual é feito. No caso de materiais de construção de terra é necessário entender-se acima de tudo que os agentes de ligação na terra são os minerais de argila [Röhlen e Ziegert, 2011].

Quadro 2.1 – Frações granulométricas dos solos [LNEC, 1968]

| Fração | | Dimensão [mm] |
|---------------|---------------|----------------------|
| Argila | | < 0,002 |
| Silte | Fino | 0,002 a 0,006 |
| | Médio | 0,006 a 0,02 |
| | Grosso | 0,02 a 0,06 |
| Areia | Fina | 0,06 a 0,2 |
| | Média | 0,2 a 0,6 |
| | Grossa | 0,6 a 2 |
| Seixo | Fino | 2 a 6 |
| | Médio | 6 a 20 |
| | Grosso | 20 a 60 |
| Calhau | | 60 a 150 |
| Pedra | | >150 |

Vários autores da especialidade referem que nem todas as terras servem para construir; a terra das camadas superficiais deve ser rejeitada, uma vez que apresenta uma grande quantidade de matéria orgânica, absorvendo muita água, sendo altamente compressível. A terra geralmente mais aconselhada para a construção designa-se como subsolo ou horizonte B, contendo grande percentagem de matéria mineral e é pobre em matéria orgânica [BS 1377-3, 1990; Walker e Australia, 2001; Hall e Djerbib, 2004a e Lehmbau Regeln, 2009 citados por Gomes, 2013].

A escolha correta da matéria-prima é o fator fundamental para garantir o sucesso na aplicação da terra na construção. Através de procedimentos simples de ensaios laboratoriais, é possível conhecer a granulometria relativa à composição de determinada terra e aferir sobre a sua adequabilidade para a construção. Esta escolha prende-se essencialmente com dois fatores: o seu comportamento face à água e a sua resistência mecânica (sendo que o segundo aspeto seja obviamente influenciado pelo primeiro). De modo muito geral, o estudo da granulometria permite distinguir as percentagens de elementos constituintes da terra pelos seus componentes [Torraca, 2009].

A composição da terra depende do local de onde esta é extraída, podendo as características variar de região para região. A terra é uma mistura composta por argila, silte, areia, e por vezes também incluindo pedras de pequenas dimensão, como as gravilhas e os cascalhos, que se encontra disponível na natureza (Quadro 2.1). Segundo Torraca (2009), a composição da terra para a construção deve conter 20 a 30% de argila e silte e 70 a 80% de areia.

A gravilha, a areia e o silte cumprem a função de agregados, criando o esqueleto granular, conferindo-lhe volume e massa, devendo no seu conjunto dispor de uma granulometria diversificada, de modo a proporcionar maior resistência mecânica à argamassa. Por sua vez a argila cumpre a função de ligante ou aglutinante, à semelhança do cimento, da cal ou do gesso nas argamassas convencionais, dando coesão aos agregados, permitindo o endurecimento da argamassa e podendo ser responsável pela eventual retração de rebocos de argamassa de terra [Lima, 2013; Hamard et al., 2013].

Argila

A terra usada para a construção deve ser rica o suficiente em argila para poder ser plástica quando molhada e dura quando seca; deve ser evitado o excesso de argila, pois causa retração e fendas quando existe variação do teor de humidade [Torraca, 2009].

A argila é um material de construção natural composto por minerais rochosos coesivos e não coesivos. A quantidade, o tipo e o tamanho das partículas definem as propriedades da respetiva argila. Os

minerais de argila funcionam como ligante. Uma particularidade dos minerais argilosos é a sua grande superfície, comparativamente com outros materiais, bem como a sua reatividade intercrystalina [Ziegert, 2011]. Através da distinção dos minerais argilosos (de duas ou três camadas) é possível fazer uma avaliação qualitativa sobre a adequação de um determinado tipo de argila.

O processo de endurecimento da argila caracteriza-se por ser realizado apenas por secagem, permitindo-lhe retomar a plasticidade original através da adição de água no estado líquido. Esta capacidade confere-lhe assim a possibilidade de reutilização, enquanto nos restantes ligantes o processo de endurecimento, ou presa, constitui uma reação química irreversível, impossibilitando o seu reaproveitamento futuro [Mateus, 2002 citado por Lima, 2013].

Agregados

Os constituintes minerais presentes na terra de construção apresentam características bastante distintas entre si: os cascalhos e as areias são elementos estáveis quando secos. Porém, a areia apresenta alguma coesão quando húmida. Estes elementos não podem ser utilizados na construção com terra sem argila. Os siltes são elementos que apresentam alguma instabilidade sob diferentes graus de humidade e relativamente boa coesão quando húmidos; quando em presença da água apresentam como propriedades a plasticidade e a coesão, caracterizam-se ainda por serem instáveis, referindo-se como estabilidade a capacidade dos materiais manterem as suas características em diferentes condições de humidade [Gomes, 2013].

2.4. Propriedades da terra como material de construção

Desde sempre, que o Homem foi encontrando soluções e desenvolvendo técnicas para construir abrigos de proteção, conseguindo vencer as barreiras colocadas pela Natureza. Os materiais utilizados, as técnicas escolhidas e os conhecimentos envolvidos são consequência natural da sociedade de cada época. As tradições de construção utilizando a terra como material de construção foram diferindo não só de acordo com a qualidade da própria terra e com o clima, mas também com a cultura, os locais e as experiências transmitidas.

As propriedades da terra que são responsáveis pelas suas inúmeras vantagens são, simultaneamente responsáveis pela maioria das suas fragilidades construtivas. Desta forma, a terra tem de ser aplicada de modo adequado tendo em consideração as suas características próprias, como acontece por exemplo com a madeira.

A terra é um material disponível na natureza, constituindo um vasto recurso natural, sendo por isso um material acessível, económico e ecológico. Muitas vezes a terra escavada no local da obra para a construção de estruturas enterradas pode ser utilizada, desde que cumpra os requisitos necessários [Santos et al., 2014], uma vez que a terra extraída da natureza não é um material padronizado, podendo a sua composição variar de região para região. Por esta razão a aplicação da terra na construção carece de um controlo prévio da sua composição e, se necessário, de correção através da mistura de outras terras argilosas, da adição de areias com granulometria adequada [Lima, 2013], de fibras ou, no limite, de ligantes correntes.

Relação com a água no estado líquido

O principal inconveniente das construções em terra é a rápida degradação do material sobre a ação das intempéries, dado que o seu ligante, a argila, adquire novamente plasticidade, perdendo a solidez adquirida com a secagem [Lima, 2013]. É possível reduzir a ação nociva da água construindo boas fundações, elevando-as até uma altura segura, protegendo a construção com uma boa cobertura e protegendo as paredes com um revestimento eficaz [Castilla, 2011].

O comportamento deste tipo de argamassa face à humidade é semelhante ao de outras argamassas correntes, ou seja, se a água entrar nas paredes mas seguidamente evaporar não há problema de maior; mas no caso de a água que penetra nas paredes não conseguir sair, começa a surgir a degradação dos materiais.

O princípio básico da construção em terra é evitar o contacto entre as paredes e o solo. A terra, mesmo quando estabilizada com cimento, é suscetível à ação da água, a qual diminui a sua capacidade de resistência. A possibilidade de acesso de água às paredes através de fenómenos de capilaridade deve ser prevista e evitada, através das técnicas correntes de construção, tais como a utilização de uma terra bem compactada e estável, a previsão de sistemas eficazes de drenagem de águas periféricas e/ou execução de cortes de capilaridade entre a fundação e o início da parede de terra [Castilla, 2011; Röhlen e Ziegert, 2011].

A reação da argamassa de terra à água é particularmente importante quando a água tem a possibilidade de escorrer sobre a superfície da parede podendo provocar um efeito de erosão rápida e intensa. A terra contrai durante o processo de secagem, não sendo por isso adequada para ambientes expostos a ciclos sucessivos de exposição direta à água e posterior secagem, pois poderá ocorrer uma sucessiva perda de coesão da sua superfície. Por esta razão é que as argamassas de terra devem utilizadas no interior e não no exterior não protegido dos edifícios.

Por outro lado, esta relação com a água permite que a terra possa ser um material 100% reutilizável, desde que não estabilizada, e reciclável, constituindo assim um dos materiais de construção mais ecológicos disponíveis na natureza.

Existem estudos relativos à influência do teor de água correlacionando-o com a trabalhabilidade, sendo um aspeto fundamental [Gomes et al., 2012]. O teor de água tem de facto uma grande influência nas características e na trabalhabilidade deste tipo de argamassas. Esta elevada influência deve-se à presença de argilas, que alteram as suas propriedades físicas em presença da água, nomeadamente ao nível da plasticidade, compactação e retração [Kita, 2013].

A quantidade de água utilizada na amassadura de uma argamassa tem grande influência nas características físicas, na trabalhabilidade e, conseqüentemente, na sua aplicação [Kita, 2013].

Higroscopicidade

A capacidade de determinados materiais de construção absorverem o vapor de água do ar ambiente pode ser designada como capacidade de adsorção do vapor de água ou simplesmente adsorção e trata-se da capacidade de determinados materiais de construção absorverem água (humidade) do ar num determinado período de tempo, armazená-la e voltarem a libertá-la, alcançando-se um equilíbrio com o ambiente, tendo em conta a temperatura e a humidade relativa desse ambiente [Ziegert, 2011].

A argila tem a capacidade de adsorver e libertar humidade de forma mais rápida e em maiores quantidades do que outros materiais de construção. Esta característica da argila permite que as argamassas de terra contribuam para a qualidade dos ambientes interiores, permitindo-lhes funcionar como regulador permanente da humidade relativa do ambiente, minimizando dessa forma o desconforto e os problemas de saúde associados aos ambientes muito seco ou muito húmidos [Minke, 2006]. Esta característica permite ainda que a terra contribua para a conservação de outros materiais construtivos empregues no edifício, como é o caso, por exemplo, da madeira ou de outros materiais orgânicos [Lima, 2013].

Inércia térmica

A inércia térmica interior de um edifício é função da capacidade calorífica que os locais apresentam e depende da massa superficial útil de cada um dos elementos de construção.

As argamassas de terra têm elevada inércia térmica, conseguindo desta forma armazenar grandes quantidades de energia térmica, sendo demorada na sua difusão. Esta característica pode ser um fator importante em climas com variações térmicas diárias significativas, podendo contribuir para a estabilização térmica dos ambientes interiores [Lima, 2013].

Retração

Uma boa formulação de argamassas de terra para reboco deve conter argila suficiente para ligar todo o esqueleto granular, permitindo a plasticidade necessária para a sua aplicação e prevenir a sua erosão; no entanto não deve existir em grande quantidade de modo a ser possível limitar a retração [Hamard et al., 2013]. A retração é considerada nociva no caso de causar fendas profundas ou destacamento do reboco, podendo a pequena microfissuração não ser necessariamente prejudicial. Para além da retração do reboco, também a ligação do reboco à parede é importante. Esta ligação depende da natureza da parede (como, por exemplo, materiais constituintes, processo de aplicação, textura e eventuais heterogeneidades), do estado hídrico da parede e da natureza do reboco [Hamard et al., 2013].

Segundo Minke (2006) a retração linear pode variar entre 3 a 12% no caso de argamassas ou blocos de terra e entre 0,4 a 2% em misturas secas de terra, como por exemplo, blocos compactados.

2.5. Impacto energético e ambiental

A extração da terra é realizada à superfície do planeta. A preparação da terra não requer a adição de energia térmica para a cozedura, apenas exige energia mecânica para o destorroamento e a mistura dos componentes. O transporte da terra poderá ser de curta distância dada a grande disponibilidade na natureza, podendo ser extraída do próprio local da obra, como já foi referido. Por fim, o manuseamento em obra das argamassas de terra é equivalente ao manuseamento de outros materiais construtivos, como é o caso das argamassas convencionais ou betões.

A utilização da terra na construção promove a reduzida emissão de CO₂, uma vez que o seu ciclo de vida tem pouca energia incorporada, assim como tende a não gerar resíduos nem emitir qualquer tipo de poluentes, uma vez que é um produto “não transformado”. Mesmo depois de ser aplicado na construção mantém as características originais do material disponível na natureza. O facto de a terra ser incombustível e não tóxica são aspetos positivos a nível ecológico. Assim pode-se considerar que a terra é um material de construção com um impacto ambiental muito reduzido.

Atualmente estão a ser realizados ensaios para determinar os valores de confiança para as principais características de diferentes materiais de construção de terra com vista a torná-los disponíveis em bases de dados relevantes [Röhlen e Ziegert, 2011].

A imputação dos custos de impacto ambiental relativos ao sector da construção torna este material económico, não só devido aos processos simples e pouco consumidores de recursos energéticos de utilização de matéria-prima, mas também por não estar associado a grandes distâncias de transporte entre local de extração, produção e aplicação em obra.

Em Portugal foi desenvolvido um programa de registo de Declarações Ambientais de Produto (DAP) para produtos de construção. O DAPHabitat foi desenvolvido com o intuito de permitir, aos fabricante ou produtores, a comunicação do desempenho ambiental dos seus produtos, podendo competir no mercado nacional e internacional com esta ferramenta de comunicação credível e fidedigna. Estes documentos são verificados por uma terceira parte independente e têm um carácter voluntário.

As DAP vêm valorizar os esforços dos fabricantes, no desenvolvimento de produtos ambientalmente aceitáveis, assim como incentivar a aquisição de produtos com conhecimento das suas características ambientais. Estes documentos têm ainda em conta a avaliação do ciclo de vida do produto.

3. ARGAMASSAS DE TERRA

3.1. Considerações gerais

Para além dos aspetos acima referidos e no que respeita à utilização da terra em argamassas de reboco interior, destacam-se ainda eventuais qualidades estéticas (decorativas, em termos de relevo ou em cor). As qualidades visuais e tácteis dos rebocos de terra são um produto da cor e granularidade do material, do tratamento de superfície e da contribuição de aditivos especiais, tais como fibras vegetais.

O comportamento mecânico das argamassas de reboco de terra é muito semelhante ao de uma parede de terra, fazendo com que este tipo de argamassa seja mais compatível com estas paredes (e com outras paredes de características semelhantes). Esta situação é contrária à das argamassas à base de cimento ou cais hidráulicas que, apesar de apresentarem melhor comportamento face à ação da água, são excessivamente rígidas para este tipo de alvenarias [Hamard et al., 2013; Torraca, 2009].

As argamassas de terra são escolhidas em relação a outras argamassas pela sua aparência e a sua contribuição para a melhoria da qualidade de vida no interior. Por fim, mas não menos importante, os rebocos de terra podem ser utilizados na conservação de alguns edifícios históricos.

Os rebocos de terra são usados em áreas de estar e tipos semelhantes de interiores. No caso de os rebocos de terra serem utilizados em locais de alto desgaste e abrasão, como é o caso das escadas ou corredores, é necessário avaliar a sua adequação em cada caso específico. Os rebocos de terra só podem ser utilizados em caves desde que as paredes se mantenham secas e a temperatura e humidade relativa seja semelhante a de outras zonas do edifício [Röhlen e Ziegert, 2011].

Existe atualmente uma norma alemã específica para rebocos interiores de argamassas de terra; trata-se da norma DIN 18947 [NABau, 2013]. Esta norma define os termos, procedimentos de ensaio e classificação destas argamassas para serem aplicadas no mercado alemão e é a única de que se tem conhecimento. Segundo esta norma as argamassas de reboco de terra são realizadas através de terras argilosas, agregados e adições minerais, opcionalmente com reforço de fibras. Podem ser usados suplementos minerais - agregados naturais de acordo com a norma EN 12620, pó de tijolo, perlita expandida, argila expandida, vidro expandido, xisto expandido e pedra-pomes de acordo com a norma NP EN 13055-1 [IPQ, 2005] – ou suplementos orgânicos – partes de vegetais e fibras, pelos e madeira triturada, quimicamente tratada (sem materiais em madeira). É permitida a adição de pigmentos inorgânicos de acordo com a norma EN 12878 [CEN, 2005] ou corantes vegetais.

3.2. Agregados e adições

Os agregados e adições são adicionados à terra para modificar as suas propriedades mecânicas e físicas para o uso como materiais de construção, nomeadamente na produção de argamassas.

Os agregados são materiais com forma e volume aleatório que podem resultar de fontes minerais ou orgânicas; têm pouco ou nenhum efeito sobre as características de endurecimento de misturas de terra. Por outro lado as adições são materiais que influenciam as características de endurecimento da mistura de terra, sendo utilizadas, geralmente, em pequenas quantidades (massa ou volume).

Areia

A trabalhabilidade das misturas de terra fortemente adesivas, viscosas e pegajosas pode ser melhorada através da adição de areia, que pode aumentar a resistência das misturas. A proporção das respectivas dimensões das partículas pode ser melhorada através da adição de partículas minerais com dimensões em falta ou insuficientes na mistura de terra. Além disto, a forma dos agregados também influencia a resistência do material: agregados de forma angular formam uma estrutura mais estável que os agregados com forma arredondada. Uma vez que o agente de ligação das argamassas de terra (a argila) é relativamente fraco, a natureza dos componentes dos grãos é particularmente importante. A escolha da fração grossa do agregado é determinada consoante a aplicação da argamassa. Por exemplo, as camadas espessas de reboco têm uma distribuição de agregado mais grosso que as camadas finas, de forma a garantir a estabilidade necessária.

Formulações de terra constituídas apenas por agregados finos estão mais predispostas a fissurar do que misturas com agregado grosso. Contudo, a areia não deve ser adicionada em grandes quantidades, pois se a proporção de agente de ligação for muito pequena, a resistência da argamassa diminui. O tipo de agregado utilizado pode influenciar a massa volúmica da argamassa.

Agregados minerais leves: argila expandida, pedra-pomes, perlite, vidro de espuma

A norma DIN 18947 [NABau, 2013] prevê a possibilidade de utilização destes tipos de agregados na produção de argamassas de terra, uma vez que este tipo de material permite reduzir a massa volúmica da argamassa.

O grão fino da perlite aumenta a capacidade das argamassas reterem água influenciando, consequentemente, a sua trabalhabilidade. Este agregado relativamente macio e esférico tem um efeito negativo sobre a resistência da argamassa de terra.

Argila em pó

A adição de argila em pó enriquece o agente de ligação que existe naturalmente na terra, ajudando, geralmente, a melhorar a resistência do material.

Aglutinantes minerais: cal, cimento

Os aglutinantes minerais são principalmente adicionados a misturas de terra para melhorar as suas características de resistência e reduzir a sua sensibilidade à humidade.

Ao contrário do que acontece com a argila, a adição de cal e de cimento endurecem a argamassa por transformação química do material, não podendo este processo de endurecimento ser revertido por meio de adição de água, como acontece com a argila.

Aglutinantes orgânicos: esterco, amido

Em água e outros líquidos, as fibras vegetais formam uma pasta, como acontece por exemplo, no sistema digestivo dos animais. Tais pastas consistem em polímeros de cadeia longa naturais. Numa escala microscópica, servem para aumentar a resistência e diminuir a sensibilidade à humidade, da mesma maneira que as fibras o fazem a uma escala macroscópica.

Historicamente, o esterco de vaca tem sido uma adição comum. Melhora a funcionalidade e resistência da argamassa; para além disto, as argamassas de terra estabilizadas com esterco também podem apresentar-se, surpreendentemente, resistentes à água.

3.3. Caso particular da adição de fibras

Desde tempos muito antigos, que outros materiais foram adicionados às argamassas de terra, tornando-as em argamassas estabilizadas, melhorando o seu desempenho. A estabilização das argamassas de terra pode ser química, mecânica e física. Os principais objetivos da estabilização são o facto de se obter um melhor comportamento mecânico, melhor coesão, redução da porosidade e das variações de volume, controlo da retração, aumento da resistência à fendilhação, melhoria da resistência à erosão do vento com partículas em suspensão, reduzindo a abrasão na superfície e a permeabilidade à água líquida.

Segundo Torraca (2009), a estabilização das argamassas pode ser realizada através de fibras vegetais, como palha ou feno picado com 5 a 10 cm de comprimento, que melhoram as propriedades mecânicas, em especial, resistência à tração, que é muito baixa na matéria-prima endurecida.

A adição de fibras vegetais é um dos métodos de estabilização física de argamassas de terra mais utilizados. A utilização das fibras permite diminuir ou evitar a fissuração nos processos de secagem das argamassas de reboco nas paredes, permitindo distribuir as tensões de retração da argila por toda a argamassa, permite melhorar o contributo para os comportamentos térmico e acústico. Por outro lado, a palha pode apresentar a desvantagem de se degradar quando exposta por períodos prolongados a ambientes húmidos e de aumentar a suscetibilidade da argamassa à contaminação biológica. Por este motivo atualmente as argamassas de terra têm tendência a não conter muita palha, no entanto, a argila ajuda a manter a palha seca [Santos et al., 2014].

A massa volúmica aparente, e por sua vez a condutibilidade térmica de uma argamassa de terra pode ser reduzida através da adição de fibras. Nas argamassas de reboco a redução da massa volúmica tem, geralmente, pouco efeito, no entanto, o facto de se tornar uma argamassa leve pode contribuir em grande parte para o isolamento térmico [Röhlen e Ziegert, 2011].

As fibras parecem aumentar a quantidade de água necessária para conseguir uma boa trabalhabilidade. Por outro lado as argamassas que contêm fibras apresentam uma menor massa volúmica devido ao facto de as fibras exibirem muito baixa baridade. Em termos de módulo de elasticidade, a utilização das fibras não parece afetar significativamente [Gomes et al., 2012]. A adição de fibras de plantas permite uma melhor trabalhabilidade, enquanto as fibras finas também aumentam a capacidade de retenção de água das argamassas de terra [Röhlen e Ziegert, 2011].

3.4. Preparação da argamassa de terra

A preparação da argamassa de terra envolve a distribuição de todos os componentes da argamassa. Isto pode ser realizado com ou sem a adição de água. As argamassas de terra são formuladas manualmente ou em máquinas de mistura adequadas (Figura 3.1) com água para a consistência de uma pasta líquida ou viscosa e, em seguida, misturam-se os agregados leves.

Dependendo da mistura é utilizado um misturador de queda livre rotativo, mas, na maioria dos casos, as argamassas são formuladas com misturadores de pás mais eficazes do tipo utilizado para as misturas húmidas naturalmente.

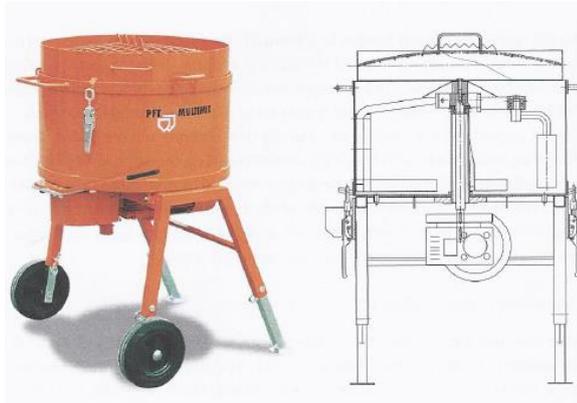


Figura 3.1 – Exemplo de uma misturadora mecânica [Röhlen e Ziegert, 2011]

3.5. Características gerais das argamassas

As argamassas têm diversas aplicações em paredes tais como: revestimentos exteriores e interiores, consolidação, assentamento de alvenarias, fechamento e refeitamento de juntas entre blocos de alvenarias à vista, entre outras e, consoante a sua função, apresentam requisitos e exigências diferentes [Henriques e Faria, 2008]. Portugal tem um vasto número de construções antigas, devendo ser dada alguma importância à sua reabilitação. As estratégias de conservação são sempre a melhor opção a considerar quando a degradação afeta paredes antigas: pequenos reparos, reparo de lacunas, reparação de fendas, consolidação para restabelecer a coesão ou a perda de adesão. No entanto, pode ser necessário substituir as argamassas existentes por novas, parcialmente ou totalmente, sendo nestes casos importante a colocação de argamassas duráveis mas principalmente compatíveis com os materiais das paredes pré-existent [Veiga et al., 2010].

A compatibilidade das argamassas de substituição deve ser assegurada nos seguintes termos [Veiga et al., 2010]:

- i. Compatibilidade mecânica – as resistências à flexão e à compressão devem ser semelhantes às dos materiais existentes na parede;
- ii. Compatibilidade física, especialmente no que diz respeito ao comportamento higrotérmico – permeabilidade ao vapor de água, absorção de água por capilaridade, secagem;
- iii. Compatibilidade química entre a argamassa de substituição e os materiais existentes.

Os requisitos estabelecidos para argamassas de substituição, para reabilitação, são consideravelmente diferentes daqueles que são estabelecidos para argamassas gerais para serem usadas em edifícios novos, devido a critérios de compatibilidade. As argamassas de substituição não podem gerar danos aos materiais existentes: não transmitirem tensões elevadas, não reterem água dentro das construções e não conterem alto teor de sais.

O Quadro 3.1 apresenta algumas gamas de requisitos propostos para argamassas com 90 dias, para aplicação em edifícios antigos.

Quadro 3.1 – Gamas de algumas características de argamassas para aplicação em edifícios antigos [Veiga et al., 2010]

| Tipos de reboco | Características mecânicas aos 90 dias | | | Comportamento à água |
|------------------------|---------------------------------------|-----------|-------------|---|
| | Rt [MPa] | Rc [MPa] | Ed [MPa] | CC [kg/(m ² .min ^{1/2})] |
| Reboco exterior | 0,2 – 0,7 | 0,4 – 2,5 | 2000 – 5000 | 1,0 < CC < 1,5 |
| 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 | 1,0 < CC < 1,5 |

A norma NP EN 998-1 [IPQ, 2010] classifica as argamassas em termos de resistências à compressão, absorção de água e condutibilidade segundo o Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Classificação das propriedades das argamassas endurecidas segundo a norma NP EN 998-1 [IPQ, 2010]

| Propriedades | Categorias | Valores |
|--------------------------------------|------------|--|
| Resistência à compressão aos 28 dias | CSI | 0,4 a 2,5 N/mm ² |
| | CSII | 1,5 a 5,0 N/mm ² |
| | CSIII | 3,5 a 7,5 N/mm ² |
| | CSIV | ≥ 6 N/mm ² |
| Absorção de água por capilaridade | W0 | Não especificado |
| | W1 | CC ≤ 0,40 kg/(m ² .min ^{1/2}) |
| | W2 | CC ≤ 0,20 kg/(m ² .min ^{1/2}) |
| Condutibilidade térmica | T1 | ≤ 0,1 W/m.K |
| | T2 | ≤ 0,2 W/m.K |

3.6. Características das argamassas de terra

3.6.1. Reação ao fogo

O comportamento ao fogo não depende apenas da natureza do material, mas também da sua forma e das características de superfície, da massa volúmica, da produção e da sua combinação com outros materiais, incluindo quaisquer agentes de ligação ou fixadores utilizados. Esses fatores devem ser levados em conta na elaboração de ensaios, seleção de amostras, avaliação dos resultados dos ensaios e marcação dos produtos.

A classe da maioria dos materiais de construção é determinada com base num ensaio ao fogo previsto na norma DIN EN 4102-1 [DIN, 1998]. De acordo com esta norma, que regula o comportamento ao fogo dos materiais de construção com elementos minerais, os rebocos de terra cumprem a classe A (não-inflamável) de reação ao fogo. Quando as argamassas de terra contêm adições orgânicas, estas não podem ser classificadas segundo a norma DIN EN 4102-4 [DIN, 1994].

De acordo com a norma NP EN 998-1 [IPQ, 2010], as argamassas para rebocos (interiores ou exteriores) que contenham um máximo de 1,0 % em massa ou em volume (contando o mais desfavorável) de materiais orgânicos homogeneamente distribuídos, são classificadas na classe A1 de reação ao fogo sem necessidade de ensaio. No caso das argamassas para rebocos exteriores ou interiores que contenham mais de 1,0 % em massa ou em volume (contando o mais desfavorável) de materiais orgânicos homogeneamente distribuídos, devem ser classificadas de acordo com a norma EN 13501-1 (norma a que não se acedeu) e a correspondente classe de reação ao fogo deve ser declarada.

Segundo Röhlen e Ziegert (2011), ensaios realizados de acordo com os procedimentos padrão demonstram que as argamassas de terra com incorporação de fibras de palha, com massa volúmica superior a 1200 kg/m³ apresentam as propriedades de classe de reação ao fogo equivalentes a materiais de construção não inflamáveis.

As argamassas de terra contêm uma quantidade elevada de água cristalizada no reboco; quando exposta ao fogo, a sua estrutura não se desintegra, formando estruturas cerâmicas [Röhlen e Ziegert, 2011].

3.6.2. Humidade do ar interior

Tal como referido anteriormente, o contributo mais expressivo de um reboco de argamassas de terra para o conforto e qualidade dos ambientes interiores reside na sua elevada capacidade de trocar vapor de água com o ar, adsorvendo-o quando o ar se encontra mais húmido e libertando-o novamente quando o ar se encontra mais seco [Lima, 2013]. Desta forma, o reboco de argamassa de terra contribui para a regulação e equilíbrio da humidade dos ambientes interiores.

O contributo dos materiais de revestimento para o reequilíbrio higrométrico dos ambientes interiores depende também da espessura do reboco e da velocidade de adsorção e libertação do vapor de água.

Esta capacidade da argamassa de reboco de terra, de contribuir para a regulação e equilíbrio da humidade do ar interior, influência de modo significativo a perceção do conforto térmico e a salubridade do ar do ambiente interior.

3.6.3. Conforto térmico

A humidade relativa do ar influencia a nossa perceção de temperatura, na medida em que potencia ou restringe as trocas de energia do nosso corpo com o ambiente envolvente. Esta influência atua em dois planos: por um lado altera a condutibilidade térmica do ar (o ar húmido é melhor condutor que o ar seco); por outro lado interfere com a capacidade do corpo de dissipar energia através da evaporação da transpiração ao nível da pele (o ar húmido dificulta a evaporação) [Lima, 2013; Henriques, 2011].

Considere-se um ambiente interior calmo (com uma velocidade do ar muito reduzida) e com uma temperatura radiante constante (temperatura média à superfície dos elementos que envolvem um espaço). Será possível sintetizar alguns parâmetros chave [Rodrigues et al, 2009, citado por Lima, 2013]:

- i. a sensação de temperatura percecionada não corresponde diretamente à temperatura real do ar;
- ii. a sensação de conforto varia em função da temperatura do ar e da sua humidade relativa;
- iii. a diminuição da humidade relativa num ambiente permite o aumento da temperatura do ar desse mesmo ambiente sem que a sensação de conforto seja alterada;
- iv. esta dependência é mais significativa quanto mais alta for a temperatura, sendo pouco perceptível para temperaturas inferiores a 14°C.

Considerando a influência da humidade relativa na perceção do conforto térmico, pode-se admitir que o reboco de argamassa de terra contribui de forma positiva para a qualidade e conforto dos ambientes interiores, através da sua elevada capacidade de equilibrar a humidade do ar interior, em especial em regiões de clima mediterrânico, onde as temperaturas médias e a humidade relativa do ambiente exterior são relativamente elevadas.

O contributo da argamassa de terra depende da espessura do reboco, pelo que a contribuição desta argamassa aplicada num suporte corrente não trás grandes mais-valias a nível do conforto térmico.

3.6.4. Salubridade do ar interior

De acordo com a Organização Mundial de Saúde existem atualmente evidências científicas suficientes, resultantes de investigações realizadas em diferentes países com diferentes condições climáticas, que demonstram que a permanência em ambientes interiores demasiado húmidos aumenta de forma significativa o risco de contrair doenças ou infeções do foro respiratório, a apetência para o desenvolvimento de alergias e a frequência das crises associadas a doenças crónicas como a asma [Lima, 2013].

Na construção ou reabilitação de um edifício, um dos objetivos principais deve ser o de criar ambientes agradáveis, confortáveis e saudáveis, que possam ser habitados e onde se possa trabalhar. Uma avaliação puramente com base em critérios padrão, tais como estabilidade estrutural, segurança contra incêndios, desempenho térmico e acústico não é considerada suficiente. Os aspetos higiénicos e humanotóxicos estão a tornar-se cada vez mais importantes [Röhlen e Ziegert, 2011].

A quantidade de água disponível no ar interior, e a condensação superficial dos materiais de revestimento, assim como, no caso de materiais orgânicos, a própria humidade contida no seu interior, são os fatores fundamentais para desencadear o crescimento de colónias de diversos microrganismos, como fungos, ácaros ou outras bactérias. Os ambientes interiores contêm inevitavelmente pó e partículas de sujidade que constituem os nutrientes suficientes para o desenvolvimento deste tipo de microrganismos, que, desta forma, se propagaram rapidamente logo que exista disponibilidade de água.

Os fungos são microrganismos de espécies muito diversas encontrando-se omnipresentes na natureza e podem ser transportados para o interior dos edifícios através de variadíssimos meios, tais como a roupa, a superfície de alguns materiais ou objetos que sejam colocados no interior dos edifícios. Desta forma os fungos podem ser encontrados no ambiente interior de todos os edifícios, mesmo naqueles onde não ocorrem problemas de humidade. No entanto, para que os fungos possam continuar a desenvolver-se nos ambientes interiores é necessário que os materiais, ou as superfícies destes, se encontrem em condições de humidade próxima da condensação [Lima, 2013].

Considerando-se a capacidade diária de absorção e dissipação de humidade de um reboco de argamassa de terra com 2 cm de espessura, atendendo-se à variação diária da humidade relativa de um ambiente interior, decorrente de fatores inerentes à normal utilização do edifício, como a transpiração e respiração dos seus ocupantes, a sua higiene pessoal ou o acto de cozinhar, pode-se admitir que a utilização do reboco de argamassa de terra, como material de revestimento de paredes interiores, ao contribuir para a regulação diária da humidade relativa do ar interior, contribui simultaneamente para a atenuação de alguns problemas de saúde associados aos estados limites de humidade.

3.6.5. Renovação do ar interior

O controlo da humidade no interior dos edifícios é muitas vezes assegurado apenas pelo número de renovações horárias do ar interior, conduzindo por vezes à necessidade de excessivas trocas térmicas com o ambiente exterior, que muitas vezes não ocorrem de forma suficiente em período de inverno. Os rebocos de argamassa de terra, ao contribuírem para o equilíbrio da humidade do ar interior, vêm contribuir indiretamente para a diminuição da necessidade destas trocas térmicas associadas a taxas de renovação

do ar mais elevadas. Obviamente esta situação apenas minimiza o teor de humidade no ar; não produz qualquer renovação efetiva do ar.

Naturalmente a renovação do ar continuará a ser necessária, de modo a assegurar a disponibilidade de ar não saturado no ambiente interior. Contudo, também o novo ar, proveniente do exterior, poderá contar com o contributo das superfícies interiores revestidas com argamassa de terra para o seu reequilíbrio higrotérmico [Lima, 2013].

3.6.6. Toxicidade do ar interior

Atualmente a maioria dos materiais convencionais utilizados na construção de edifícios têm na sua composição compostos orgânicos voláteis que libertam para o ar dos ambientes interiores quantidades significativas de várias substâncias nocivas para a saúde, como por exemplo o benzeno e o formaldeído [Lima, 2013].

Comparativamente, os revestimentos realizados com argamassas de terra, sem adição de qualquer adjuvante orgânico, não libertam para o ambiente interior quaisquer compostos tóxicos, nem expõem os ocupantes dos edifícios à presença ou contacto com substâncias nocivas, podendo até contribuir para a redução de odores e determinados poluentes.

3.6.7. Conforto acústico

Os rebocos de argamassa de terra podem contribuir significativamente para o condicionamento acústico dos ambientes interiores, nomeadamente através da redução do tempo de reverberação dos compartimentos. Esta característica deve-se à típica rugosidade superficial deste tipo de rebocos, a qual, considerando a grande plasticidade do material, poderá facilmente ser afinada de modo a potenciar o efeito de amortecimento acústico.

O tempo de reverberação é o tempo necessário para que o nível de pressão sonora se reduza em 60 dB depois de uma fonte para a emissão de ruído. Num compartimento corrente, o conforto acústico melhora quando o tempo de reverberação é menor, o que significa que não existe eco no compartimento.

4. NANOTECNOLOGIAS EM ARGAMASSAS

4.1. Considerações gerais

A definição de nanotecnologia pode variar mas normalmente é associada à manipulação e compreensão de matéria à escala nanométrica (0,1 a 100 nm), permitindo produzir novos materiais em quase todos os ramos da tecnologia com aplicações no mundo real [Flores-Colen et al., 2013].

Os nanomateriais têm mostrado um potencial significativo na proteção do ambiente e na sustentabilidade, pelo que, a médio e longo prazo, o desenvolvimento da nanotecnologia conduzirá a novas abordagens no desenvolvimento e produção de materiais com uma eficiência energética melhorada [Flores-Colen et al., 2013].

A nanotecnologia associada às argamassas de construção são o emprego da ciência e tecnologia à escala nanométrica com aplicações no mundo real. A integração de nanomateriais nas argamassas torna-as inovadoras, com eventual desempenho melhorado, sendo soluções com benefícios técnicos, ambientais, energéticos e económicos.

Os nanomateriais apresentam melhorias do desempenho das argamassas de revestimento ao nível do comportamento mecânico e físico, comportamento à água, comportamento térmico e acústico, manutenção do aspeto estético e purificação do ar envolvente, todo isto a custos aceitáveis de produção [Flores et al., 2013].

Os nanomateriais mais utilizados em argamassas são: nanopartículas de dióxido de titânio, aerogel de sílica, nanotubos de carbono, nanopartículas de sílica, entre outros.

4.2. Materiais de mudança de fase

O rápido crescimento económico em todo o mundo levou a um aumento da procura de energia. De acordo com estatísticas da Agência Internacional de Energia (AIE) os combustíveis fósseis estão a dominar o mercado mundial da energia com uma quota de cerca de 81% (Figura 4.1) e prevê-se que continuarão a dominar a energia primária do mundo em 2030. No entanto, as fontes de energia fósseis convencionais estão a esgotar e o seu uso está relacionado com a emissão de gases nocivos que fazem as pessoas preocuparem-se com as questões ambientais e com a escassez de recursos energéticos. Para lidar com essa situação exigente, os recursos energéticos devem ser usados de forma eficiente [Memon, 2014].

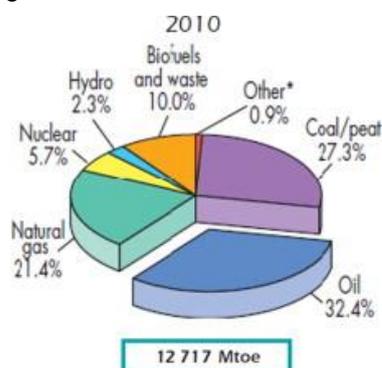


Figura 4.1 – Oferta mundial de energia primária total de combustível em 2010 [Memon, 2014]

O sector da construção é o consumidor de energia dominante em todo o mundo com um total de 30% de participação no consumo global de energia. Esta proporção é mais elevada nos países desenvolvidos, como é o caso dos EUA, que é responsável por 41% (Figura 4.2) da quota de energia primária. Para além disto, nos últimos anos, a procura de energia para os edifícios tem aumentado muito rapidamente devido ao aumento da taxa de crescimento da população e da melhoria da qualidade de vida das pessoas. Desta forma, a melhoria do consumo energético dos edifícios não só reduziria a dependência de combustíveis fósseis, mas também teria um grande impacto sobre as emissões totais de gases de efeito de estufa. O armazenamento de energia térmica é um método eficiente para a aplicação na construção com uma eficiência energética dos edifícios melhor, reduzindo assim o impacto ambiental relacionado com o consumo de energia [Memon, 2014].

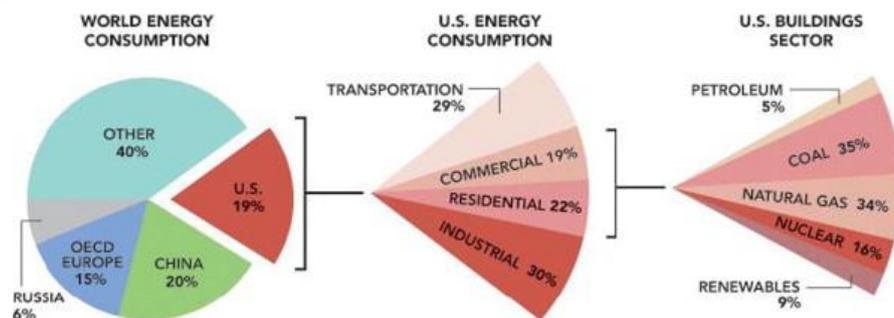


Figura 4.2 – Energia consumida através do setor da construção nos EUA [Memon, 2014]

Atualmente, grande parte do consumo de energia elétrica no setor residencial está associada ao aquecimento e arrefecimento dos espaços. Torna-se assim urgente a utilização de soluções construtivas que permitam uma diminuição do recurso a equipamentos de climatização [Cunha et al, 2012].

A incorporação de materiais de mudança de fase ou *Phase Change Materials* (PCM) em edifícios possui impactos benéficos nas dimensões social, económica e ambiental, demonstrando assim um contributo significativo para uma construção com maior valor de sustentabilidade [Cunha et al, 2012]. As argamassas com incorporação de materiais de mudança de fase possuem a capacidade de regular a temperatura no interior dos edifícios, contribuindo desta forma para o aumento do nível de conforto e diminuindo o recurso a equipamentos de climatização. Com efeito, estes materiais de mudança de fase são destinados a aumentar a capacidade de armazenar o calor, permitem a estabilização das temperaturas na superfície interior dos edifícios, influenciando a sensação de conforto térmico e estabilização das temperaturas ambientes interiores [Sá et al, 2012].

A utilização de soluções construtivas modificadas com a incorporação de PCM possuem ainda um efeito benéfico na humidade interior dos espaços, que sem dúvida conduzirá a uma diminuição de eventuais anomalias no interior dos edifícios. O aspeto ambiental encontra-se relacionado com a redução do recurso a fontes de energia não renováveis, uma vez que esta tecnologia possui um efeito termo-regulador do ambiente interior dos edifícios, proporcionando uma diminuição da utilização dos equipamentos de climatização, que também permite reduzir as emissões de gases poluentes para a atmosfera. A dimensão económica diz respeito à adequação da tecnologia e custos associados à sua implementação. Pode ainda referir-se que, os benefícios económicos da diminuição dos consumos energéticos e desfasamento dos mesmos para fora de horas de maior procura, são evidentes e podem ser conseguidos através do armazenamento térmico [Cunha et al, 2012].

A elevada capacidade de armazenamento de energia por unidade de volume a uma temperatura quase constante caracteriza e distingue os materiais de mudança de fase de materiais de construção convencionais.

A utilização de PCM incide com maior influência em regiões em que o inverno e o verão sejam mais rigorosos. A importância da adequação da temperatura de transição do PCM e a temperatura atmosférica é extremamente importante para o correto funcionamento da solução [Cunha et al, 2012]. O PCM pode ser utilizado em soluções para paredes, pavimentos e tetos, sendo a aplicação em paredes a solução preferencial para explorar a potencialidade destes materiais.

A fim de serem utilizados na construção, os PCM devem possuir propriedades físico-térmicas, cinéticas, químicas, económicas e ambientais desejáveis. É importante salientar que nenhum PCM consegue, facilmente, ter todas as propriedades desejáveis. No que diz respeito a propriedades termo-físicas, o PCM deve possuir pequenas variações de volume, durante a transição de fase e de pressão de vapor na temperatura operacional, de modo a evitar o problema de contenção, deve ter a capacidade de derreter completamente durante a transição de fase, de modo a que as fases sólidas e líquidas sejam homogêneas e devem ainda ser estáveis em termos de temperatura de mudança de fase e de calor latente de fusão para que possa ser usado a longo prazo. Em termos de propriedades cinéticas, os PCM devem apresentar uma elevada taxa de nucleação, de modo a evitar o superaquecimento em fase líquida e elevada taxa de crescimento de cristais, de modo a que a recuperação de calor a partir do sistema de armazenamento seja otimizada. Quimicamente os PCM devem ser compatíveis com os materiais de construção, sem apresentar degradação após grande número de ciclos térmicos (congelamento/fusão) de modo a assegurar uma longa vida do produto. Os PCM não são tóxicos, não inflamáveis e não explosivos de modo a garantir a segurança, por outro lado devem ser resistentes à corrosão. A nível económico os PCM apresentam custos efetivos e estão disponíveis comercialmente. Este tipo de material apresenta baixo impacto ambiental, não é poluente durante a vida útil e apresenta potencial de reciclagem.

O armazenamento de energia sob a forma de calor, com recurso à incorporação de PCM, apresenta as seguintes vantagens: diminuição dos gastos com a fatura elétrica, através da deslocalização temporal do consumo energético para períodos de vazio; contribuição para o aumento do conforto térmico no interior dos edifícios, pelo armazenamento e utilização do calor associado à energia solar (em particular para o aquecimento durante o inverno) e do fresco associado à ventilação natural noturna (em particular para o arrefecimento durante o verão) reduzindo assim o recurso a aquecedores e a sistemas de ar condicionado. Este tipo de mecanismos de armazenamento de energia pode assim reduzir as variações de temperatura interior, contribuindo para o aumento do nível de conforto [Cunha et al, 2012].

Os materiais de mudança de fase têm a capacidade de mudar o seu estado em função da temperatura ambiente. Quando a temperatura ambiente em torno do PCM aumenta e ultrapassa o ponto de fusão do material, o PCM passa do estado sólido para o estado líquido, absorvendo e armazenando a energia calorífica do ambiente. Posteriormente, quando a temperatura ambiente baixa, e ultrapassa o ponto de solidificação do PCM, este transita de fase novamente, neste caso do estado líquido para o estado sólido, libertando a energia anteriormente armazenada (Figura 4.3) [Cunha et al, 2012].

Abhat em 1983, citado por Memon (2014) introduziu uma classificação para os PCM com aplicações em termos de armazenamento de energia térmica. Com base na sua composição química, os PCM podem ser classificados como sendo orgânicos, inorgânicos ou eutécticos (Figura 4.4).

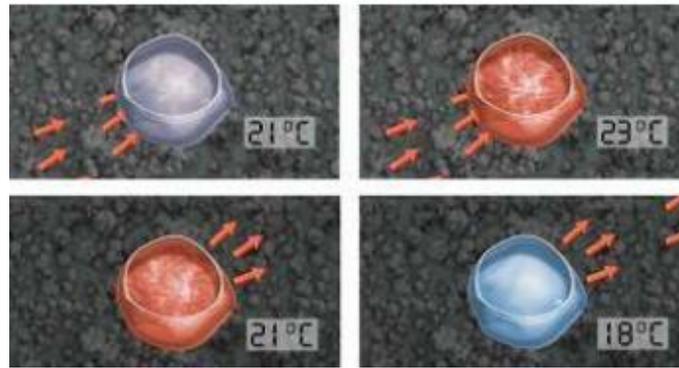


Figura 4.3 – Processo de mudança de fase de um PCM [Cunha et al., 2012]

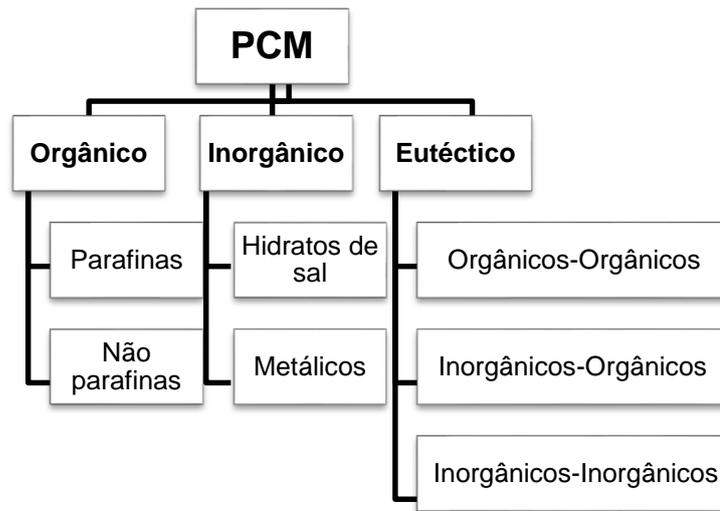


Figura 4.4 – Classificação dos materiais de mudança de fase segundo Abhat [Menon, 2014]

A cada categoria ou grupo de PCM está associada uma gama de entalpias e uma gama de temperaturas de fusão características. Através da observação da Figura 4.5 é possível verificar que as parafinas, os ácidos gordos, os sais hidratados e as misturas eutéticas apresentam temperaturas de fusão dentro da gama de utilização corrente dos edifícios (no intervalo de temperaturas de conforto, entre os 20°C e os 25°C) o que os torna os mais adequados no interior dos espaços habitados.

A temperatura na qual a transição de fase acontece – o ponto de fusão – é outra propriedade importante, pois deve ser adequada às condições de utilização do espaço interior (produção de calor das máquinas, lâmpadas, atividades das pessoas, entre outras) e tempo em torno do edifício [Sá et al. 2012]. Alguns destes tipos de PCM são adequados para a construção num intervalo de temperatura de 18°C a 40°C. O limite superior deste intervalo de temperatura é justificado pelo facto de as temperaturas da superfície dos telhados e paredes externas de edifícios poderem chegar aos 40°C [Memon, 2014]. Escolher um PCM com uma gama de temperatura de fusão entre os 23°C e os 25°C limita a sua utilidade ótima para situações em que a gama de temperaturas ambiente engloba essa gama nas variações diárias. Assim, no âmbito do clima do Sul da Europa, a solução de PCM atual é mais adequada para a estação de arrefecimento (verão/primavera), em vez de para a estação de aquecimento (inverno/outono), em que essa gama de temperaturas ambientes não é usual [Sá et al., 2012].

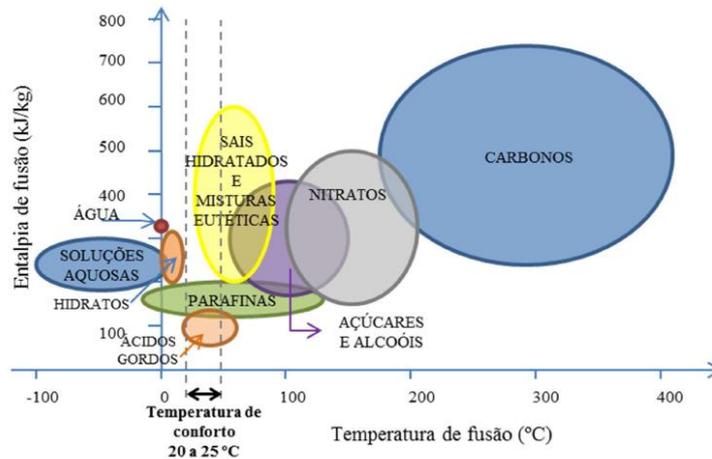


Figura 4.5 – Distribuição das diferentes categorias de PCM em função da entalpia e da temperatura de fusão [Sá et al., 2014]

Os materiais de mudança de fase podem ser incorporados em materiais de construção através de métodos como a incorporação direta, imersão e encapsulamento.

Incorporação direta

Este é o método mais simples, viável e económico, em que os PCM são misturados diretamente nos materiais de construção, como por exemplo, gesso, cola, argamassa ou betão, durante a sua produção [Memon, 2014].

Imersão

Nesta técnica, os elementos de construção, como por exemplo, os tijolos, são mergulhados no líquido de PCM até este ser absorvido pelo material de construção por ação capilar. O inconveniente desta técnica é que o PCM pode sair do elemento de construção, especialmente depois de submetido a grandes números de ciclos térmicos. Para além disto, esta técnica pode afetar as propriedades mecânicas e de durabilidade dos elementos de construção [Memon, 2014].

Encapsulamento

Nesta técnica o PCM é encapsulado antes de ser utilizado nos elementos da construção. Já encapsulado pode então ser homogeneizado, por exemplo, em tintas ou argamassas. Regin et al., citado por Memon (2014) afirmou que o encapsulamento deve:

- i. Cumprir as exigências de resistência, durabilidade, estabilidade térmica e confiabilidade;
- ii. Proteger o PCM, agindo como uma barreira, a partir de interações destrutivas com o ambiente circundante;
- iii. Possuir uma superfície de transferência de calor eficiente;
- iv. Ser estruturalmente estável e proporcionar facilidade no manuseamento.

Para que a utilização do PCM seja a mais correta, este deve ser encapsulado; caso contrário, durante a fase líquida pode correr-se o risco deste se deslocar do local em que foi aplicado.

O encapsulamento deve ser otimizado para a taxa de transferência de calor eficaz e, ao mesmo tempo, deve ser resistente à corrosão, ser termicamente estável e fiável. Existem dois métodos de encapsulamento: microencapsulamento e macroencapsulamento [Memon, 2014].

O **microencapsulamento** consiste na colocação de uma pequena massa molecular em pequenas partículas, revestidas por polímeros de alto desempenho, com dimensões inferiores a 1 cm de diâmetro, sendo as suas dimensões preferenciais de 1 a 60 μm [Cunha et al, 2012]. Os PCM com temperatura de fase entre os -10°C e os 80°C podem ser fabricados com esta técnica. As vantagens do microencapsulamento passam pelo facto de evitar o vazamento do PCM durante a transição de fase, aumentando assim as possibilidades de o incorporar em vários materiais de construção, fornecer uma alta taxa de transferência de calor através da sua maior área de superfície por unidade de volume, melhorar a estabilidade química, resistência à mudança de volume durante a transição de fase. As desvantagens apresentadas pelo microencapsulamento estão associadas à rigidez da cápsula que evita a convecção natural e, por conseguinte, diminui a taxa de transferência, que pode afetar as propriedades mecânicas dos materiais de construção. Por outro lado, o microencapsulamento apresenta um elevado custo de investimento, que tem tornado inviável a chegada deste tipo de PCM ao mercado [Memon, 2014].

No **macroencapsulamento**, uma quantidade significativa de PCM (até vários litros) pode ser embalada num recipiente, tais como tubos, esferas e painéis, sendo depois utilizados em elementos de construção. A rigidez da cápsula evita a convecção natural e, por conseguinte, diminui a taxa de transferência, que pode afetar as propriedades mecânicas dos materiais de construção. O macroencapsulamento apresenta condutibilidades térmicas pobres, necessita de proteção contra a destruição (furos ou pregos na parede) na utilização do edifício e é mais difícil de integrar este material na estrutura do edifício.

O macroencapsulamento pode ter várias configurações, tais como, placas planas, cilindros, conchas, tubos e esferas, geralmente com dimensões superiores a 1 cm de diâmetro, como pode ser observado na Figura 4.6.

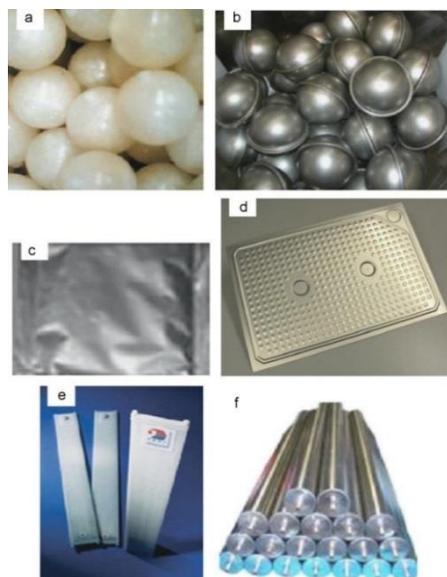


Figura 4.6 – a) Cápsula em bola metálica; b) Bolas esféricas; c) PCM em alumínio; d) PCM em painéis de alumínio; e) PCM em polipropileno; f) Encapsulamento em tubo [Memon, 2014]

4.3. Desempenho dos materiais de mudança de fase em argamassas

Têm sido realizados inúmeros ensaios a fim de compreender o efeito da introdução de PCM em argamassas de reboco utilizadas no revestimento interior de edifícios. Este capítulo destina-se a apresentar um ensaio já desenvolvido e utilizado para avaliar o comportamento dos materiais de mudança de fase em

argamassas. Explica, ainda, teoricamente as bases de um ensaio que se pretende realizar na presente dissertação para avaliar o comportamento dos materiais de mudança de fase em argamassas, com base na termografia, utilizando provetes simples, do tipo dos realizados para a restante caracterização de argamassas.

4.3.1. Ensaio com célula de teste

Sá et al. (2012) realizou um estudo em que foram construídas duas células de teste (cubos ocios) de pequenas dimensões com revestimentos interiores distintos: uma célula estava revestida com uma argamassa comum, enquanto a outra era revestida com uma argamassa com a incorporação de PCM. Ambas as células de teste foram sujeitas a variações de temperatura realistas diárias e a eficácia dos revestimentos foi avaliada com o recurso à monitorização da temperatura no interior das células de teste.

4.3.2. Termografia

A termografia de infravermelhos consiste na captação de imagens de calor, não visíveis pelo olho humano, através de uma câmara termográfica. A imagem infravermelha obtida deve ser acompanhada por uma medição térmica precisa, para poder refletir as condições reais do objeto em estudo.

A termografia por infravermelhos tem inúmeras aplicações em edifícios, podendo ser utilizada para a deteção de causas de anomalias verificadas visualmente, tal como ser empregue como instrumento de engenharia preventiva, descobrindo anomalias ainda não visíveis mas já embrionárias, ou para fazer a análise das condições de isolamento térmico da envolvente. Com a termografia de infravermelhos podem detetar-se infiltrações ou fugas de água não visíveis, localizar redes interiores ou simplesmente realizar a análise térmica dos edifícios. Ao longo da análise de um edifício são produzidas imagens, termogramas, e registadas as respetivas temperaturas ao longo da superfície. Após a análise dos dados recolhidos, através de um *software* apropriado, torna-se possível tirar conclusões precisas e indicar as medidas preventivas ou corretivas adequadas.

É de referir que a termografia pode ser acompanhada, complementada ou comparada com outros equipamentos quando existir a necessidade de se determinar temperaturas precisas. Nestes casos é necessária a determinação da emissividade dos materiais com precisão, bem como introduzir outros parâmetros na câmara termográfica.

A emissividade ϵ de um corpo é a relação entre a radiância E desse corpo com a radiância de um corpo negro, sendo possível concluir que a emissividade de um corpo negro é unitária [Henriques, 2011]. A emissividade depende do material, sendo maior para superfícies rugosas e menor para superfícies lisas, por exemplo, o betão pode apresentar uma emissividade de 0,95, enquanto o cobre pode apresentar uma emissividade de apenas 0,05.

Existem vários fatores ambientais que condicionam a medição da temperatura superficial com a câmara termográfica: radiação solar, nuvens, velocidade do vento e humidade da superfície.

A vantagem da termografia é o facto de não ocorrer destruição no edifício durante o ensaio, reduzindo o tempo de inspeção, quantidade de trabalho, equipamento necessário, entre outros. Esta técnica pode ser viável para avaliar comparativamente a influência da introdução de PCM em argamassas.

5. NORMALIZAÇÃO E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO DE ARGAMASSAS DE TERRA

5.1. Considerações gerais

A técnica da construção com terra era baseada no conhecimento empírico dos construtores sendo este conhecimento transmitido de geração em geração, permanecendo até aos dias de hoje, sendo a construção com terra em Portugal desprovida de qualquer tipo de regulamentação ou código de conduta. Contudo, noutros países onde renasceu mais cedo o interesse neste tipo de construção, as técnicas de construção estão regulamentadas, embora de forma pouco significativa quando comparada com outras áreas da engenharia civil.

A Alemanha foi um dos primeiros países a elaborar normas para a construção em Terra [Houben e Guillaud, 2006, citado por Gomes, 2013]. Após a 2ª Guerra Mundial a construção com terra ressurgiu na Alemanha, devido à destruição da indústria dos materiais de construção e à limitação no seu transporte, o que dinamizou e aumentou a utilização de materiais locais [Gomes, 2013]. Em 1944 surgiram os primeiros regulamentos técnicos para a construção de terra, publicados pelo Instituto Alemão para Normalização “DIN – Deutsches Institut für Normung”, tendo sido estes documentos retirados de validade em 1971, sendo considerados obsoletos e sem importância económica [Schroeder et al., 2012, citado por Gomes, 2013]. Contudo, após quase trinta anos, em 1999, foi publicado o documento normativo para a construção de terra “LR – Lehmbau Regeln” que, não sendo uma norma, se apresenta como um documento nacional de referência para a regulamentação neste tipo de construção, sendo seguido por alguns governos regionais. Após a publicação da 3ª edição do documento normativo em 2008, foi reunido um comité para compilação de textos para o desenvolvimento de uma futura norma DIN. Em Setembro de 2011, surgem as pré-normas DIN com as seguintes designações [Schroeder et al., 2012, citado por Gomes, 2013]: DIN 18946 – Argamassas de terra: termos, definições, requerimentos e procedimento de ensaio; DIN 18947 – Rebocos de terra: termos, definições, requerimentos e procedimento de ensaio.

Em 2013 a Alemanha publica então a versão final da norma DIN 18947 [NABau, 2013]. Esta norma será utilizada como referência para a parte experimental desta dissertação de mestrado. Como só existe versão em alemão, optou-se por detalhar o seu conteúdo.

Esta norma específica para argamassas sem qualquer estabilização química e sem qualquer outro ligante para além da terra, está dividida em onze capítulos. O primeiro capítulo especifica o âmbito de aplicação das argamassas de terra, enquanto o segundo capítulo refere as referências normativas utilizadas para a definição desta norma. O capítulo três refere-se aos termos e às definições. O quarto capítulo define os materiais e as formas de fabrico das argamassas de terra. O capítulo cinco refere-se aos requisitos que este tipo de argamassa deve cumprir. O sexto capítulo especifica a definição de cada argamassa segundo as características que apresenta, e o sétimo capítulo refere-se à identificação da descrição da argamassa na embalagem. O capítulo oito refere os métodos utilizados para a caracterização das argamassas de terra. O nono capítulo refere as provas de conformidade que os fabricantes têm de apresentar sobre as argamassas de terra que fabricam. O capítulo dez especifica os dados que devem constar na nota de entrega e o capítulo onze refere as informações que devem constar na ficha técnica deste tipo de argamassas.

A avaliação das argamassas de terra para reboco segundo a norma alemã [NABau, 2013] inclui a análise de aspetos como a retração inicial, a massa volúmica aparente, a resistência à flexão e à compressão, a aderência ao suporte, a resistência à difusão de vapor de água, a condutibilidade térmica, a reação ao fogo, a capacidade de adsorção de água e a resistência à abrasão. No caso de se suspeitar da existência de sais prejudiciais, em quantidades inaceitáveis que possam provocar degradação na argamassa, a norma [NABau, 2013] aconselha a realização de um ensaio para a determinação do teor de sais ao produto pré-doseado.

Para a realização de alguns ensaios de caracterização de argamassas de terra referidos na norma DIN, esta indica que devem ser aplicadas as normas EN 1015-1 até EN 1015-12 [CEN, 1998a, 1998b, 1998c, 1998d, 1998e, 1999a, 1999b, 1999c, 2002].

5.2. Teor de sais

A norma alemã [NABau, 2013] aceita que o produto pré-doseado das argamassas de terra contenha alguns tipos de sais, desde que estes obedeçam aos limites estipulados. Assim, não podem ser apresentados valores superiores a 0,02 M.-% de nitratos, 0,10 M.-% de sulfatos e 0,08 M.-% de cloretos. A norma impõe ainda que o total de sais presente na argamassa não seja superior a 0,12 M.-%. Admite-se que se trate de valores molares limites, função da massa da amostra.

5.3. Preparação de argamassas e provetes de ensaio

A norma alemã define que as argamassas de terra utilizadas em ensaios devem ser preparadas de acordo com o estabelecido na norma europeia EN 1015-2 [CEN, 1998b], tendo em atenção os desvios impostos na norma DIN 18947 [NABau, 2013]. A norma DIN 18947 [NABau, 2013] define que a produção da argamassa deve ser realizada em laboratório através de um equipamento mecânico de amassadura, seguindo o seguinte procedimento:

- Colocação da água necessária e junção da quantidade de sólidos, durante 30s em amassadura mecânica constante;
- Amassadura mecânica durante mais 30 segundos;
- Período de descanso do misturador de 5 minutos;
- Amassadura mecânica durante mais 30 segundos.

A quantidade de água necessária para a amassadura deve ser definida pelo fabricante, de modo a cumprir o espalhamento definido na norma DIN 18947 [NABau, 2013].

A norma define que a argamassa no estado fresco deve ter massa volúmica superior a 1,2 kg/dm³ e uma consistência por espalhamento de 175±5 mm, sendo esta determinada de acordo com a norma EN 1015-3 [CEN, 1999a]. Os provetes de argamassa são realizados com esta argamassa de ensaio de acordo com a norma EN 1015-11 [CEN, 1999b], sendo desmoldados quando se encontrarem endurecidos.

5.4. Retração linear por secagem

Para a determinação da retração linear por secagem utilizam-se no mínimo três prismas de argamassa com 40x40x160 [mm], acondicionados a massa constante a 20±5°C de temperatura e a uma humidade relativa de 50±15%. A medição é feita com o auxílio de uma craveira sobre o lado mais longo do prisma, a meia altura.

Os resultados de retração são obtidos pela redução do comprimento com base no comprimento original, em percentagem de alteração face ao comprimento inicial do prisma. A norma alemã [NABau, 2013] define que os resultados das medições individuais deverão ser arredondados a uma casa decimal e que o resultado final para cada argamassa de terra resulta da média dos três prismas, também arredondada a uma casa decimal.

A retração linear por secagem não deve ser superior a 2%, sendo que rebocos de camadas finas com reforço de fibras podem ter uma retração linear até 3% [NABau, 2013].

Segundo Röhlen e Ziegert (2011), as argamassas de reboco de terra apresentam habitualmente um grau de retração que pode chegar aos 2,5%, enquanto a retração do betão ou de argamassas de cimento é de apenas 0,04% e 0,09%, respetivamente.

5.5. Massa volúmica aparente

A norma DIN 18947 [NABau, 2013] define que a massa volúmica aparente é determinada utilizando provetes de argamassa com 40x40x160 [mm] de dimensões, previamente acondicionados, até atingirem massa constante, nas condições referidas de 23±5°C de temperatura e a uma humidade relativa de 50±15%. Utilizando uma craveira são medidas as dimensões dos provetes ao centro de cada área, realizando-se ainda a determinação da massa através de uma balança com um erro não superior a 0,1 g. A massa volúmica aparente é calculada a partir da relação da massa para o volume exterior dos prismas de argamassa. A norma define que os resultados das medições individuais são arredondados para duas casas decimais e expressos em kg/dm³. O resultado final para cada argamassa é a média das três medições individuais arredondada a duas casas decimais.

As argamassas de reboco de terra são classificadas, de acordo com o Quadro 5.1, em classes de massa volúmica aparente.

Quadro 5.1 – Massa volúmica de argamassa de reboco de terra (com base na norma DIN 18947 [NABau, 2013])

| Classe de Massa volúmica | Massa volúmica seca [kg/dm ³] |
|--------------------------|---|
| 0,9 | 0,81 para 0,90 ^a |
| 1,0 | 0,91 para 1,00 ^a |
| 1,2 | 1,01 para 1,20 ^b |
| 1,4 | 1,21 para 1,40 ^b |
| 1,6 | 1,41 para 1,60 ^b |
| 1,8 | 1,61 para 1,80 ^b |
| 2,0 | 1,81 para 2,00 ^b |
| 2,2 | 2,01 para 2,20 ^b |

^a os valores individuais podem exceder os limites em ±0,05 kg/dm³.
^b os valores individuais podem exceder os limites em ±0,10 kg/dm³.

5.6. Resistências à flexão e à compressão

A norma DIN 18947 [NABau, 2013] define que o ensaio de resistência à flexão e à compressão deve ser realizado de acordo com a norma EN 1015-11 [CEN, 1999b] a um mínimo de três prismas de argamassa com dimensões de 40x40x160 [mm]. Os prismas devem ser armazenados, pelo menos nos últimos 7 dias antes do ensaio, a 23±2°C de temperatura e a 50±5% de humidade relativa. Os resultados dos ensaios devem ser expressos em N/mm², arredondados a uma casa decimal.

A argamassa de terra é classificada, a partir dos valores médios, segundo o Quadro 5.2.

No entanto Röhlen e Ziegert (2011) consideram que os valores mais típicos de resistência à compressão para argamassas de terra e para taipa variam entre 0,6 e 3 N/mm².

5.7. Aderência ao suporte

De acordo com a norma DIN 18947 [NABau, 2013], o ensaio de aderência é feito de acordo com a norma EN 1015-12 [CEN, 2000]. O ensaio realiza-se sobre a argamassa de terra aplicada sobre um suporte (tijolo cerâmico ou bloco de betão), devendo o conjunto ser mantido, pelo menos nos últimos 7 dias antes do ensaio, a 23±2°C de temperatura e a 50±5% de humidade relativa. Os provetes são cortados livremente das superfícies de ensaio, com uma broca central, que pode ser de 50 mm, segundo a norma EN 1015-12 [CEN, 2000]. Esta norma refere que os provetes danificados devem ser postos de parte, devendo garantir-se um mínimo de cinco amostras utilizáveis e expressar-se o resultado pela sua média.

A argamassa de terra é classificada segundo o Quadro 5.2.

Quadro 5.2 – Classe de resistência de rebocos de terra (com base na DIN 18947 [NABau, 2013])

| Classe de Resistência | Resistência à compressão [N/mm ²] | Resistência à tração por flexão [N/mm ²] | Aderência [N/mm ²] |
|-----------------------|---|--|--------------------------------|
| S I | 1,0 para 1,5 | ≥ 0,3 | ≥ 0,05 |
| S II | <1,5 | ≥ 0,7 | ≥ 0,10 |

As argamassas de reboco de terra devem apresentar uma resistência à aderência entre a superfície e as camadas de reboco de pelo menos 0,03 N/mm². No entanto Röhlen e Ziegert (2011) também afirmam serem comuns valores até 0,15 N/mm².

Para além do ensaio de aderência preconizado na norma DIN 18947 [NABau, 2013], Hamard et al. (2013) desenvolveu um ensaio para determinar a tensão de corte de argamassas de terra para rebocos. Para este ensaio são utilizadas amostras com dimensões de 50x40x20 [mm], sendo necessárias pelo menos cinco amostras de cada argamassa. As amostras são carregadas até à rotura por corte através de um dispositivo de carregamento (Figura 5.1), por incrementos de 0,50 kg para um tipo de terra utilizado e 0,25 kg para as restantes. A duração estabelecida para o ensaio é de 30 s. A massa que provoca a rotura (m_f) é dada em kg e a partir dela é possível determinar a tensão de corte através da equação 2.1:

$$\tau = \frac{m_f \times g}{S} \quad (2.1)$$

em que, τ – tensão de corte [N/mm²]; m_f – massa que provoca a rotura [kg]; g – aceleração da gravidade [$g=9,81 \text{ m/s}^2$]; S – secção da amostra [mm²].

5.8. Resistência à difusão do vapor de água

A norma DIN 19847 [NABau, 2013] considera que pode ser assumido o valor de permeabilidade ao vapor de água, μ , de 5 ou 10 [adimensional] sem ser necessário realizar qualquer tipo de ensaio, referindo ainda que, no caso de se querer ensaiar a argamassa de terra a nível da sua resistência à difusão do vapor de água, é possível aplicar a norma EN ISO 12572 [CEN, 2001] ou a norma NP EN 1015-19 [IPQ, 2002].

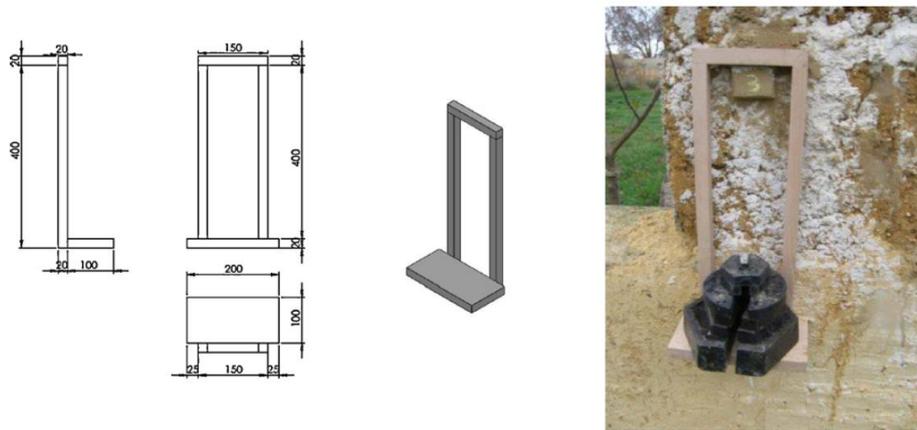


Figura 5.1 – Dispositivo de carregamento e realização do ensaio de corte [Hamard, 2013]

5.9. Condutibilidade térmica

A norma DIN 18947 [NABau, 2013] define que a condutibilidade térmica das argamassas de terra deve ser determinada com base na norma DIN V 4108-4, a que não se teve acesso.

5.10. Reação ao fogo

A norma alemã define que o comportamento ao fogo de rebocos de terra deve ser determinado segundo a norma DIN EN 4102-1 [DIN, 1998] e DIN EN 4102-4 [DIN, 1994], sendo as respectivas argamassas classificadas em conformidade. O ensaio de reação ao fogo é definido consoante a classe de cada material: A1, A2 ou B1.

O Quadro 5.3 define qual o ensaio a realizar à argamassa, consoante a sua classe de material, tal como a periodicidade com que deve ser realizado o ensaio.

Quadro 5.3 – Ensaio de resistência ao fogo de argamassas de reboco de terra (com base na DIN 18947 [NABau, 2013])

| Classe do material | Ensaio | Frequência |
|--------------------|------------------------------|------------|
| A1, A2 | DIN EN 4102-1:1998-05, 5.1.2 | 1 x ano |
| B1 | DIN EN 4102-1:1998-05, 6.2 | 1 x ano |

Röhlen e Ziegert (2011) referem que ensaios realizados mostraram que argamassas de terra com fibras de palha com massas volúmicas superiores a 1200 kg/m³ cumprem os requisitos para serem classificadas como não-inflamáveis.

5.11. Resistência à abrasão

Segundo a norma DIN 18947 [NABau, 2013], a resistência à abrasão de superfícies de terra é medida com a utilização de um disco redondo com uma escova rotativa de plástico. A escova de 65 mm de diâmetro é colocada na vertical com um dispositivo adequado com uma força de contacto constante de 20 N contra a superfície, pressionando até realizar 20 rotações em 15 a 25 segundos. O material de desgaste é recolhido para um recipiente e posteriormente é pesado numa balança com precisão inferior a 0,01 g.

Os valores individuais e médios do ensaio devem ser expressos em gramas e com uma casa decimal, não podendo os resultados exceder os valores indicados no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 – Abrasão máxima do reboco (com base na DIN 18947 [NABau, 2013])

| Classe de Resistência | Ensaio |
|-----------------------|------------|
| SI | $\leq 1,5$ |
| SII | $\leq 0,7$ |

Minke (2011) utilizou este método para a determinação da abrasão de argamassas de reboco de terra, quer *in situ* (embora neste caso não se consiga confirmar a existência de uma força de contacto constante), quer em laboratório (Figura 5.2); é possível observar na Figura 5.3 o efeito do ensaio sobre três amostras de argamassas de terra.



Figura 5.2 – a) Realização do ensaio de abrasão *in situ*; b) Realização do ensaio de abrasão em laboratório [Minke, 2011]



Figura 5.3 – Efeito do ensaio de abrasão sobre várias amostras de argamassas de terra [Minke, 2011]

5.12. Adsorção do vapor de água

Segundo a norma DIN 18947 [NABau, 2013] a adsorção do vapor de água de uma argamassa de reboco de terra é determinada em amostras de placas de reboco de 15 mm de espessura e 1000 cm² de área, realizadas em moldes de aço, sendo selados os cinco lados, para que a adsorção ocorra apenas na superfície com 1000 cm².

A amostra tem de se encontrar em equilíbrio a 50% de humidade relativa, sendo posteriormente exposta a uma humidade relativa de 80% com temperatura constante. Determina-se o aumento de massa de cada provete após 0,5h, 1h, 3h, 6h e 12h, com o auxílio de uma balança de 0,01 g de precisão.

A argamassa é classificada segundo este parâmetro através do Quadro 5.5.

Rohlen e Ziegert (2011) afirmam que o valor médio da adsorção do vapor de água por argamassas de terra para rebocos encontra-se geralmente entre os 50 e os 70 g/m².

Quadro 5.5 – Classes de adsorção do vapor de água de argamassas de reboco de terra (com base na DIN 18947 [NABau, 2013])

| Classe de adsorção de água | Adsorção do vapor de água | | | | |
|----------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| | 0,5 hora g/m ² | 1 hora g/m ² | 3 horas g/m ² | 6 horas g/m ² | 12 horas g/m ² |
| WS I | ≥ 3,5 | ≥ 7,0 | ≥ 13,5 | ≥ 20,0 | ≥ 35,0 |
| WS II | ≥ 5,0 | ≥ 10,0 | ≥ 20,0 | ≥ 30,0 | ≥ 50,0 |
| WS III | ≥ 6,5 | ≥ 13,0 | ≥ 26,5 | ≥ 40,0 | ≥ 65,0 |

6. PLANIFICAÇÃO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Tal como referido, com a presente dissertação pretende-se dar um contributo ao conhecimento do comportamento de argamassas de terra para rebocos interiores, necessário para avaliação das suas características físicas e mecânicas, e assim avaliar as vantagens e desvantagens da aplicação deste tipo de rebocos.

A campanha experimental foi devidamente planeada por forma a serem realizados os ensaios e as atividades previstos e pela ordem definida, cumprindo os tempos de cura e a duração da campanha. As decisões tomadas inicialmente sofreram algumas modificações consoante a obtenção dos resultados, que permitiam escolher o caminho a seguir. Os ensaios foram realizados nos Laboratórios de Construção e na Estação Experimental de Exposição Natural de Revestimentos do DEC da FCT-UNL.

A parte experimental da presente dissertação está dividida em várias fases, que são descritas de seguida.

A **primeira fase** consistiu na amassadura mecânica *in situ* de uma argamassa pré-doseada e a sua posterior aplicação por projeção como reboco em muretes experimentais localizados na Estação Experimental do DEC da FCT-UNL, seguida da produção de provetes prismáticos (com 40x40x160 [mm]), circulares (com 60 mm de diâmetro e 20 mm de espessura) e por uma camada de 1,5 cm de espessura aplicada sobre tijolo furado com a mesma argamassa. Esta fase, realizou-se em julho de 2013 no âmbito de um *workshop* realizado no DEC da FCT-UNL, período anterior ao início da presente dissertação. Nesta fase da campanha experimental insere-se ainda a realização da caracterização da argamassa no estado fresco.

A **segunda fase** da campanha experimental consistiu na realização da caracterização desta argamassa no estado endurecido onde se inserem os ensaios aos provetes de 40x40x160 [mm], com 60 mm de diâmetro e 20 mm de espessura e com 1,5 cm de espessura sobre tijolo e aos rebocos aplicados nos muretes, produzidos na primeira fase desta dissertação. Foi realizada uma nova amassadura, em laboratório mas com amassadura mecânica com berbequim com haste helicoidal, da mesma argamassa pré-doseada para executar provetes específicos para os ensaios de resistência à difusão do vapor de água e adsorção de vapor de água, seguida da caracterização dos novos provetes. Nesta fase da campanha experimental realizou-se novamente a caracterização da argamassa no estado fresco, realizando-se ainda a caracterização do produto pré-doseado.

Por fim, na **terceira fase** foram realizadas amassaduras em laboratório de dez argamassas novas em que se variou a granulometria da areia utilizada, se adicionaram fibras de palha de aveia e materiais de mudança de fase (PCM). De seguida estas argamassas foram, também, todas elas caracterizadas (no estado fresco e endurecido) e comparadas no conjunto de todas as argamassas utilizadas na presente dissertação. Ainda nesta fase, todos os constituintes das argamassas formuladas em laboratório foram caracterizados.

6.1. Caracterização dos suportes

Numa fase inicial, caracterizaram-se os materiais constituintes principais dos suportes em que foi aplicada a argamassa, ou seja, o tijolo furado, o bloco de betão, o adobe e a pedra.

O Quadro 6.1 apresenta o ensaio realizado aos suportes.

Quadro 6.1 – Ensaio a realizar aos suportes e documentos de base ao procedimento de ensaio

| Ensaio | Tipo de material | Norma de Base |
|---|-----------------------|---|
| Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten | Blocos das alvenarias | Fe Pa 39 [LNEC, 2000] e Test. No. II.4 da RILEM [RILEM, 1980] |

6.2. Caracterização dos materiais constituintes das argamassas

Para um melhor conhecimento da constituição das argamassas de terra procedeu-se à caracterização dos materiais utilizados nas argamassas de terra. Desta forma, os ensaios realizados aos constituintes encontram-se no Quadro 6.2.

Quadro 6.2 – Ensaio a realizar aos constituintes das argamassas e documentos de base ao procedimento de ensaio

| Ensaio | Tipo de material | Norma de Base |
|-------------------------------------|--|--------------------------|
| Baridade | Argamassa pré-doseada, fibras, areia fina e grossa, terra argilosa e PCM | NP EN 1097-3 [IPQ, 2000] |
| Análise granulométrica por via seca | Argamassa pré-doseada, areia fina e grossa, terra argilosa e PCM | EN 1015-1 [CEN, 1998a] |
| Reação ao fogo | Argamassa pré-doseada | - |

6.3. Caracterização das argamassas

6.3.1. Ensaio no estado fresco e realização provetes

A caracterização das argamassas no estado fresco foi dividida em três partes, uma vez que foram realizadas duas amassaduras da mesma argamassa com um intervalo de tempo entre elas de cerca de seis meses e por fim a amassadura de dez argamassas diferentes em fevereiro de 2014.

Tal como já foi referenciado, em julho de 2013 no âmbito de um *workshop*, foi realizada uma amassadura *in situ* da argamassa pré-doseada de terra em estudo com a parceria da empresa EMBARRO, que posteriormente foi aplicada nos muretes. Foram ainda produzidos provetes prismáticos de 40x40x160 [mm], circulares de 60 mm de diâmetro e 20 mm de espessura e constituídos por camada de 1,5 cm sobre tijolo furado corrente de 7 cm de espessura [Faria et al., 2014]. A segunda amassadura da mesma argamassa foi realizada em laboratório em janeiro de 2014 para a realização de novos provetes planares de 500x200x15 [mm] e dois tipos de provetes circulares, um com 90 mm de diâmetro e 15 mm de espessura e outro com 90 mm de diâmetro e 20 mm de espessura. Com a mesma argamassa foram ainda produzidos provetes para ensaios de avaliação da suscetibilidade à contaminação biológica, a serem utilizados no âmbito de uma outra dissertação em curso.

Foi realizada a caracterização no estado fresco para as duas amassaduras da mesma argamassa pré-doseada de terra a fim de comparar as diferenças que ocorreriam entre realizar a amassadura *in situ* ou em laboratório, embora através de amassadura mecânica reprodutível *in situ*. Na segunda amassadura foi ainda possível complementar a caracterização efetuada na primeira amassadura. Há que referir que a caracterização a fresco da argamassa realizada *in situ* foi realizada no decorrer do *workshop* antes do início da presente dissertação [Faria et al., 2014].

Os ensaios efetuados à argamassa no seu estado fresco encontram-se no Quadro 6.3.

Quadro 6.3 – Ensaios a realizar à argamassa no estado fresco e documentos de base ao procedimento de ensaio

| Ensaio | Tipo de Material | Norma de base |
|--------------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Consistência por espalhamento | Argamassa no estado fresco | EN 1015-3 [CEN, 1999a] |
| Massa volúmica | Argamassa no estado fresco | EN 1015-6 [CEN, 1998d] |
| Teor de ar | Argamassa no estado fresco | EN 1015-7 [CEN, 1998e] |
| Retenção de água | Argamassa no estado fresco | prEn 1015-8 [CEN, 1999c] |
| Retração linear por secagem | Provetes de argamassa | DIN 18947 [NABau, 2013] |
| Consistência ao penetrómetro | Argamassa no estado fresco | EN 1015-4 [CEN, 1998c] |
| Teor de água | Argamassa no estado fresco | - |
| Abaixamento por espalhamento | Argamassa no estado fresco | - |

Em fevereiro de 2014 procedeu-se à amassadura de dez argamassas diferentes, com o mesmo tipo de terra argilosa, que foram aplicadas em camada de 1,5 cm de espessura sobre tijolo furado de 7 cm de espessura e sobre blocos de betão, tendo ainda sido produzidos provetes prismáticos de 40x40x160 [mm] e circulares de 90 mm de diâmetro e 20 mm de espessura.

6.3.2. Ensaios no estado endurecido – provetes simples

Os provetes prismáticos de 40x40x160 [mm] e os provetes circulares de 60 mm de diâmetro e 20 mm de espessura da argamassa produzida no *workshop* foram caracterizados no estado endurecido após cerca de seis meses da sua produção. No caso dos provetes planares de 500x200x15 [mm] e dos provetes circulares de 90 mm de diâmetro e de 15 mm e de 20 mm de espessura, realizados com a mesma argamassa pré-doseada da fase experimental inicial mas realizados em condições laboratoriais, foram ensaiados após 28 dias da sua produção. Os provetes realizados com as restantes argamassas foram ensaiados após 28 dias da sua realização.

Os ensaios realizados aos provetes das argamassas de terra no estado endurecido apresentam-se no Quadro 6.4.

Quadro 6.4 – Ensaios realizados aos provetes de argamassa no estado endurecido e documentos de base ao procedimento de ensaio

| Ensaio | Tipo de Material | Norma de base |
|---|--|--|
| Condutibilidade térmica | Provetes prismáticos, planares e circulares de argamassa | Manual do equipamento |
| Massa volúmica aparente | Provetes prismáticos de argamassa | DIN 18947 [NABau, 2013] |
| Módulo de elasticidade dinâmico | Provetes prismáticos de argamassa | NP EN 14146 [IPQ, 2007] |
| Resistência à tração por flexão | Provetes prismáticos de argamassa | DIN 18947 [NABau, 2013] e EN 1015-11 [CEN, 1999b] |
| Resistência à compressão | Metade de provetes prismáticos de argamassa | DIN 18947 [NABau, 2013] e EN 1015-11 [CEN, 1999b] |
| Capilaridade | Parte de provetes prismáticos de argamassa | EN 1015-18 [CEN, 2002], EN 15801 [CEN, 2009b] e Test No. II.5 [RILEM, 1980a] |
| Secagem | Parte de provetes prismáticos de argamassa | Test No. II.5 [RILEM, 1980a] e NORMAL 29/88 (1988) |
| Porosimetria | Amostra pequena de argamassa | Manual do equipamento |
| Resistência à difusão do vapor de água | Provetes circulares de argamassa | NP EN 1015-19 [IPQ, 2002], EN ISO 12572 [ISO, 2001] e EN 15803 [CEN, 2009a] |
| Adsorção do vapor de água | Provetes circulares de argamassa | DIN 18947 [NABau, 2013] |
| Resistência à abrasão | Provetes circulares de argamassa | DIN 18947 [NABau, 2013] |

6.3.3. Ensaio no estado endurecido – rebocos e provetes de argamassa sobre tijolo e blocos de betão

Tal como aconteceu nos vários tipos de provetes prismáticos e circulares, também a argamassa pré-doseada realizada na fase experimental inicial aplicada sobre os muretes e sobre o tijolo furado de 7 cm de espessura foram ensaiados após seis meses da sua aplicação. As restantes argamassas foram ensaiadas após 28 dias da sua realização.

No Quadro 6.5 apresentam-se os ensaios efetuados sobre as argamassas aplicadas tanto nos muretes como no tijolo e no bloco de betão.

Quadro 6.5 – Ensaio a realizar ao reboco aplicado nos muretes, à argamassa sobre o tijolo e sobre o bloco de betão e documentos de base ao procedimento de ensaio

| Ensaio | Tipo de Material | Norma de base |
|---|--|--|
| Condutibilidade térmica | Argamassa sobre tijolo e bloco de betão | Manual do equipamento |
| Dureza superficial (Durómetro shore A) | Reboco aplicado no murete, argamassa sobre tijolo e bloco de betão | ASTM D2240 [ASTM, 2000] |
| Resistência superficial por esclerómetro pendular | Reboco aplicado no murete | ASTM C805 [ASTM, 2008] |
| Velocidade de propagação dos ultrassons | Reboco aplicado no murete e argamassa sobre tijolo | Fe Pa 43 [LNEC, 2010] e EN 12504-4 [CEN, 2004]. |
| Coesão superficial (Fita cola) | Reboco aplicado no murete e argamassa sobre tijolo | Drdácký et al. [2014] |
| Martinet - Baronie | Reboco aplicado no murete | Fe Pa 25 [LNEC, 1980] |
| Resistência ao arrancamento (aderência com equipamento para tintas) | Reboco aplicado no murete, argamassa sobre tijolo e bloco de betão | DIN 18947 [NABau, 2013] e EN 1015-12 [CEN, 2000] |
| Resistência à abrasão | Argamassa sobre tijolo | DIN 18947 [NABau, 2013] |
| Porosimetria | Amostra pequena de argamassa | Manual do equipamento |
| Termografia | Argamassa sobre tijolo | - |

7. MATERIAIS, CONSTITUIÇÃO DAS ARGAMASSAS, REBOCOS E PROVETES

7.1. Constituintes das argamassas

7.1.1. Argamassas pré-doseadas

Esta argamassa (Figura 7.1) é comercializada pela empresa EMBARRO, pronta a aplicar, para utilização manual ou à máquina. É composta por terra argilosa destorroada, areia mista com dimensões entre os 0 e os 2 mm e reforçada com fibras naturais, neste caso concreto, palha de aveia com dimensões de 1 a 2 cm [EMBARRO, www.embarro.com].

A baridade da argamassa pré-doseada é determinada segundo a norma NP EN 1097-3 [IPQ, 2000] e a análise granulométrica determinada segundo a norma EN 1015-1 [CEN, 1998a].

De acordo com o fabricante, a constituição do produto fornecido em julho de 2013 e fevereiro de 2014 mantem-se genericamente; podem apenas ocorrer ligeiras alterações devidas a diferenças mínimas nos lotes de terra e de areia obtidos em alturas separadas temporalmente.



Figura 7.1 – Argamassa pré-doseada da fase experimental inicial, P₀

Ziegert (2011) realizou um estudo de difração de raio X (DRX) sobre uma argamassa pré-doseada de terra produzida pela mesma empresa que produz as argamassas em estudo. A amostra de argamassa apresenta elevadas percentagens de quartzo, ilite e dolomite. Numa percentagem comparativamente inferior, estão presentes a calcite e a hematite. Foram ainda detetados vestígios de albite e caulinite.

7.1.2. Terra argilosa

Um dos principais constituintes das argamassas de terra é a argila, que desempenha a função de ligante natural. Para caracterizar este constituinte da argamassa (Figura 7.2) foi estudada a baridade segundo a norma NP EN 1097-3 [IPQ, 2000] e a análise granulométrica segundo a norma EN 1015-1 [CEN, 1998a].

7.1.3. Água e areia

A água adicionada à amassadura das argamassas foi definida pelo fabricante consoante a trabalhabilidade pretendida, tendo dessa forma variado consoante o tipo de mistura que se realizava. A argamassa produzida em julho de 2013, no *workshop*, para aplicação por projeção mecânica, era propositadamente bastante fluída. Para a replicação desta argamassa em janeiro de 2014 introduziu-se o teor de água que tinha sido aferido em julho de 2013.

Para a produção das argamassas em laboratório formuladas em fevereiro de 2014 foram utilizadas dois tipos de areia: uma areia fina fornecida pelo fabricante das argamassas e outra areia branca, mais grossa, já utilizada durante o *workshop*, designando-se como areia AF e AG (Figura 7.3), respetivamente.

A baridade das areias foi determinada segundo a norma NP EN 1097-3 [IPQ, 2000] enquanto as curvas granulométricas das duas areias foram efetuadas com base na norma EN 1015-1 [CEN, 1998a].



Figura 7.2 – Argila



Figura 7.3 – Areia fina (à esq.); Areia branca grossa (à dir.)

7.1.4. Fibras

Numa das argamassas formuladas em laboratório foram utilizadas fibras de palha de aveia com comprimento compreendido entre 1 e 2 cm (Figura 7.4 - à esquerda). De modo a ser possível caracterizar este material, foi estudada a sua baridade segundo a norma EN 1015-1 [CEN, 1998a].

7.1.5. Material de mudança de fase

Em várias argamassas formuladas em laboratório foi introduzido um material de mudança de fase (PCM – *Phase Change Material*) de parafina encapsulado, comercializado como Micronal DS 5040 X (Figura 7.4 – à direita) e cuja ficha técnica é apresentada no anexo A.1. [BASF, www.basf.com]. Para caracterizar este material foi estudada a sua baridade segundo a norma EN 1015-1 [CEN, 1998a].



Figura 7.4 – Fibras vegetais de palha de aveia cortada (à esq.) e PCM utilizados (à dir.)

7.2. Constituição e produção das argamassas

Como referido anteriormente, durante um seminário e um *workshop* sobre rebocos de terra que teve lugar no DEC da FCT-UNL, foi preparada *in situ*, com o apoio da empresa EMBARRO, uma argamassa de terra pré-doseada comercializada em Portugal e Espanha por essa empresa. Posteriormente a argamassa foi aplicada sobre muretes experimentais constituídos por diferentes alvenarias, localizados na Estação Experimental que se encontra na FCT-UNL, a cerca de 3 km da costa atlântica. Uma porção de argamassa foi projetada para um balde e posteriormente transportada para o laboratório (cerca de 30 m) tendo sido caracterizada no estado fresco. Paralelamente foram produzidos vários provetes de argamassa em laboratório, com a mesma argamassa pré-doseada utilizada [Faria et al., 2014].



Figura 7.5 – Observação visual do reboco aplicado num dos muretes de alvenaria - cor, textura e presença das fibras vegetais [Faria et al., 2014]

A argamassa de terra pré-doseada utilizada foi preparada mecanicamente, com a quantidade de água necessária para permitir uma fácil aplicação através do equipamento de projeção e uma fácil regularização [Faria et al., 2014]. A argamassa foi projetada numa camada única e, de seguida, regularizada com uma régua.

A mesma argamassa, com a mesma quantidade de água utilizada (determinada através do teor em água da argamassa fresca preparada *in situ*), foi produzida em janeiro de 2014 em condições controladas de laboratório com um berbequim elétrico com haste helicoidal. O produto da argamassa pré-doseada foi misturado mecanicamente durante 5 minutos após a adição da água (Figura 7.8 – à esquerda).

Foram ainda produzidas dez novas argamassas em fevereiro de 2014 (Quadro 7.1). O traço volumétrico base destas argamassas é de 1:3 (terra argilosa: areia). O ligante utilizado é apenas a argila, que mantém a sua quantidade e tipo em todas as argamassas. Como agregado são utilizados dois tipos de areias: areia fina do fabricante (AF) e areia branca grossa (AG). A argamassa pré-doseada apenas continha areia AF; pode apenas diferir da argamassa produzida na fase experimental inicial por pequenas diferenças no lote de terra e areia, mas que são do mesmo local e produtor. Os materiais das restantes argamassas formuladas foram previamente homogeneizados, após mistura dos constituintes secos.

A amassadura destas argamassas foi realizada de acordo com a norma DIN 18947 [NABau, 2013], específica para argamassas de terra. Foi utilizado um misturador mecânico de laboratório composto por uma cuba de aço inoxidável com capacidade para 3 litros e uma pá acionado por um motor elétrico.

Quadro 7.1 – Designação e composição das argamassas

| Designação | Constituição da argamassa |
|------------------------|---|
| P₀_W | Argamassa pré-doseada da fase experimental inicial |
| P₀_L | Argamassa pré-doseada da fase experimental inicial, realizada em Laboratório |
| P | Argamassa pré-doseada (com fibras e areia fina) com 20% (volume total) de água |
| FS | Argamassa com traço volumétrico de 1:3 (argila: areia fina) e com 20% (vol. total) de água |
| FS_PCM20 | Argamassa com base no traço vol. 1:3 (argila: areia fina), com 20% (vol. total) de água e 20% do volume de areia fina substituída por PCM |
| CS | Argamassa ao traço vol. 1:3 (argila: areia grossa) e com 17% (vol. total) de água |
| CS_PCM20 | Argamassa com base no traço vol. 1:3 (argila: areia grossa), com 17% (vol. total) de água e 20% do volume de areia grossa substituída por PCM |
| CS45_FS30 | Argamassa ao traço vol. de 1:3 (argila: agregado) em que 45% do agregado é areia grossa e 30% é areia fina, com 20% (vol. total) de água |
| CS30_FS45 | Argamassa ao traço vol. 1:3 (argila: agregado) em que 30% do agregado é areia grossa e 45% é areia fina, com 20% (vol. total) de água |
| CS30_FS25_PCM20 | Argamassa com base no traço vol. 1:3 (argila: agregado) em que 30% do agregado é areia grossa, 25% é areia fina e 20% de PCM, com 20% (vol. total) de água |
| CS30_FS15_PCM30 | Argamassa com traço vol. 1:3 (argila: agregado) em que 30% do agregado é areia grossa, 15% é areia fina e 30% de PCM, com 20% (vol. total) de água |
| CS30_FS45_F5 | Argamassa com traço vol. de 1:3 (argila: agregado) em que 30% do agregado é areia grossa e 45% é areia fina, com 5% do volume total de fibras, com 25% (vol. total) de água |

Introduz-se a quantidade de material na cuba, seguida da introdução da água mas com a misturadora parada por incapacidade do equipamento. A misturadora é acionada durante 30 segundos. Após estes 30 segundos a argamassa tem um tempo de repouso de 5 minutos. Finalmente prossegue-se com a amassadura durante mais 30 segundos.

As argamassas foram caracterizadas no estado fresco e foram produzidos provetes para ensaios. Os provetes foram mantidos no molde numa sala condicionada com uma temperatura de $20 \pm 3^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ de humidade relativa. Após a sua secagem os provetes foram desmoldados e permaneceram na sala condicionada até à data dos ensaios.

7.3. Aplicação de rebocos de argamassa de terra nos muretes

A argamassa de terra foi aplicada em suportes de alvenarias diferentes: muretes de alvenaria de pedra argamassada, de blocos de betão, de tijolo furado de 11 cm e de adobe (Figura 7.6 – à esquerda).

Os muretes foram construídos em junho de 2013, sobre uma sapata simples de betão sem quaisquer cortes suplementares de capilaridade, sendo os rebocos aplicados em julho do mesmo ano, tendo sido deixados inicialmente sem qualquer tipo de proteção. A argamassa foi projetada diretamente sobre os quatro muretes e o reboco foi facilmente regularizado após a projeção, tendo cerca de dois centímetros de espessura [Faria et al., 2014].

Em setembro de 2013 os muretes foram protegidos inicialmente apenas através de um telheiro e posteriormente foi colocada uma rede na fachada exposta a Sul (Figura 7.6 – à direita). A colocação desta rede deveu-se ao facto de se ter verificado que a proteção conferida pelo telheiro não era suficiente para proteger os rebocos devido à forte incidência de chuva batida a vento de Sul. Efetivamente ocorreram degradações nos rebocos expostos a Sul devido a lavagem da argila por forte incidência da chuva na parte inferior dos muretes [Faria et al. 2014].

À data da campanha experimental de caracterização dos rebocos estes encontravam-se construídos há cerca de seis meses. A superfície ensaiada encontrava-se virada a Norte, exceto no caso do murete de tijolo furado, cujo reboco ensaiado se encontrava na parte superior da face Sul, uma vez que não tinha sido aplicado a Norte e na parte inferior Sul estava degradado (Figura 7.7).

Aquando da realização de alguns ensaios, apesar do mau tempo e das elevadas humidades relativas, o conjunto suporte-argamassa encontrava-se relativamente seco. Como estavam protegidos, a única forma deste conjunto conter alguma humidade seria através do facto de estar diretamente fundado no terreno, sem fundação independente nem corte hídrico, e por adsorção direta de vapor de água do ar.



Figura 7.6 – Muretes de alvenaria de tijolo furado, de adobe, de blocos de betão e de pedra argamassada (da esquerda para a direita) (à esq.) [Faria et al., 2014]; Proteção dos muretes vista pela fachada Sul (à dir.) [Faria et al., 2014]

7.4. Execução de provetes de argamassa

Várias amostras de argamassa foram produzidas com a mesma argamassa de terra pré-doseada, P₀_W, a partir do mesmo lote utilizado *in situ*. Os provetes prismáticos de 40x40x160 [mm] foram compactados manualmente nos moldes metálicos e regularizados; os provetes circulares de 60 mm de diâmetro e

20 mm de espessura foram produzidos em moldes de plástico e também compactados manualmente. Foram ainda realizados provetes de 1,5 cm de argamassa sobre tijolo furado de 7 cm. Os tijolos foram previamente pulverizados com água, sendo posteriormente a argamassa deixada cair de 70 cm de altura de forma a simular a energia de aplicação *in situ*; a superfície foi regularizada de seguida, apresentando uma espessura de 1,5 cm [Faria et al., 2014].



Figura 7.7 – Degradação da argamassa de terra no lado Sul dos muretes

Todos os provetes foram deixados secar e os prismáticos e circulares foram desmoldados. Junta-mente com estes provetes, os sobre tijolo foram colocados numa sala condicionada com $65\pm 5\%$ de humidade relativa e $20\pm 3^\circ\text{C}$ de temperatura.

Os provetes prismáticos foram utilizados na maioria dos ensaios realizados à argamassa de terra no estado endurecido: variações dimensionais, módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tração por flexão e à compressão, massa volúmica aparente, absorção de água por capilaridade e secagem, condutibilidade térmica. Os provetes circulares foram utilizados no ensaio de condutibilidade térmica e os provetes de argamassa de 1,5 cm sobre tijolo foram utilizados para o ensaio de velocidade de propagação de ultrassons, durómetro, coesão superficial, abrasão, condutibilidade térmica e aderência.

Para os ensaios de resistência à difusão do vapor de água e adsorção de vapor de água foi necessário realizar novos provetes, tendo sido produzida uma nova amassadura desta argamassa pré-doseada, P₀_L. A argamassa produzida posteriormente, em janeiro de 2014, foi misturada mecanicamente mas por haste helicoidal (Figura 7.8 – à esquerda), a partir do mesmo lote de argamassa pré-doseada utilizada na amassadura anterior. A argamassa foi aplicada sobre os provetes a uma distância de cerca de 20 cm. Foram produzidos provetes planares de 500x200x15 [mm] em moldes metálicos específicos de aço galvanizado impermeabilizados (Figura 7.8 – ao centro) com película aderente de polietileno, que foram compactados através da oscilação do molde em quatro direções alternadas, em moldes metálicos. Foram regularizados de seguida, rasando a superfície com uma talocha, com movimentos de serra. Para executar os provetes circulares foram utilizados moldes de plástico com uma base de madeira, também ela impermeabilizada com película aderente de polietileno, tendo a aplicação da argamassa nestes provetes seguido o mesmo procedimento que nos provetes planares (Figura 7.8 – à direita).

Tal como referido anteriormente, para além destas argamassas foram realizadas mais dez argamassas de terra, em fevereiro de 2014 com diferentes constituições. Para cada uma destas argamassas foram realizados vários tipos de moldes (Quadro 7.2).

Nas novas argamassa foram realizados todos os ensaios laboratoriais realizados à argamassa da fase experimental inicial, P₀; no entanto, os procedimentos alternativos que foram implementados em provetes da mesma argamassa produzida na fase experimental inicial permitiram optar, em cada caso, pelo procedimento que se considerou mais adequado e exequível. Para além desses ensaios, com os provetes de argamassa sobre o tijolo furado de 7 cm de espessura foi realizado o ensaio de termografia para tentar, de forma preliminar, avaliar o efeito dos PCM sobre estas argamassas.



Figura 7.8 – Mistura em laboratório da argamassa pré-doseada (à esq.); Molde de 500x200x15 [mm] em aço inoxidável (ao centro); Preparação dos provetes circulares de 90 mm de diâmetro e 15 mm e 2 mm de espessura (à dir.)

Quadro 7.2 – Provetes realizados com argamassas produzidas em fevereiro de 2014

| Designação | Prismas (40x40x160 mm) | Circulares (9cm de diâmetro e 1,5cm de espessura) | 1,5cm de espessura sobre tijolo | 1,5cm de espessura sobre bloco de betão |
|-----------------|---------------------------|---|---------------------------------|---|
| P | 6 | 3 | 1 | 1 |
| FS | 6 | 3 | 1 | 1 |
| FS_PCM20 | 6 | 3 | 1 | 1 |
| CS | 3 | - | - | - |
| CS_PCM20 | 3 | 3 | - | - |
| CS45_FS30 | 3 | 3 | - | - |
| CS30_FS45 | 6 | 3 | 1 | 1 |
| CS30_FS25_PCM20 | 9 | 3 | 2 | 1 |
| CS30_FS15_PCM30 | 9 | 3 | 2 | 1 |
| CS30_FS45_F5 | 6 | 3 | 1 | - |

8. CARACTERIZAÇÃO DOS SUPORTES E DA ARGAMASSA DA FASE EXPERIMENTAL INICIAL

Neste capítulo expõe-se o procedimento realizado em cada um dos ensaios e os resultados obtidos em cada um. Os valores parciais obtidos em cada ensaio constam no Anexo A.2.

8.1. Suportes – Absorção de água sob baixa pressão

Procedimento de ensaio

O ensaio de absorção de água sob baixa pressão realizou-se de acordo com a ficha de ensaio Fe Pa 39 [LNEC, 2002] e com o Test N.ºII.4 da RILEM [RILEM, 1980]. A absorção de água sob baixa pressão através dos tubos de Karsten permite avaliar a permeabilidade de um material e também a microfissuração que pode ter sofrido, através da quantidade de água absorvida ao longo do tempo.

Marcaram-se os pontos em que se iria realizar o ensaio e de seguida fixaram-se os tubos de Karsten – graduados de 0 a 4 ml – com plasticina estanque, no provete, vedando a toda a volta e garantindo a área de contacto central (Figura 8.1). Encheram-se os tubos até à marca de 10 ml e começou-se a cronometrar o tempo (enchimento desfasado de 1 minuto entre tubos). Assim que a água chegou à marca de 10 ml, 20 ml, 30 ml e 40 ml foram anotados os tempos decorridos para absorção da água, até perfazer uma hora. Passada uma hora anotou-se a quantidade de água absorvida nos três tubos de cada um dos quatro muretes.

Os resultados mostram a quantidade total de água absorvida por cada argamassa através da média entre os 3 tubos para cada murete. O coeficiente de absorção obtém-se aos 60 minutos através da seguinte equação 6.1:

$$ca = \frac{w_{m60} \times 10^{-3}}{\phi_m^2 \times \frac{\pi}{4} \times 10^{-6} \times \sqrt{60}} \quad (6.1)$$

em que ca – coeficiente de absorção [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{min}}$]; w_{m60} – quantidade média de água absorvida em 60 minutos [ml]; ϕ_m – diâmetro médio da água em contacto com o bloco de alvenaria [mm].



Figura 8.1 – Aplicação dos tubos de Karsten sobre os tijolos do murete de tijolo furado

Tal como referido, o ensaio foi realizado em cada um dos quatro suportes existentes, alvenaria de pedra argamassada, tijolo de 11 cm, bloco de betão e bloco de adobe.

Resultados

Os valores médios e os respetivos desvios-padrão dos coeficientes de absorção para cada um dos suportes constam no Quadro 8.1. A Figura 8.2 mostra a variação de água absorvida em cada suporte de uma forma simplesmente representativa.

Quadro 8.1 – Valores médios e desvio-padrão do coeficiente de absorção para cada suporte

| CA_{ik} [kg/(m ³ .min ^{1/2})] | Tijolo | Blocos de be- tão | Adobe | Pedra |
|---|--------|----------------------|-------|-------|
| Média | 0,73 | 1,06 | 0,29 | 0,04 |
| Desvio padrão | 0,37 | 0,00 | 0,00 | 0,04 |

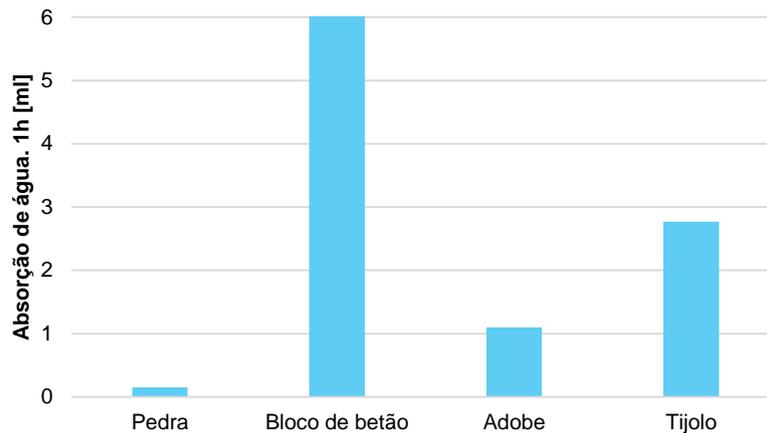


Figura 8.2 – Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten nos suportes ao fim de 1h

Da análise dos dados obtidos é possível concluir que os blocos de betão apresentam uma absorção de água muito rápida enquanto a alvenaria de pedra apresenta um valor quase nulo de absorção de água sob baixa pressão.

8.2. Produto pré-doseado

8.2.1. Baridade

Procedimento de ensaio

A baridade foi determinada com base na norma NP EN 1097-3 [IPQ, 2000]. A determinação da baridade baseia-se na determinação da massa de material seco que preenche um recipiente de capacidade conhecida e é necessária para se poder medir rigorosamente o traço da argamassa em massa, correspondendo-o em traço volumétrico.

Em primeiro colocou-se o material a ensaiar no funil, tapado na base, e com o equipamento em aço colocado num tabuleiro de modo a evitar perdas de material (a altura a que se encontra o funil é <50mm). Colocou-se o funil no suporte (Figura 8.3 – à esquerda), com o funil cheio, abriu-se a sua base e o material caiu por gravidade para dentro do recipiente cilíndrico colocado inferiormente (Figura 8.3 – à direita). Quando o recipiente ficou cheio, alisou-se a superfície e pesou-se. Este procedimento foi repetido mais duas vezes. É de referir que o volume do recipiente já tinha sido determinado, pelo que não foi necessário realizar o ensaio para o determinar.

A baridade do material é dada pela equação 7.1:

$$B = \frac{m_r + m - m_r}{V_r} \times 10^{-3} \quad (7.1)$$

em que B – baridade de dado material [kg/dm^3]; m_{r+m} – massa do recipiente com o material [g]; m_r – massa do recipiente [g]; V_r – volume do recipiente cilíndrico ($0,749 \text{ dm}^3$).



Figura 8.3 – Material necessário para o ensaio de baridade (à esq.); Ensaio de baridade à argamassa pré-doseada (à dir.)

Resultados

A argamassa P_0 apresenta um valor de baridade em termos de média e desvio-padrão de $1,17 \pm 0,01 \text{ kg}/\text{dm}^3$.

8.2.2. Análise granulométrica

Procedimento de ensaio

A análise granulométrica foi realizada através do método de peneiração, por via seca, com base na norma EN 1015-1 [CEN, 1998a]. A análise granulométrica de um dado material consiste na separação do mesmo em partes, contendo cada uma dessas partes as partículas com dimensões estabelecidas pelos peneiros. O conhecimento da curva granulométrica permite saber as percentagens de material de dimensões diferentes, o que possibilita que se entenda melhor o efeito que terá sobre a argamassa. Nesta análise granulométrica foram utilizados os peneiros da série principal.

Secou-se a amostra a ensaiar durante 24 horas numa estufa à temperatura máxima de 60°C . Retirou-se para um tabuleiro aproximadamente 1,5 kg de amostra seca, medida numa balança de precisão de 0,1g. Os peneiros de malha quadrada foram ordenados dos de malha superior para os de malha inferior, tendo sido colocada uma base e uma tampa de forma a evitar perda de material. A amostra de material foi colocada no peneiro de maior abertura de malha e o conjunto de peneiros foi colocado na máquina de vibração (Figura 8.4 – à esquerda). A vibração horizontal da máquina e a ação da gravidade permitem que a amostra vá passando pelos peneiros, deixando retida a parte correspondente a cada malha nos diferentes peneiros. A vibração foi mantida durante 5 minutos e de seguida pesou-se o material retido em cada um dos peneiros, com o cuidado de remover o material retido na base do peneiro anterior com uma escova (Figura 8.4 – à direita). O procedimento foi repetido mais duas vezes por forma a obter valores médios e minimizar os erros resultantes da possível perda de material.

A percentagem de material retida em cada peneiro é calculada através da equação 7.2:

$$\%_{retida} = \frac{m_{peneiro}}{m_{amostra}} \times 100 \quad (7.2)$$

em que $\%_{\text{retida}}$ – percentagem retida num determinado peneiro [%]; m_{peneiro} – massa de material retido num determinado peneiro [g]; m_{amostra} – massa total de amostra ensaiada [g].



Figura 8.4 – Peneiros de malha quadrada e máquina de vibração horizontal (à esq.); Amostra recolhida em cada peneiro (à dir.)

Através da percentagem de material retido em cada peneiro obtém-se a percentagem de material acumulado em cada peneiro, sendo possível posteriormente traçar a curva granulométrica (a seco) correspondente.

Resultados

A curva granulométrica obtida para a argamassa pré-doseada P_0 é apresentada na Figura 8.5.

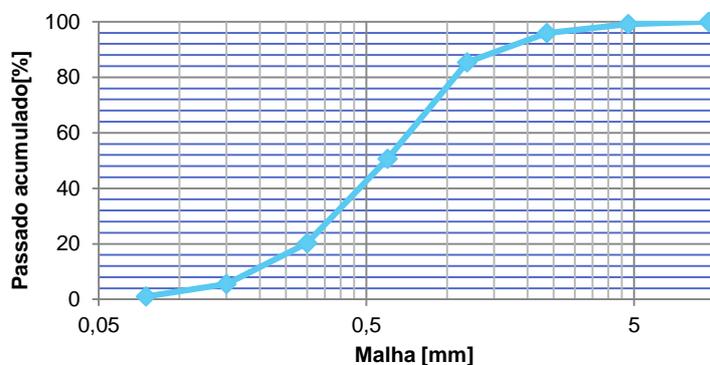


Figura 8.5 – Curva granulométrica da argamassa pré-doseada, P_0

8.2.3. Reação ao fogo

Procedimento de ensaio

Tal como referido anteriormente, a norma DIN EN 4102-4 [DIN, 1994] define que as argamassas de terra podem ser classificadas como sendo não inflamáveis. No caso de estas argamassas conterem fibras orgânicas, a norma NP EN 998-1 [IPQ, 2010] define que a quantidade de matéria orgânica homogeneamente distribuída será no máximo de 1% em massa ou em volume (contando o mais desfavorável), de modo a que a argamassa possa ser classificada como não inflamável.

Na presente dissertação apenas se determinou a quantidade de matéria orgânica presente na argamassa de forma a poder classificá-la como sendo não-inflamável ou inflamável. Pesou-se uma determinada quantidade de produto pré-doseado com uma balança de 0,1g de precisão. A quantidade de material

separado é colocada nos peneiros utilizados na análise granulométrica e a mesa de agitação é acionada por 5 minutos \pm 10 segundos. São recolhidas as fibras (de palha de aveia) retidas em cada peneiro e o conjunto é pesado numa balança de 0,001g de precisão.

Resultados

A massa total de produto pré-doseado foi de 1,533 kg tendo sido recolhida uma massa de fibras de 3,246 g, pelo que a percentagem de fibras presente na argamassa pré-doseada é de 0,21%. Dessa forma a argamassa pode ser automaticamente classificada como não inflamável.

8.3. Argamassa no estado fresco

8.3.1. Consistência por espalhamento

Procedimento de ensaio

A medição do espalhamento (Figura 8.6) realizou-se com base na norma EN 1015-3 [CEN, 1999]. O espalhamento de uma argamassa quantifica a consistência e dá uma ideia da influência que a água tem na trabalhabilidade da argamassa.



Figura 8.6 – a) Aspeto da argamassa de terra sobre a mesa de espalhamento; b) Aspeto da argamassa após as 15 pancadas da mesa de espalhamento; c) Medição do espalhamento

Antes de iniciar o ensaio limpou-se a mesa de espalhamento e o molde troncocónico com um pano húmido para humedecer as superfícies de contacto. Imediatamente após a realização da argamassa colocou-se o molde troncocónico centrado na mesa de espalhamento e adicionaram-se duas camadas de argamassa, cada uma compactada com um mínimo de 10 inserções do pilão. Rasou-se a superfície do molde com uma colher de pedreiro, em movimento do tipo “serra”, para retirar o excesso de material e limpou-se os possíveis vestígios de água ou argamassa que se encontravam à volta do cone e na mesa de espalhamento. Retirou-se o molde com cuidado e deram-se 15 pancadas em 15 segundos, por rotação da manivela da mesa, com o ritmo de uma pancada por segundo. Por fim, com o auxílio da craveira, mediu-se o diâmetro da argamassa espalhada em duas direções ortogonais, de preferência na maior e na menor dimensão.

Resultados

Cada resultado deste ensaio foi dado pela média das duas medições realizadas na amostra de argamassa. Obteve-se o valor médio de $182,3 \pm 2,5$ mm. O resultado obtido para a mesma argamassa quando amassada no decorrer do *workshop* foi de $178,8 \pm 2,5$ mm [Faria et al., 2014]. A diferença entre

valores médios não ultrapassa 5%, o que revela uma boa estabilidade da consistência da argamassa, mesmo quando produzida por sistemas de amassadura distintos.

8.3.2. Massa volúmica

Procedimento de ensaio

Este ensaio foi realizado com base na norma europeia EN 1015-6 [CEN, 1998d]. O ensaio pretende avaliar o efeito da introdução de diferentes quantidades de terra na massa volúmica da argamassa no estado fresco.

A realização deste ensaio seguiu o procedimento seguinte. Primeiro tarou-se a balança de precisão de 0,1g com um recipiente cilíndrico vazio, com capacidade de 1L. De seguida, depois de devidamente preparada, a argamassa foi colocada no interior do recipiente, até metade da sua capacidade. A compactação foi feita através da oscilação do recipiente em quatro direções alternadas. Deixando o recipiente de um lado apoiado, levantou-se do lado oposto a uma altura de 3 cm e deixou-se cair, repetindo para cada uma das restantes três direções. Encheu-se completamente o recipiente e voltou-se a compactar do mesmo modo. Retirou-se a argamassa em excesso, rasando-se com a colher de pedreiro o bordo superior do recipiente. Por fim, procedeu-se à pesagem do conjunto da argamassa e recipiente, previamente limpo pelo exterior com um pano.

Resultados

O resultado deste ensaio consiste na medição da massa de uma amostra desta amassadura, tendo sido obtido o valor de 2,11 kg/dm³. A massa volúmica da argamassa preparada durante o *workshop* foi de 2,03 kg/dm³ [Faria et al., 2014]. Também em termos de massa volúmica a variação detetada entre amassaduras foi muito reduzida.

8.3.3. Teor de ar

Procedimento de ensaio

Este ensaio foi realizado à argamassa no estado fresco, com base na norma europeia EN 1015-7 [CEN, 1998b]. Esta norma define dois métodos de determinação do teor de ar incorporado: método da pressão (só deve ser usado para argamassas com teores de ar inferiores a 20%) e método do álcool (utilizado para argamassas com teor de ar de 20% ou superior). O método utilizado foi o da pressão que considera que o volume ocupado por água na argamassa corresponde ao teor de ar incorporado. A avaliação deste parâmetro é importante para relacionar a maior percentagem de ar com a trabalhabilidade, a compactidade e as resistências mecânicas.

Após a calibração do aparelho, o procedimento deste ensaio seguiu o descrito em seguida. Colocou-se a argamassa fresca num recipiente próprio para a determinação do teor de ar em duas camadas, cada uma delas compactada através da oscilação do recipiente em quatro direções alternadas, como descrito anteriormente (Figura 8.7 – à esquerda). Retirou-se o excesso rasando-se a superfície com a colher de pedreiro e de seguida limpavam-se os bordos do recipiente com um pano húmido. Fixou-se a superfície do recipiente ao equipamento de medição de teor de ar (Figura 8.7 – à direita) com os grampos e expulsou-se o ar interior com a introdução de água, através de um esguicho, na válvula A, até sair sem bolhas através da válvula B. De seguida, ajustou-se o ponteiro do manómetro, bombeando ar para a câmara superior,

para permitir a descida do ponteiro e assim o seu ajuste ao zero. Finalmente, fecharam-se as válvulas A e B e pressionou-se a válvula de escape durante aproximadamente 20 segundos (para estabilização), dando-se umas leves pancadas no manómetro. A leitura é dada pelo mostrador do manómetro arredondado a 0,1.



Figura 8.7 – Aspeto da argamassa no recipiente próprio para o ensaio de teor de ar (à esq.); Equipamento para determinação do teor de ar (à dir.)

Resultados

O resultado deste ensaio consiste numa única medição e é expresso em percentagem. Neste caso o teor de ar é de 2,5% para a amassadura da argamassa em laboratório e 2,8% para a amassadura da argamassa produzida no decorrer do *workshop* [Faria et al., 2014]. O teor em ar entre amassaduras manteve-se bastante estável.

8.3.4. Retenção de água

Procedimento de ensaio

Este ensaio foi realizado com base na ficha de ensaio Fe 32 UNL/FCT-DEC [UNL/DEC, 2000], que se baseia na norma prEN 1015-8 [CEN,1999c]. Com a realização deste ensaio, é possível conhecer a quantidade de água que fica retida na argamassa, depois de parte desta ser absorvida pelo suporte onde é aplicada.

O procedimento de ensaio é descrito em seguida. Procedeu-se previamente à pesagem do molde metálico cilíndrico vazio, de dimensões interiores de 100 mm de diâmetro e 25 mm de altura, numa balança de precisão de 0,001 g. Encheu-se o molde até metade com a colher de pedreiro, tendo sido compactada através da oscilação do recipiente em quatro direções alternadas, como referido anteriormente. Encheu-se o restante molde, compactou-se do mesmo modo, rasou-se a superfície e limpou-se o molde. Pesou-se o molde preenchido e cobriu-se a superfície da argamassa com uma gaze de algodão e colocaram-se 16 folhas de papel de filtro, pesadas anteriormente, por cima. Cobriu-se o conjunto com um vidro de 5 mm de espessura e secção quadrada e inverteu-se o conjunto sobre uma superfície plana, tendo sido colocado por cima um peso de 2 kg e controlado o tempo decorrido com um cronómetro (Figura 8.8 – à esquerda). Passados 5 minutos \pm 10 segundos o conjunto foi novamente invertido e colocado na posição inicial, sendo o papel de filtro retirado. Por fim, determinou-se novamente a massa das 16 folhas de papel de filtro (Figura 8.8 – à direita).

A retenção de água é dada através de uma percentagem de água presente inicialmente na argamassa, que depende da massa de água que constitui a argamassa colocada dentro do molde, sendo dada pela equação 7.3.:

$$m_a = \frac{a_g \times (m_c - m_v)}{\sum_{i=1}^n c_i + a_g} \quad (7.3.)$$

em que m_a – massa de água que constitui a argamassa colocada no molde [g]; a_g – massa de água usada na amassadura [g]; c_i – massa de cada um dos constituintes utilizados [g]; m_c – massa do molde de argamassa [g]; m_v – massa do molde vazio [g].

A retenção de água, propriamente dita, é obtida através da equação 7.4.:

$$R = \frac{m_a - (m_h - m_f)}{m_a} \times 100 \quad (7.4.)$$

em que R – retenção de água [%]; m_a – massa de água que constitui a argamassa colocada no molde [g]; m_h – massa de 16 folhas de papel de filtro no final do ensaio [g]; m_f – massa de 16 folhas de papel de filtro secas [g].



Figura 8.8 – Conjunto invertido com um peso de 2 kg (à esq.); Aspeto das folhas de papel de filtro após o ensaio (à dir.)

Resultados

O resultado deste ensaio é indicado em percentagem da água inicial retida na argamassa. O resultado é obtido pela média de três medições expresso em percentagem. Neste caso o valor é de $67,52 \pm 1,26\%$.

8.3.5. Consistência por penetrómetro

Procedimento de ensaio

Este ensaio foi realizado com base na norma EN 1015-4 [CEN,1998c]. O equipamento utilizado neste ensaio foi um penetrómetro (Figura 8.9) que é constituído por uma haste vertical, na base na qual está fixo um êmbolo com determinada massa.

Preencheu-se um recipiente normalizado com a argamassa fresca, em 2 camadas, cada uma compactada com 10 pancadas com um pilão, para eliminação dos vazios. Seguidamente removeu-se o excesso de argamassa e foi colocado o recipiente na base do penetrómetro, tendo sido deixada cair a haste do equipamento sobre a argamassa, medindo-se de seguida a profundidade de penetração.

Foram realizados três ensaios à mesma argamassa e o resultado final é a média aritmética das três medições.

Resultados

O resultado deste ensaio consiste na medição do abaixamento por penetração da haste do penetrómetro, tendo sido obtido o valor de $2,4 \pm 0,1$ cm.

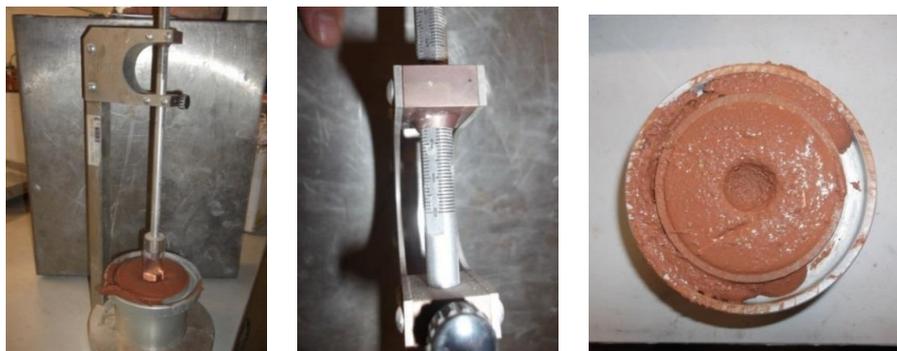


Figura 8.9 – Penetrômetro e molde com argamassa (à esq.); Escala de medição do penetrômetro (ao centro); Aspetto da argamassa após o ensaio (à dir.)

8.3.6. Teor de água

Procedimento de ensaio

Primeiramente pesou-se uma caixa de *Petri* vazia numa balança com precisão de 0,001 g. Colocou-se um pouco de argamassa no seu interior, sendo pesado o conjunto. Secou-se o conjunto numa estufa ventilada a $60 \pm 5^\circ\text{C}$ até massa constante (com variação inferior a 0,01% em 24 horas). Após ter sido tirado da estufa, deixou-se arrefecer o conjunto até à temperatura ambiente e pesou-se de seguida.

O teor de água do material em ensaio é expresso em percentagem referida à massa no estado seco, através da equação 7.5.:

$$T_{\text{água}} = \frac{m_h - m_s}{m_s - m_v} \times 100 \quad (7.5.)$$

em que $T_{\text{água}}$ – teor de água [%]; m_v – massa da caixa de *Petri* [g]; m_h – massa do conjunto da caixa de *Petri* com a argamassa fresca [g]; m_s – massa do conjunto da caixa de *Petri* com argamassa seca em estufa [g].

Resultados

O resultado do ensaio é a percentagem de água existente na argamassa no estado fresco, tendo sido obtido o valor de $19,4 \pm 0,3\%$. A amassadura da mesma argamassa realizada no decorrer do *workshop* apresentou um valor de $20,1 \pm 0,1\%$ [Faria et al., 2014]. O teor em água das duas amassaduras apresentou uma variação reduzida.

8.3.7. Retração linear por secagem

Procedimento de ensaio

A retração pode ser descrita como a redução de volume que uma argamassa apresenta quando passa do estado húmido para o seco. É uma característica bastante importante nas construções com terra, uma vez que estas contêm argilas que têm tendência a provocar alterações de volume e, consequentemente, fissuras de retração; estas, no ciclo de humedificação seguinte, podem facilitar o acesso da água ao interior da parede.

Para a realização deste ensaio, segundo o definido por Alcock [Gomes et al., 2014], utilizou-se uma caixa de contraplacado marítimo com dimensões de $600 \times 40 \times 40$ [mm] (Figura 8.10), tendo sido as superfícies internas lubrificadas com óleo descofrante de modo a que argamassa não retraísse no seu interior.

Após a lubrificação das paredes internas da caixa acima descrita, foi colocada no seu interior a argamassa e compactada de seguida com um pilão. A superfície foi nivelada à altura do molde, sendo rasada com uma colher de pedreiro para remover o excesso de argamassa. Por fim, o molde preenchido foi colocado numa sala condicionada à temperatura de $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ e à humidade relativa de $65\pm 5\%$ até completa secagem.

A medição da retração da argamassa pode também ser determinada a quando da desmoldagem dos provetes, medindo a retração existente entre o molde e o provete, sendo para o efeito analisados todos os provetes realizados com a argamassa.

Resultados

Verificou-se que a retração do provete era significativa na caixa de contraplacado marítimo ao longo do seu comprimento, tomando o valor de 3,64 mm: este valor corresponde a uma retração de 0,6%. Os provetes planares de $500\times 200\times 15$ [mm] apresentam uma retração de $2,91\pm 1,17$ mm ao longo do seu comprimento e de $0,63\pm 0,00$ mm ao longo da sua largura; estes valores correspondem a retrações de 0,6% e 0,3%, respetivamente. Todos os provetes prismáticos apresentam uma retração bem inferior a 3%.



Figura 8.10 – Caixa de contraplacado marítimo com o provete de argamassa de terra

8.3.8. Abaixamento por espalhamento

Procedimento de ensaio

No seguimento do ensaio de espalhamento foi medido o abaixamento da argamassa através da penetração de uma peça metálica no ponto mais alto da argamassa (Figura 8.11), tendo sido medido o valor desse abaixamento através de uma craveira.



Figura 8.11 – Ensaio de abaixamento

Resultados

O valor do abaixamento da argamassa após o ensaio de espalhamento foi de 14,2 mm.

8.4. Argamassa no estado endurecido – provetes simples

Os ensaios efetuados sobre os provetes de argamassa seguiram a ordem representada na Figura 8.12.

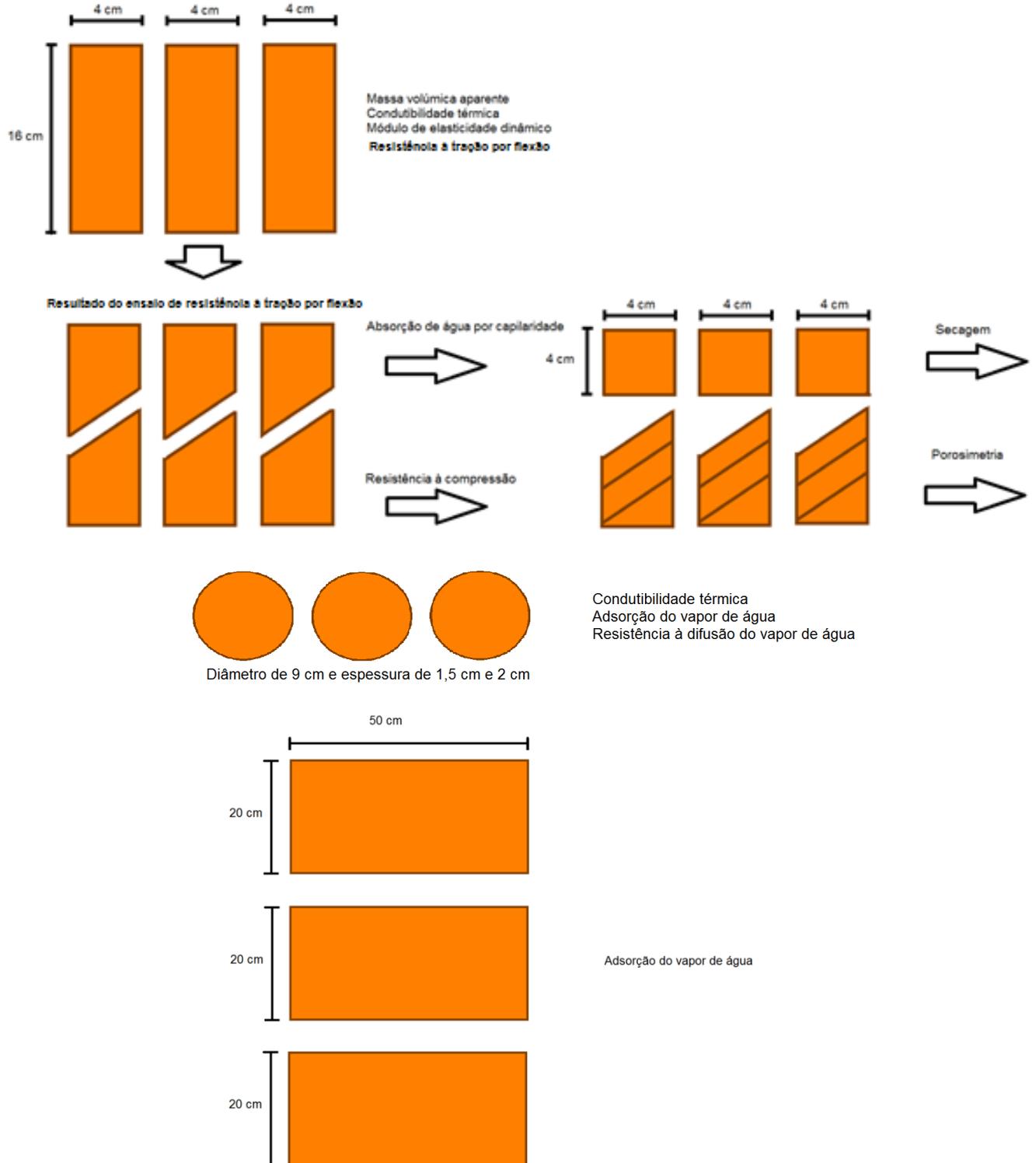


Figura 8.12 – Esquema de ensaios aos provetes prismáticos, circulares e planares

8.4.1. Massa volúmica aparente

Procedimentos de ensaio

Os provetes prismáticos foram medidos e pesados de forma a ser possível determinar a sua massa volúmica geometricamente.

Para a determinação deste parâmetro utilizou-se uma craveira digital para medir o comprimento, a altura e a largura de cada um dos seis provetes (Figura 8.13), e uma balança de precisão de 0,001 g para os pesar. Através destes dados foi possível proceder-se ao cálculo das massas volúmicas dos provetes, sendo depois possível determinar a classe a que pertencem segundo a norma DIN 18947 [NABau, 2013]. Os valores medidos e determinados neste ensaio são posteriormente utilizados para o ensaio do módulo de elasticidade dinâmico.



Figura 8.13 – Medição das dimensões dos provetes prismáticos

Resultados

As massas volúmicas foram determinadas passados seis meses da realização dos provetes. O valor médio e o desvio padrão é de $1,77 \pm 0,02 \text{ kg/dm}^3$.

8.4.2. Condutibilidade térmica

Procedimento de ensaio

O ensaio da condutibilidade térmica aos prismas realizou-se com o equipamento ISOMET 2104 (Heat Transfer Analyser) e respetiva sonda de superfície API 210412 com 6 cm de diâmetro. O procedimento do ensaio baseou-se no manual do equipamento. A sonda emite um fluxo térmico e o equipamento avalia a resposta do material em estudo.

O equipamento define uma espessura mínima de 15 mm e uma face com um mínimo de 60 mm de lado para os provetes de material que se pretende determinar a condutibilidade térmica (λ). No caso dos provetes circulares de argamassa esta espessura é cumprida, mas no caso dos prismas esta espessura é de apenas 40 mm. O que acontece nos prismas é que a sonda de superfície utilizada tem área superior à área de contacto com o mesmo, uma vez que esta tem um diâmetro de 60 mm e os prismas têm apenas 40 mm de espessura. Perante este facto, os resultados obtidos para os prismas só são totalmente comparáveis entre as argamassas estudadas e com ensaios realizados nas mesmas condições.

Primeiramente os provetes estiveram numa sala condicionada à temperatura de $20 \pm 3^\circ\text{C}$ e à humidade relativa de $65 \pm 5\%$; foram ensaiados um a um, sendo retirados das condições referidas à medida que

se ia realizando o ensaio. Para garantir as condições de fronteira homogêneas, os provetes são colocados em cima de uma placa de XPS, para que o calor não seja dissipado pela mesa de apoio. Posto isto, selecionou-se a opção Thermal Conductivity do aparelho dando-se assim início ao ensaio.

Nos provetes circulares foram realizadas três medições na face mais homogênea de cada um dos três provetes, espaçados entre si de alguns intervalos de tempo. Já nos prismas prismáticos foram realizadas as mesmas três medições em cada um dos seis provetes, espaçadas entre si, mas desta vez foi realizada uma medição em cada uma das três faces mais homogêneas (Figura 8.14). Nos provetes planares de 500x200x15 [mm] foram realizadas seis medições na face que não foi impermeabilizada, tendo as medições sido realizadas em seis pontos espaçados de 10 cm entre si.

Os resultados da condutibilidade térmica (λ) são expressos em W/(m.K) arredondados a uma casa decimal, segundo a norma DIN 18947 [NABau, 2013], e o valor de cada provete corresponde à média das medições realizadas.



Figura 8.14 – Ensaio de condutibilidade térmica nas bolachas de argamassas (à esq.); Equipamento ISOMET 2104 e ensaio de condutibilidade térmica nos prismas de argamassa (à dir.)

Resultados

A condutibilidade térmica dos provetes (λ), resultante da média dos seis valores nos provetes prismáticos, de três valores obtidos em provetes circulares e dos seis valores obtidos nos provetes planares, constam na Figura 8.15.

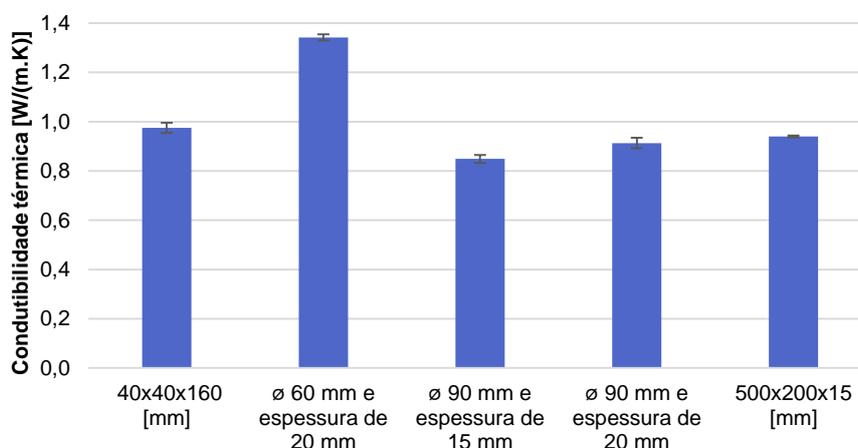


Figura 8.15 – Resultados obtidos no ensaio de condutibilidade térmica nos diversos provetes

Constata-se que, independentemente do tipo de provete ensaiado, a argamassa regista uma condutibilidade térmica da ordem do 0,9 W/(m.K), Aparentemente tal situação permite que qualquer dos tipos de provetes possam ser utilizados para a realização desta caracterização. A exceção são os provetes circulares de 60 mm de diâmetro e 20 mm de espessura, que apresentam valor de condutibilidade térmica superior. O aumento do valor de condutibilidade térmica dos provetes circulares de 60 mm de diâmetro e 20 mm de espessura pode estar relacionado com o facto de este provete apresentar um diâmetro igual ao da sonda de contacto, o que pode influenciar a medição. Há ainda que referir que estes provetes circulares foram os únicos realizados por outro operador, o que pode influenciar o resultado final.

8.4.3. Módulo de elasticidade dinâmico

Procedimento de ensaio

Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico recorreu-se ao método da ressonância forçada, com base na norma NP EN 14146 [IPQ 2006a]. Esta norma aplica-se a pedra natural e padroniza os procedimentos necessários para a determinação da frequência fundamental de ressonância para uma vibração induzida na direção longitudinal. Este ensaio foi realizado sobre seis provetes prismáticos com dimensões de 40x40x160 [mm], tendo em conta os dados geométricos e a massa volúmica da argamassa endurecida.

Para a realização deste ensaio procedeu-se às etapas descritas em seguida. Após serem retirados os provetes da sala condicionada colocou-se cada um dos seis provetes de argamassa no suporte existente no equipamento “ZEUS Resonance Meter” (ZRM 001) (Figura 8.16), ficando um topo do provete em contacto com o emissor de vibrações e o outro com o recetor. Depois de inseridas as características do provete (massa em gramas e dimensões em milímetros) no programa de cálculo do equipamento, dá-se início ao programa de *software* do equipamento. Seguidamente registaram-se as leituras do módulo de elasticidade determinado e rodou-se o provete de modo a efetuar um mínimo de quatro medições com cada provete, com os topos dos provetes colocados em posições diferentes.

O programa de cálculo do equipamento utilizado regista o valor do módulo de elasticidade dinâmico [N/mm²] seguindo a equação 7.6..

$$E_d = (2 \times L \times f_0)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} \quad (7.6.)$$

em que L – comprimento do provete [m]; f_0 – frequência de ressonância longitudinal [Hz]; ρ – peso específico [N/mm³]; g – aceleração da gravidade [9,806655 m/s²].



Figura 8.16 – Equipamento “ZEUS Resonance Meter” e provete em ensaio

Resultados

O valor médio, obtido através de quatro medições a cada um dos seis provetes, e o respetivo desvio padrão é de 3610 ± 128 N/mm².

8.4.4. Resistência à tração por flexão

Procedimento de ensaio

Após o ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico, realizou-se o ensaio de resistência à tração por flexão, tendo por base a norma EN 1015-11 [CEN, 1999b].

Inicialmente preparou-se a máquina universal Zwick/Rowell Z050 (Figura 8.17 - à esquerda) com a introdução de uma célula de carga de 2 kN associada ao dispositivo de flexão por três pontos. Seguidamente colocou-se um provete sobre os apoios distanciados entre si de 100 mm. Ao colocar o provete, teve-se o cuidado de colocar a face mais rugosa disposta lateralmente de forma a permitir que a carga atuasse numa superfície lisa, sem irregularidades, de modo a não influenciar os resultados. É necessário garantir a perpendicularidade entre o provete e a célula de carga. Posto isto, deu-se início ao programa de *software* do equipamento de ensaio, que incrementou uma velocidade de 0,2 mm/min à carga. O *software* mostra um gráfico da força aplicada [N] em função do tempo [s] e também a força máxima (F_t) aplicada, que permitiu a rotura do provete.

Através da equação 7.7. é possível obter a resistência à tração por flexão R_t [N/mm²], como é indicado na norma EN 1015-11 [CEN, 1999b].

$$R_t = 1,5 \times \frac{F_f \times l}{b \times d^2} \quad (7.7.)$$

em que l – distância entre apoios, em milímetros [100 mm]; $b = d$ – lado da secção quadrada do provete, em milímetros [40 mm].

Resultados

O valor médio e o desvio padrão, resultante da medição realizada a seis provetes é de $0,27 \pm 0,04$ N/mm².



Figura 8.17 – Equipamento Zwick/Rowell Z050 (à esq.); Ensaio de resistência à tração por flexão (à dir.)

8.4.5. Resistência à compressão

Procedimento de ensaio

Com metade de cada provete resultante do ensaio de resistência à tração por flexão é realizado o ensaio de resistência à compressão com base na norma EN 1015-11 [CEN, 1999b].

De forma semelhante ao ensaio anterior, preparou-se a máquina universal Zwick/Rowell Z050 com a introdução da célula de carga de 50 kN no dispositivo para compressão de prismas com 40 mm de secção. Colocou-se um provete entre os dispositivos preparados, com a face rugosa disposta lateralmente para permitir que a carga atuasse numa fase lisa, sem irregularidades. Posto isto deu-se início ao carregamento do provete através do *software* do equipamento anteriormente referido, com uma velocidade de 0,7 mm/min (Figura 8.18). Foram registados os valores da força aplicada em função do tempo, bem como a força máxima de compressão (F_c) que ocorre antes da rotura.

A resistência à compressão R_c [MPa] é obtida através do quociente entre a força máxima F_c [N] obtida pelo *software* do equipamento e a secção de aplicação da carga [mm²].



Figura 8.18 – Ensaio de Resistência à compressão (à esq.); Aspeto do provete após o ensaio de resistência à compressão (à dir.)

Resultados

O valor médio e desvio padrão, obtido através da média dos seis provetes resultante do ensaio de resistência à compressão é de $1,07 \pm 0,08$ N/mm².

8.4.6. Absorção de água por capilaridade

Procedimento de ensaio

O comportamento face à ascensão capilar não é um requisito geral para argamassas de terra pois estes tipos de argamassas são aplicados como rebocos interiores. No entanto, se a parede onde o reboco foi aplicado apresentar problemas de ascensão capilar a partir do solo, será vantajoso que a argamassa apresente um comportamento eficiente.

Este ensaio foi realizado com base no procedimento da norma EN 1015-18 [CEN, 2002], EN 15801 [CEN, 2009a] e teste n.º II.5 da RILEM [RILEM 1980a], com alguns ajustes para não ocorrerem perdas de massa decorrentes da degradação dos provetes de argamassas de terra, por contacto prolongado com água. A finalidade deste ensaio foi a de determinar o coeficiente de capilaridade (CC), que traduz a velocidade de absorção inicial. O ensaio foi realizado na sala condicionada à temperatura de $20 \pm 3^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $65 \pm 5\%$. Para a realização deste ensaio, os provetes prismáticos que resultaram do ensaio de

resistência à tração por flexão, foram cortados com altura igual ao comprimento e largura, ou seja de forma a resultarem cubos de 40 mm de aresta.

O ensaio foi realizado com três tipos de impermeabilização lateral diferentes: com película aderente de polietileno, com resina epóxi e sem qualquer tipo de impermeabilização.

Antes da realização do ensaio dois dos grupos de provetes foram então impermeabilizados nas quatro faces laterais para garantir que a absorção se efetuasse apenas na base e fosse unidirecional, evitando perdas pelas faces laterais. A face inferior de todos os três grupos de provetes foi coberta com um tecido de algodão preso por um elástico, permitindo a passagem da água e evitando a perda de material durante a fase de absorção (Figura 8.19). Após a preparação os provetes foram pesados numa balança de precisão de 0,001 g e colocados na estufa a 60°C durante pelo menos 48h, até atingirem condições de massa constante. Depois de retirados da estufa, estes foram colocados num exsiccador para que arrefecessem de modo a que pudessem ser manuseados mas não fossem alteradas as suas condições de humidade. Os provetes foram pesados numa balança de precisão de 0,001 g, registando a massa seca.

Devido ao facto de estes provetes em presença de água serem de difícil manuseamento foram fabricados uns cestos onde os provetes foram colocados e através dos quais os provetes passaram a ser manuseados (Figura 8.19). De seguida foi preparada uma caixa plástica vedada com água no fundo, de modo a garantir um ambiente saturado húmido. No interior da caixa foi colocado um tabuleiro de base rígida nivelado e sobrelevado em relação à base. Colocou-se uma rede plástica dentro do tabuleiro para sobrelevar os provetes mas permitir o contacto praticamente total da base dos provetes com a água. Adicionou-se água no interior do tabuleiro até perfazer uma lâmina de água de 5 mm de altura (tendo em consideração que os cestos tinham 1 mm de espessura na base), tendo esta altura de água sido medida com uma régua e mantida ao longo do ensaio. Os provetes foram colocados dentro dos cestos e de seguida dentro da caixa por ordem; de seguida mediram-se as massas aos 0, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 60 e 120 minutos de contacto com a água e assim sucessivamente até a curva de absorção se encontrar num patamar de estabilização. Teve-se o cuidado de se deixar pingar a água em excesso absorvida pelo tecido de algodão de modo a não ocorrerem erros na medição das massas nem pingar sobre os outros provetes.

Ao fim de 15 minutos dos provetes com película estarem em contacto com a água já era possível observar que a absorção por capilaridade já se encontrava a metade dos provetes (Figura 8.19 – à esquerda). Após os primeiros sinais de estabilização da curva de capilaridade, os provetes foram retirados da caixa devido ao facto de se estar a iniciar a fase de deterioração dos provetes.

Os provetes sem qualquer tipo de impermeabilização lateral passados 10 minutos já se encontravam completamente molhados, enquanto os provetes com impermeabilização lateral com resina epóxi demoraram cerca de duas horas para começar a dar sinais de presença de água na superfície superior do provete.

A curva de absorção de água por capilaridade foi obtida através de um gráfico que relaciona a quantidade de água absorvida por área da base [kg/m^2] com a raiz quadrada do tempo [$\text{min}^{1/2}$].

A quantidade de água absorvida M é dada pela equação 7.8.:

$$M = \frac{m_i - m_0}{S} \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad (7.8.)$$

em que m_i – massa do provete no instante i [kg]; m_0 – massa do provete no instante inicial [kg]; S – secção do provete em contacto com a água ($0,04 \times 0,04 \text{ m}^2$).



Figura 8.19 – Ascensão capilar a meia altura do provete impermeabilizado com película aderente de polietileno (à esq.); Provete impermeabilizado com resina *epóxi* (à dir.);

O coeficiente de capilaridade (CC), expresso em $[kg/(m^2 \cdot min^{0.5})]$ pode ser obtido através uma regressão linear dos pontos da curva inicial, através do declive (m) da reta formada por estes pontos: $y=mx+b$.

Tal como já foi referido, este ensaio foi realizado através de três tipos de preparações laterais diferentes dos provetes, tendo o procedimento de ensaio sido o mesmo.

Resultados

A curva média obtida no ensaio de capilaridade, resultante da medição em seis provetes, com impermeabilização lateral com película aderente e com resina *epóxi* encontra-se na Figura 8.20, assim como a curva resultante do ensaio dos provetes sem qualquer tipo de impermeabilização lateral.

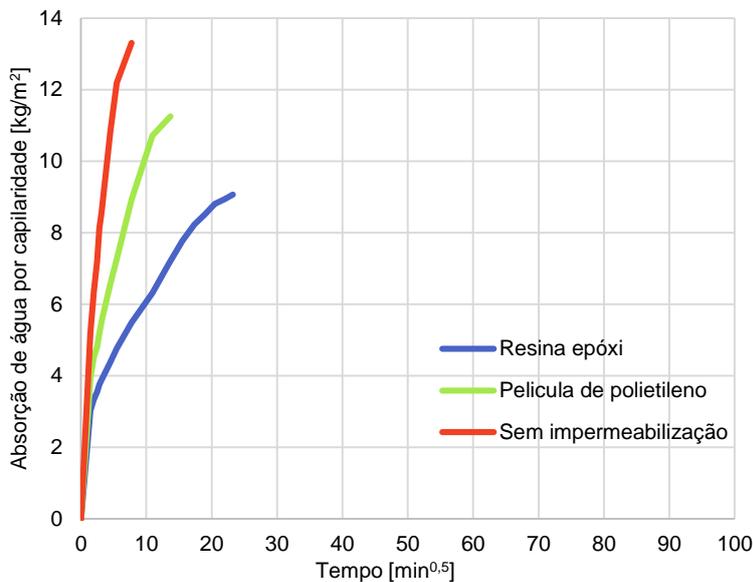


Figura 8.20 – Curvas de absorção de água por capilaridade correspondentes a cada tipo de impermeabilização

Verifica-se que a realização do ensaio sem impermeabilização lateral e mesmo com impermeabilização por película de polietileno é muito penalizante para a argamassa. Por este motivo recomenda-se que a caracterização deste tipo de argamassas seja realizado recorrendo à resina *epóxi* ou material similar para a preparação das faces laterais dos provetes.

8.4.7. Secagem

Procedimento de ensaio

O ensaio de secagem teve por base o Test No. II.5 “Evaporation curve” da RILEM (1980a) e a norma NORMAL 29/88 (1988). Este ensaio decorreu logo após a paragem do ensaio de absorção de água por capilaridade, embora os provetes não estivessem ainda completamente saturados, e decorreu na sala condicionada com temperatura de $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa de $65\pm 5\%$.

A taxa de secagem expressa a velocidade com que esta se processa inicialmente, e obtêm-se pelo declive do troço inicial da curva de secagem com a horizontal, sendo tanto mais rápida a secagem, quando maior o valor calculado [Grilo et al., 2014]. O índice de secagem traduz a dificuldade de se atingir a secagem completa, em equilíbrio com o ambiente.

É importante referir que os provetes de argamassa de terra não apresentam resistência quando em contacto com água. Por esse motivo não foi possível deixar os provetes saturarem no decorrer do ensaio de absorção de água por capilaridade, pois isso levaria à total degradação do provete.

Os provetes foram retirados da caixa em que se realizou o ensaio de absorção de água por capilaridade, de seguida foram retirados dos cestos e colocados em caixas de *Petri*, pesadas anteriormente (Figura 8.21). Os provetes sobre as caixas de *Petri* foram pesados numa balança de precisão 0,001 g e colocados sobre a bancada metálica lisa, ao lado da balança. Durante o primeiro dia de ensaio os provetes foram pesados de hora a hora. Nos dias seguintes as pesagens passaram a ser realizadas de 24 em 24 horas até à estabilização da massa (diferença de massa de 1% entre duas pesagens consecutivas).

Tal como aconteceu no ensaio de capilaridade, também o ensaio de secagem foi realizado com os provetes com as três preparações das faces laterais diferentes: com a impermeabilização lateral com resina *epóxi*, com película aderente de polietileno e sem qualquer tipo de impermeabilização.

No decorrer do ensaio efetuou-se a curva de secagem de cada um dos provetes, de modo a acompanhar a evaporação de água ao longo do tempo.

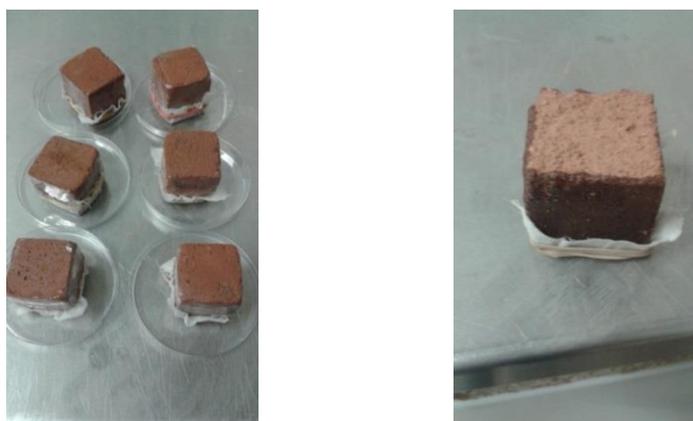


Figura 8.21 – Provetes com impermeabilização com película aderente de polietileno durante o ensaio de secagem (à esq.); Provetes com impermeabilização com resina *epóxi* (à dir.)

Resultados

A curva média obtida no ensaio de secagem, resultante da medição em seis provetes, com impermeabilização lateral com resina *epóxi*, película aderente de polietileno e sem impermeabilização encontra-se na Figura 8.22.

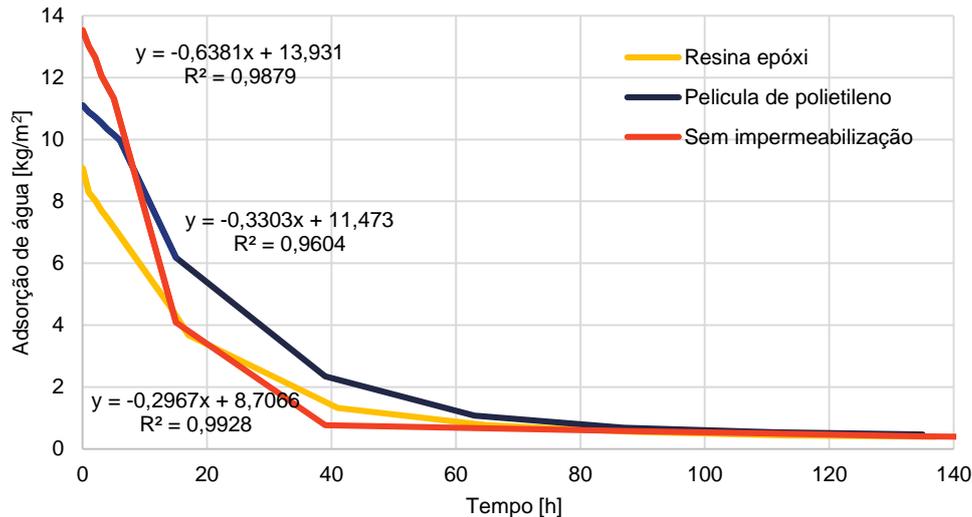


Figura 8.22 – Curvas de secagem correspondentes a cada tipo de impermeabilização

Tal como expectável, a taxa de secagem é muito mais elevada no caso dos provetes sem impermeabilização lateral, que apresentam uma secagem não unidirecional e por uma área elevada. Da mesma forma o índice de secagem é menor nestes provetes, uma vez que essa maior área facilita a secagem global. No entanto, recomenda-se a implementação de impermeabilização lateral, de forma a garantir que a secagem se processa de forma unidirecional. A diferenciação entre aplicação de resina ou de película parece indiciar que a primeira garante uma impermeabilização mais eficaz, conduzindo nesse caso, como expectável, a um comportamento ligeiramente pior na secagem.

8.4.8. Resistência à difusão do vapor de água

Procedimento de ensaio

O ensaio foi realizado de acordo com a norma EN ISO 12572 [ISO, 2001] e EN NP 1015-19 [IPQ, 2008]. Este ensaio pode ser efetuado utilizando dois métodos distintos: método da tina húmida e método da tina seca (Figura 8.23).

O método utilizado para a realização deste ensaio foi o método da tina húmida e o procedimento de ensaio é descrito de seguida. Colocou-se uma altura de cerca de 1 cm de água destilada no interior de cada cápsula (quantidade de água suficiente para garantir a permanência de água no interior da cápsula até à conclusão do ensaio), que se embebeu em algodão hidrófilo (por forma a minorar a possibilidade de ocorrência de salpicos durante o manuseamento da cápsula) [Faria, 2004] (Figura 8.24 – à esquerda). Colocou-se cada provete centrado nas cápsulas de ensaio, tendo a área de influência da cápsula sido marcada na face do provete através de um aro metálico. Vedou-se com silicone toda a envolvente entre o círculo definido pelo interior do aro e o bordo da cápsula, tornando todo este perímetro impermeável ao vapor. A massa do conjunto (cápsula e provete) foi aferida numa balança de precisão de 0,001 g, imediatamente após o conjunto ser selado (Figura 8.24 – ao centro); o conjunto foi colocado numa câmara climática com 23°C de temperatura e 40% de humidade relativa (Figura 8.24 – à direita), registando-se o instante de tempo. Registou-se diariamente a massa do sistema de ensaio a fim de se determinar a quantidade de vapor de água que se difundia através dos provetes, registando simultaneamente o tempo. As aferições de massa diárias prosseguiram até se atingir um regime estacionário, em que num gráfico que apresente a variação de massa em ordenadas (g), em função do tempo decorrido em abcissa (hora), a curva tenda

para um valor assintótico (os pontos definem claramente uma reta), ou seja, quando a quantidade de vapor de água que atravessa o provete na unidade de tempo for constante.

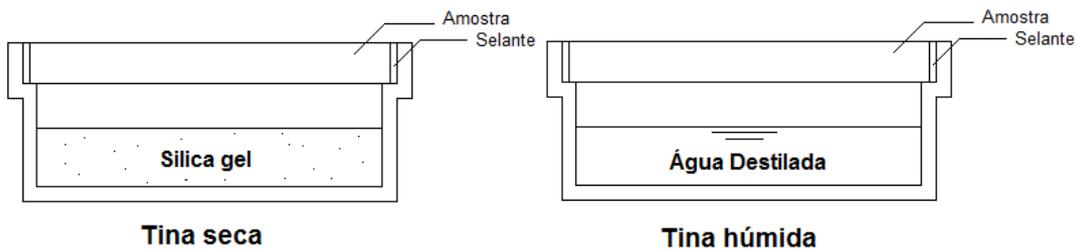


Figura 8.23 – Representação do método de tina seca e tina húmida

A permeância ao vapor de água π , em $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, é dada pela equação 7.9.:

$$\pi = \frac{G}{A \times \Delta P} \quad (7.9.)$$

em que G – fluxo de vapor de água por unidade de tempo; é o valor assintótico (calculado a partir da média dos valores em regime estacionário), dado pelo quociente entre a quantidade de vapor de água que atravessa o provete e a unidade de tempo [kg/s]; A – área de ensaio do provete [m^2]; ΔP – diferencial de pressão de água entre os dois lados do provete [Pa].

Sabe-se que a pressão do ambiente P, em Pa, é expressa pela equação 7.10:

$$P = P_s \times \frac{HR}{100} \quad (7.10.)$$

em que P_s – pressão parcial da saturação, que depende da temperatura (ver Quadro 8.2) [Pa]; HR – humidade relativa [%].

Desta forma tem-se:

$$P_{40} = 2806 \times \frac{40}{100} = 1122,40 \text{ Pa} \quad (7.11.)$$

$$P_{100} = 2806 \text{ Pa} \quad (7.12.)$$

$$\Delta P = 2806 \times \frac{(100-40)}{100} = 1683,6 \text{ Pa} \quad (7.13.)$$

Quadro 8.2 – Pressão de saturação em função da temperatura [Henriques, 2011]

| Temperatura (°C) | P_s (Pa) |
|------------------|------------|
| 18 | 2060 |
| 19 | 2195 |
| 20 | 2336 |
| 21 | 2483 |
| 22 | 2640 |
| 23 | 2806 |
| 24 | 2980 |
| 25 | 3164 |

A permeabilidade ao vapor de água δ , em $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, é dado pela expressão 7.14.:

$$\delta = \pi \times e \quad (7.14.)$$

em que π – tal como visto atrás, é a permeância ao vapor de água [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]; e – espessura do provete [m].

O fator de resistência à difusão do vapor de água μ [adimensional] é a relação entre a permeabilidade do ar e a do material a ensaiar, sendo dado pela expressão 7.15.:

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad (7.15.)$$

em que δ – permeabilidade ao vapor de água do material [kg/(m.s.Pa)]; δ_a – permeabilidade ao vapor de água do ar [$\delta_a = 1,94 \times 10^{-10}$ kg/(m.s.Pa)].

É possível ainda determinar a espessura da camada de ar de difusão de vapor de água equivalente S_d , em m, a partir da permeabilidade ao vapor de água (equação 7.16.):

$$S_d = 1,95 \times 10^{-10} \times \frac{e}{\pi} \quad (7.16.)$$

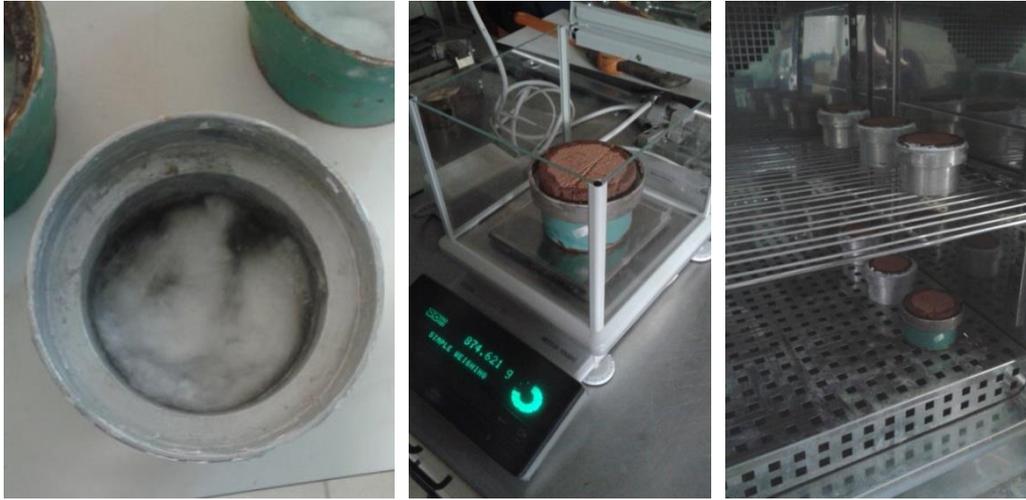


Figura 8.24 – Preparação da cápsula com água destilada e algodão (à esq.); Conjunto de ensaio (ao centro); Ensaio de resistência à difusão do vapor de água (à dir.)

Resultados

A quantidade de vapor de água que se difunde através dos provetes é determinada pela diferença de massas que se regista no decorrer do ensaio, valor dado pelo declive da reta do gráfico com esses parâmetros. Para a argamassa P_0 o valor do declive é de $1,02 \times 10^{-8}$. O fator de resistência à difusão do vapor de água, em termos de valor média e desvio padrão, toma o valor de $8,02 \pm 0,31$ e o valor da espessura da camada de difusão de vapor de água equivalente, em termos de valor médio e desvio padrão, toma o valor de $0,16 \pm 0,01$ m.

Na Figura 8.25 é possível observar a relação linear entre a variação de massa dos provetes e o tempo decorrido no ensaio.

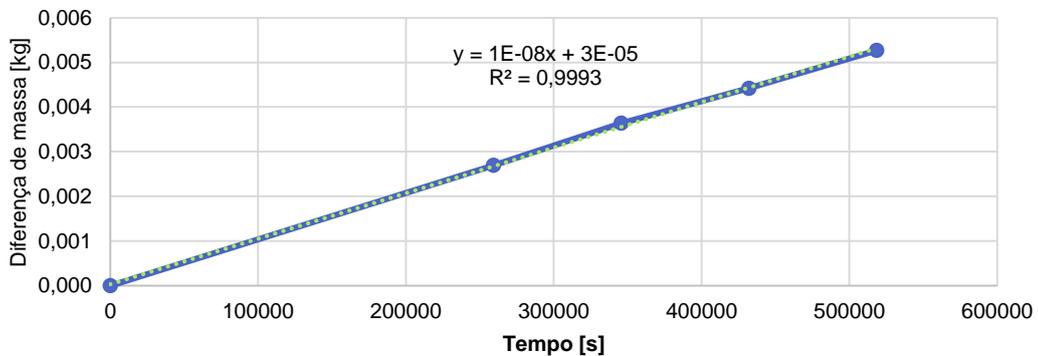


Figura 8.25 – Relação linear entre a variação de massa e o tempo decorrido no ensaio de resistência à difusão do vapor de água

8.4.9. Adsorção do vapor de água

Procedimento de ensaio

Este ensaio foi realizado com base na norma DIN 18947 [NABau, 2013]. Para além dos provetes definidos na norma, com área de 1000 cm², foram também ensaiados provetes circulares, de muito menor área superficial (no caso, 84,13 cm²). A higroscopicidade é uma medida dinâmica que descreve a capacidade de adsorção de vapor de água do ambiente pelas camadas de um elemento de construção [Röhlen e Ziegert, 2011].

Inicialmente os provetes circulares de 90 mm de diâmetro e de 15 mm e 20 mm de espessura foram impermeabilizados na face inferior com película aderente de polietileno mantendo-se a mesma fixa ao provete com o auxílio de um elástico, ficando apenas exposta a face superior (Figura 8.26 – à esquerda). Os provetes de 500x200x15 [mm] uma vez que não foram desmoldados já se encontravam impermeabilizados em todas as fases exceto a superior (Figura 8.26 – ao centro). Após a impermeabilização os provetes foram colocados numa câmara climática com uma temperatura constante de 20±2°C e 50±5% de humidade relativa. Os provetes mantiveram-se nestas condições até se encontrarem com um teor de humidade de equilíbrio correspondente a 50% (cerca de 24 horas). De seguida, a humidade relativa no interior da câmara climática foi elevada dos 50% para os 80%, mantendo-se a temperatura de 20°C (Figura 8.26 – à direita). Os provetes foram pesados numa balança de precisão de 0,001 g às 0h, 0,5h, 1h, 3h, 6h e 12h a partir desse instante.

O mesmo ensaio foi realizado, mas desta vez para avaliar a desadsorção do vapor de água. O ensaio seguiu o procedimento que se descreve de seguida. Os provetes foram colocados na câmara climática com uma temperatura constante de 20°C e 80% de humidade relativa, tendo sido deixados até atingiram um teor de equilíbrio de 80% (cerca de 24 horas). Após os provetes atingirem o teor de equilíbrio de 80% de humidade relativa, a câmara foi colocada a 50% de humidade de relativa e o ensaio repetiu-se da forma como foi realizado na adsorção de água, com pesagens às 0h, 0,5h, 1h, 3h, 6h e 12h a partir do instante em que se alterou a humidade relativa para os 50%.

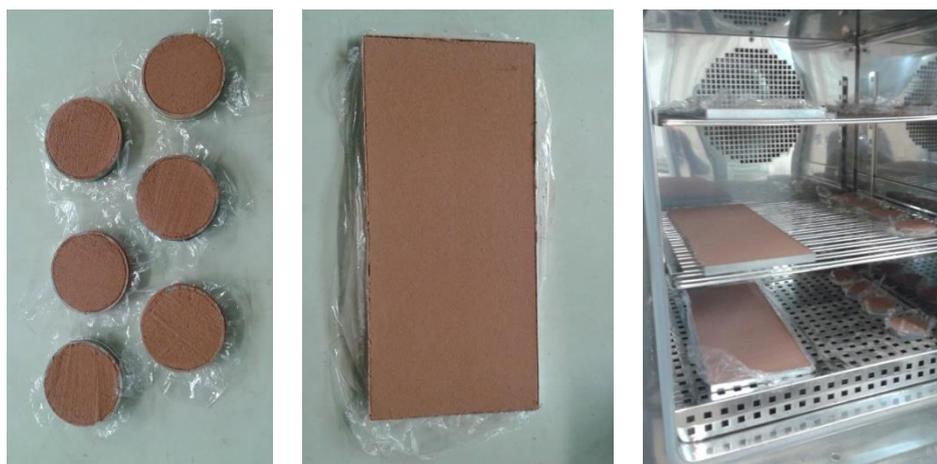


Figura 8.26 – Impermeabilização dos provetes circulares de 90 mm de diâmetro e 15 e 20 mm de espessura (à esq.); Impermeabilização do provete prismático de 500x200x15 [mm] (ao centro); Ensaio de adsorção do vapor de água (à dir.)

Resultados

Na Figura 8.27 é possível observar a curva de adsorção média de cada tipo de provete.

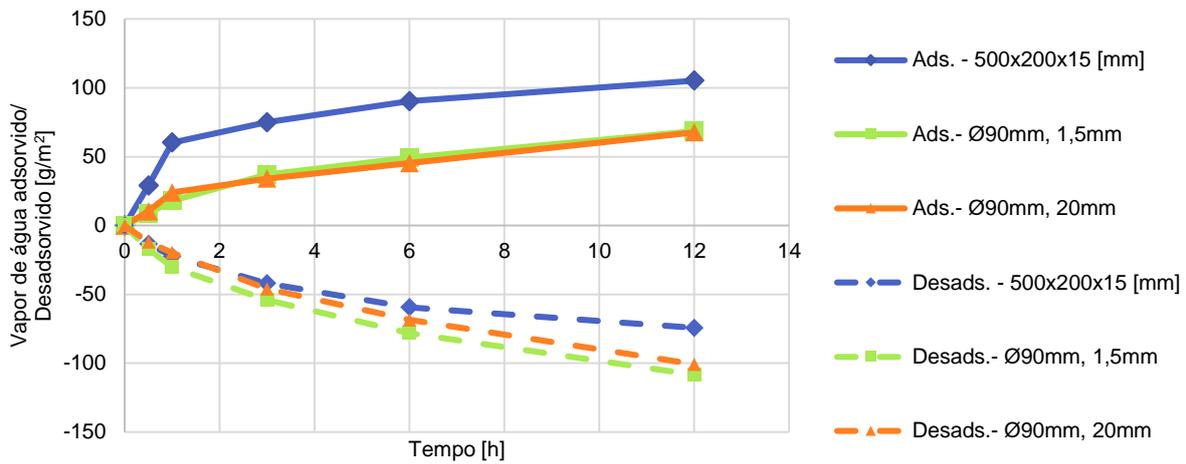


Figura 8.27 – Curvas de adsorção e desadsorção do vapor de água dos vários provetes

Da observação dos resultados ressalta que argamassa de terra consegue desadsorver a mesma quantidade de vapor de água que adsorve, chegando a valores de adsorção na casa dos 100 g/m².

8.4.10. Resistência à abrasão

Procedimento de ensaio

O ensaio de resistência à abrasão foi realizado com base na norma DIN 18947 [NABau, 2013] mas procedeu-se à pesagem dos provetes antes e após abrasão, e não apenas à pesagem do material desagregado pela abrasão. A resistência à abrasão de superfícies de terra é medida através da utilização de um disco redondo com uma escova rotativa de plástico. Para este ensaio foram utilizados três provetes circulares de 90 mm de diâmetro e 20 mm de espessura, sendo ainda utilizadas três tipos de escovas – Dura (Vermelha, com 65 mm de diâmetro), Média (Azul, com 65 mm de diâmetro) e Suave (Preta, com 70 mm de diâmetro).

Inicialmente pesa-se o provete numa balança de precisão de 0,001 g (embora a norma defina como mínimo 0,01 g). A escova de plástico é colocada na vertical com um dispositivo adequado de forma a exercer uma força de contacto constante de 20 N contra a superfície do provete (Figura 8.28 – à esquerda). Realizam-se 20 rotações da escova em 15 a 25 segundos. Pesa-se novamente o provete. Repete-se este procedimento por mais duas vezes, noutros provetes.

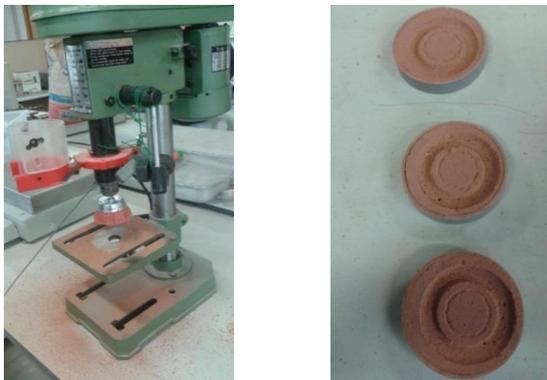


Figura 8.28 – Escova com o dispositivo adequado ao ensaio (à esq.); Aspetto dos provetes circulares após o ensaio (à dir.)

Resultados

A norma define que o resultado deve ser a média das três medições, devendo ser expresso em gramas e com uma casa decimal. O valor de resistência à abrasão obtido em termos de média e desvio padrão para cada uma das escovas consta na Figura 8.29.

Constata-se uma grande variação de resultados em função do tipo de escova utilizado.

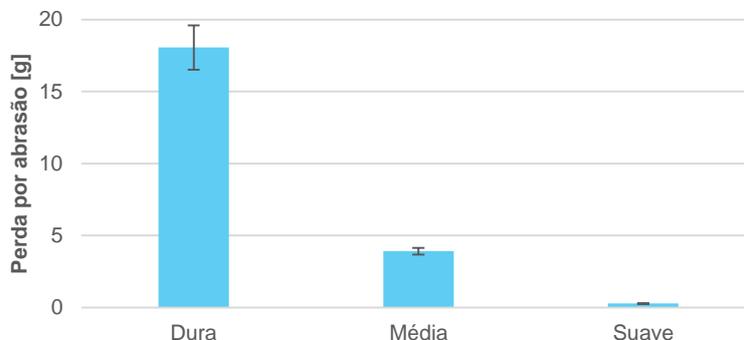


Figura 8.29 – Resultados obtidos no ensaio de abrasão com diferentes tipos de escovas

8.4.11. Porosimetria de mercúrio

Procedimento de ensaio

O ensaio de porosimetria de mercúrio consiste na intrusão de mercúrio numa amostra de argamassa, com recurso a um porosímetro Autopore IV da Micrometrics, que contém duas portas de baixa pressão e uma porta de alta pressão.

A segurança em termos de manuseamento do mercúrio foi assegurada através da realização do ensaio em ambiente condicionado a uma temperatura sempre inferior a 23°C, no Laboratório de Análise de Microestrutura do DEC/FCT-UNL. Tal como referido, as amostras utilizadas foram recolhidas dos provetes prismáticos após o ensaio de compressão.

Efetou-se um desgaste nas amostras dos provetes de modo a serem inseridas no penetrómetro com 5 cm³ de volume, ocupando o máximo volume disponível possível, e colocaram-se na estufa ventilada, a 40°C durante pelo menos 24h. Retiraram-se os provetes da estufa e colocou-se cada amostra num exsiccador durante 30 minutos para arrefecer à temperatura ambiente. Pesou-se cada amostra e colocou-se no penetrómetro de sólidos, envolvendo o bordo com um óleo de selagem. Colocou-se a tampa no penetrómetro, lubrificou-se a haste e pesou-se o conjunto numa balança de precisão 0,001 g. Deu-se início ao ensaio através da colocação do conjunto numa das portas de baixa pressão do porosímetro. Introduziram-se as massas no programa de cálculo do aparelho (AutoPore 9500) para que este calculasse o volume de mercúrio introduzido em cada patamar. Durante o ensaio a amostra ficou condicionada pelo aparelho a uma pressão de 100 µmHg durante 5 minutos, até estabilizar. Introduziu-se o mercúrio até preencher toda a zona em volta do provete e iniciou-se o processo de intrusão, que se efetuou através da subida da pressão em 15 patamares pré-definidos entre 0,0138 MPa e 0,2068 MPa [Rato, 2006]. Depois da análise com baixa pressão retirou-se o penetrómetro e pesou-se a massa do conjunto. Seguidamente iniciou-se o ensaio de alta pressão, através da colocação do penetrómetro na porta destinada; neste caso foram 67 os patamares de pressão de intrusão, entre os valores de 0,2758 MPa e 206,8427 MPa [Rato, 2006]. A extrusão da pressão ocorre na continuação do ensaio, utilizando 27 patamares com valores entre 206,8427 MPa e 0,1034 MPa [Rato, 2006].

Resultados

Os resultados de massa volúmica, massa volúmica aparente e porosidade constam no Quadro 8.3., enquanto a dimensão dos poros é apresentada na Figura 8.30.

Da observação da curva é possível concluir que a argamassa simples contém maiores quantidades de poros com dimensões entre os 15 μm e os 55 μm , apresentando uma curva de distribuição porosimétrica bi-modal uma vez que apresenta dois picos dentro deste intervalo.

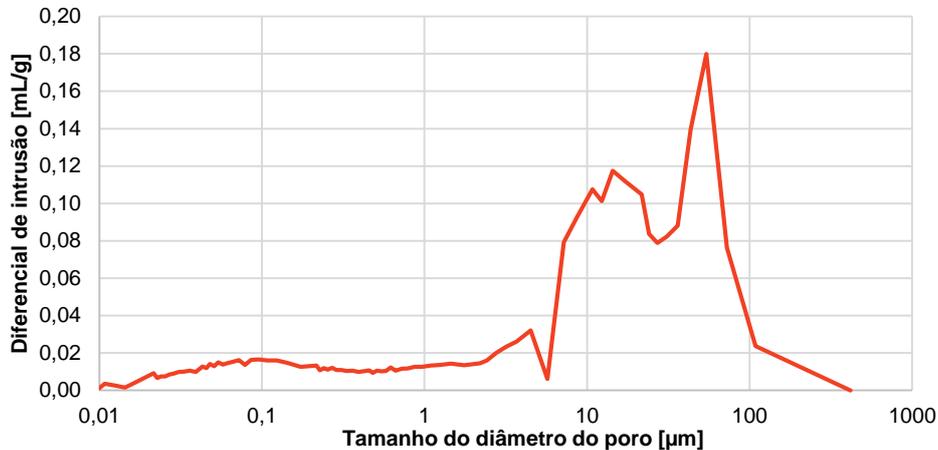


Figura 8.30 – Curva de distribuição do tamanho do diâmetro dos poros em argamassa simples

Quadro 8.3 – Resultados obtido no ensaio de porosimetria de mercúrio

| | |
|---|------|
| Massa volúmica [kg/dm^3] | 1,78 |
| Massa volúmica aparente [kg/dm^3] | 2,59 |
| Porosidade [%] | 31 |

8.5. Argamassa no estado endurecido – provetes sobre tijolo

8.5.1. Condutibilidade térmica

Procedimento de ensaio

A superfície de argamassa aplicada sobre o tijolo apresentava irregularidades o que pode influenciar os resultados obtidos.

O procedimento adota os passos seguintes. Primeiramente o tijolo é colocado numa sala condicionada à temperatura de $20 \pm 3^\circ\text{C}$ e à humidade relativa de $65 \pm 5\%$. Depois de retirado o tijolo destas condições, foi colocado sobre uma placa de XPS para garantir as condições de fronteira homogénea, para que o calor não fosse dissipado para a mesa de suporte. Escolheram-se seis pontos distintos para realizar o ensaio, tal como pode ser observado no esquema da Figura 8.31 – à direita, e colocou-se a sonda em contacto com o tijolo, em cima do primeiro ponto, registando o valor medido. O processo repetiu-se para os restantes pontos tendo o cuidado de colocar a sonda num ponto mais afastado do ponto anteriormente ensaiado de modo a que não haja a influência do calor transmitido pelo aparelho à argamassa.

Os resultados da condutibilidade térmica (λ) foram expressos em $\text{W}/(\text{m.K})$ e o valor corresponde à média dos seis valores obtidos em cada ponto de ensaio.

Resultados

O valor médio e desvio padrão para a condutibilidade da argamassa sobre o tijolo é de $0,924 \pm 0,089$ $\text{W}/(\text{m.K})$.

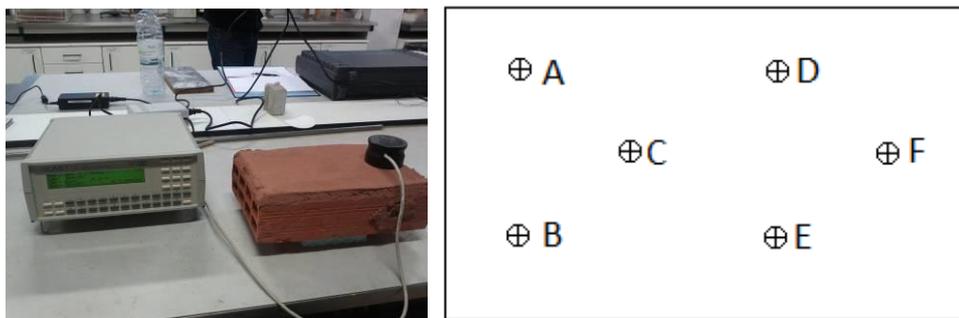


Figura 8.31 – Ensaio de condutibilidade térmica em argamassa sobre tijolo (à esq.); Esquema dos pontos analisados (à dir.)

8.5.2. Velocidade de propagação dos ultrassons

Procedimento de ensaio

O objetivo deste ensaio é avaliar a compacidade e a rigidez do revestimento aplicado. O ensaio da velocidade de propagação dos ultrassons foi realizado com base na ficha de ensaio Fe Pa 43 [LNEC, 2010] e na EN 12504-4 [CEN, 2004].

Para este ensaio, um impulso de vibrações longitudinais é produzido por um transdutor eletroacústico que é mantido sobre uma superfície de ensaio. Este impulso atravessa um comprimento de percurso até um segundo transdutor, sendo esse impulso de vibrações convertido num sinal elétrico. Neste ensaio é medido o tempo que o impulso de vibrações necessita para percorrer o percurso entre os dois transdutores [CEN, 2004].

A medição da velocidade de impulso é possível ser realizada de várias formas: colocando os dois transdutores em faces opostas da superfície de ensaio (método direto), colocando os transdutores em faces adjacente (método semi-direto) ou colocando os dois transdutores na mesma face da superfície de ensaio (método indireto) (Figura 8.32).

Segundo a norma EN 12504-4 [CEN, 2004], com a utilização do método indireto existe alguma incerteza em relação ao comprimento exato do percurso de transmissão devido à dimensão considerável das áreas de contacto entre os transdutores e a superfície de ensaio. Desta forma, a norma aconselha que sejam realizadas várias medições com os transdutores em diferentes distâncias para diminuir esta incerteza.

Para a realização deste ensaio foi utilizado o equipamento Pundit Lab da Proceq (Figura 8.33 – à esquerda). O aparelho é constituído por dois transdutores (emissor e recetor) que atravessam o material e por um módulo central, que emite as ondas e procede à leitura e registo do tempo de transmissão (em microssegundos) [Malanho et al., 2010]. Através deste ensaio é possível avaliar as características mecânicas, homogeneidade, presença de fissuração e outros defeitos no material.

O método utilizado para a realização do ensaio de ultrassons foi o método indireto, sendo o procedimento de ensaio descrito de seguida. Montou-se o equipamento de ultrassons. Mediram-se e marcaram-se 10 pontos (de A a J) numa folha com o tamanho do provete (Figura 8.33 – à direita), tendo as dimensões diagonais sido determinadas por relações trigonométricas. Aplicou-se o gel condutor na ponta dos transdutores e colocou-se o transdutor emissor no ponto A e o transdutor recetor no ponto B. Mediu-se o valor do tempo decorrido. Efetuaram-se as medições nos restantes pontos até ao J. Depois colocou-se o transdutor emissor no ponto J e o transdutor recetor nos restantes pontos, procedendo-se do mesmo modo.

A velocidade de propagação dos ultrassons é calculada através do tempo que a onda longitudinal demora a percorrer a distância, conhecida, entre dois pontos, na superfície a ensaiar. O registo dos valores dos tempos e respetivas distâncias permite calcular as velocidades de propagação das ondas no revestimento de argamassa a ensaiar, v_{us} em m/s, através da expressão 7.17.:

$$v_{us} = \frac{d}{t} \quad (7.17.)$$

em que d – distância percorrida [m]; t – tempo decorrido [s].

A presença de zonas degradadas pode ser detetada através deste ensaio, manifestando-se através de um maior tempo de percurso entre as ondas, algo que se traduz numa menor velocidade de propagação de ultrassons.

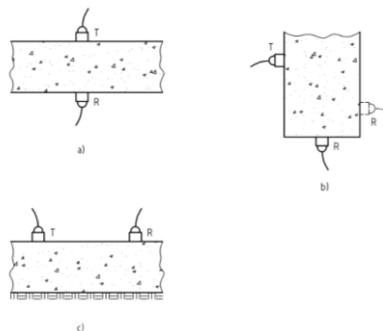


Figura 8.32 – Esquemas de: a) transmissão direta dos transdutores; b) transmissão semi-direta dos transdutores; c) transmissão indireta dos transdutores [CEN, 2004]

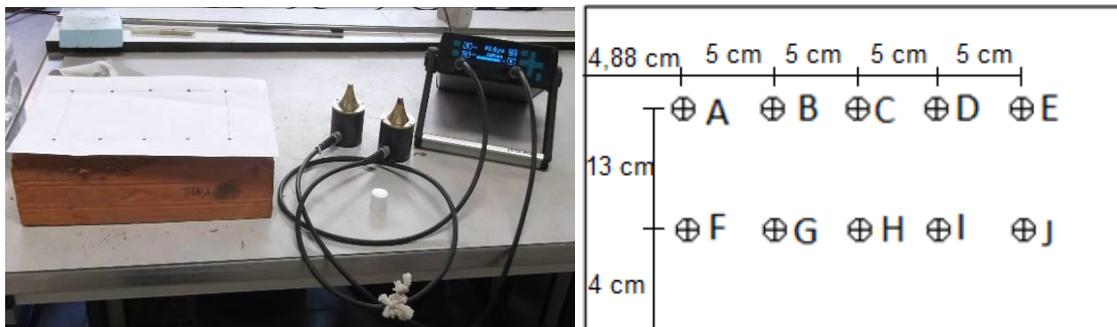


Figura 8.33 – Equipamento do ensaio de velocidade de propagação de ultrassons e provete de argamassa sobre tijolo com os pontos a ensaiar (à esq.); Esquema dos pontos analisados (à dir.)

Resultados

O valor médio e desvio padrão da velocidade de propagação dos ultrassons é de 1352 ± 195 m/s.

8.5.3. Dureza superficial por durómetro

Procedimento de ensaio

O procedimento deste ensaio baseia-se na norma ASTM D2240 [ASTM, 2000]. O ensaio de dureza superficial foi realizado ao provete de argamassa aplicada sobre tijolo e permite avaliar a dureza superficial do revestimento.

Para este ensaio foi utilizado um durómetro Shore A, PCE Group (Figura 8.34 – à esquerda). O aparelho possui na sua extremidade um pino que, quando pressionado contra o material pela ação da mola, sob carga normalizada, indica a resistência de penetração, que se traduz no movimento de um ponteiro ao

longo de uma escala de 0 a 100 [Malanho et al., 2010]. O Shore A é adequado para materiais mais macios e mede a resistência à penetração do pino.

Retirou-se o tijolo da sala condicionada ($20\pm 3^{\circ}\text{C}$ e $65\pm 5\%$) e passou-se uma escova na superfície da argamassa, para eliminar o material solto. Pressionou-se o durómetro e registou-se o valor obtido (Figura 8.34 – à direita). Repetiu-se a medição num total de 12 pontos diferentes da superfície de argamassa.



Figura 8.34 – Durómetro Shore A, PCE Group (à esq.); Ensaio de dureza superficial (à dir.)

Resultados

O resultado deste ensaio corresponde à média dos 12 valores obtidos em cada um dos dois tijolos ensaiados. O valor da dureza superficial da argamassa P_0 , em termos de média e desvio padrão, é de 80 ± 6 Shore A.

8.5.4. Coesão superficial

Procedimento de ensaio

Este ensaio tem como objetivo avaliar a coesão superficial da argamassa aplicada sobre o tijolo. O procedimento de ensaio foi estabelecido especificamente no âmbito deste trabalho, tendo por base Drdácý et al. [2014].

O procedimento de ensaio é descrito de seguida. Inicialmente cortaram-se seis retângulos de 50×70 [mm] de fita-cola, tendo sido pesado cada retângulo numa balança de precisão 0,001 g. De seguida foram colocados os seis retângulos de fita-cola sobre seis zonas distintas da argamassa aplicada sobre o tijolo (Figura 8.35 – à esquerda), tendo sido pressionados sobre a argamassa. Pesaram-se os seis retângulos após a realização dos provetes.

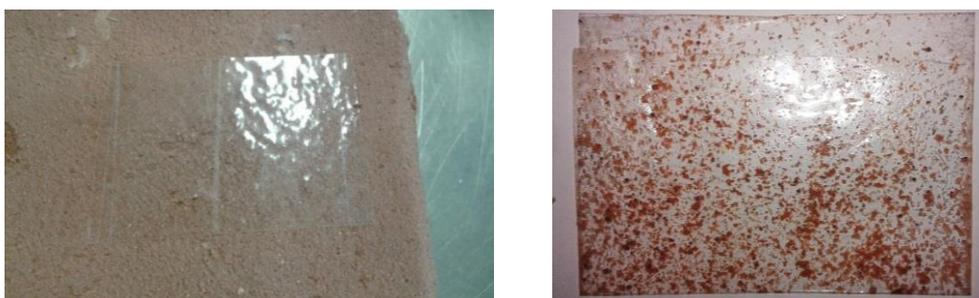


Figura 8.35 – Aplicação da fita-cola sobre o tijolo (à esq.); Material retido na fita-cola (à dir.)

Resultados

O valor obtido para o ensaio de coesão superficial em termos médios e respetivo desvio padrão tomam o valor de $0,10 \pm 0,03$ g.

8.5.5. Aderência ao suporte

Procedimento de ensaio

O ensaio de aderência ao suporte foi realizado com base na norma europeia EN 1015-12 [CEN, 2000]. Para a realização deste ensaio utilizou-se o equipamento de *pull-off* PosiTest AT-M com umas pastilhas metálicas de 50 mm de diâmetro.

Durante o ensaio, com o equipamento de *pull-off*, aplica-se uma força perpendicular à pastilha, sem choque e com uma taxa uniforme de forma que a rotura ocorra entre os 20 e os 60 segundos. A tensão de aderência (f_u em N/mm²) é obtida como o quociente entre a força de rotura (F_u em N) e a área de ensaio (A em mm²), como se pode observar na equação (7.19):

$$f_u = \frac{F_u}{A} \quad (7.19.)$$

A norma EN 1015-12 [CEN, 2000] define três tipos de rotura no ensaio de arrancamento (Figura 8.36). A rotura definida como do tipo a, que pode também ser designada por rotura adesiva, que ocorre por perda de aderência na interface, enquanto as roturas do tipo b e c são roturas coesivas, e acontecem, respetivamente, no seio da camada de reboco e no suporte. No caso de ocorrer uma rotura do tipo a, o resultado do ensaio é igual à tensão de aderência, enquanto no caso de acontecer uma rotura do tipo b ou c, o resultado do ensaio é considerado um limite inferior da tensão de aderência, sendo utilizado no cálculo da sua média. No caso de a rotura ocorrer pela cola entre a argamassa e a pastilha, o resultado do ensaio é nulo, sendo assim rejeitado.

O procedimento de ensaio é descrito de seguida. Retiraram-se os tijolos da sala condicionada ($20 \pm 3^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$) e, com uma caroteadora com 50 mm de diâmetro, efetuaram-se 3 cortes, no provete de argamassa de terra aplicada sobre o tijolo, até à superfície do tijolo, de modo a garantir que o arrancamento ocorra apenas sobre a área da pastilha (Figura 8.37 – à esquerda). No entanto, a norma DIN 18947 [NABau, 2013] refere um mínimo de 5 amostras. De seguida, coloram-se as pastilhas metálicas com 50 mm de diâmetro com resina nas áreas de ensaio, deixando secar bem durante aproximadamente 24h (Figura 8.37 – ao centro). Posteriormente procedeu-se à extração da pastilha metálica com a máquina *pull-off* (Figura 8.37 – à direita). Todas as amostras extraídas foram medidas em duas direções para que fosse possível determinar a área real de cada uma delas.

O resultado do ensaio resulta da média de três ensaios de arrancamento, expresso em N/mm².

Resultados

A tensão de aderência resultante do ensaio de arrancamento na argamassa de reboco de terra sobre o tijolo toma o valor de $0,15 \pm 0,03$ N/mm².

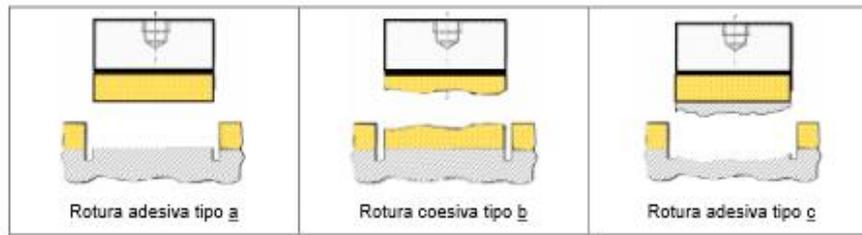


Figura 8.36 – Tipologias de rotura definidas pela norma EN 1015-12 [Quintela, 2006]



Figura 8.37 – Corte da área de ensaio sobre o tijolo (à esq.); Aplicação das pastilhas metálicas de 50 mm de diâmetro sobre a argamassa (ao centro); Ensaio de aderência ao suporte sobre o tijolo (à dir.)

8.5.6. Resistência à abrasão

Procedimento de ensaio

O procedimento de ensaio para a determinação da resistência à abrasão na argamassa sobre o tijolo segue o descrito na secção 8.4.10, sendo os provetes neste caso pesados numa balança de precisão de 0,1g. Foram utilizados dois tipos de escovas: Dura (escova vermelha com 65 mm de diâmetro) e Média (escova azul com 65 mm).

Resultados

O valor de resistência à abrasão obtido em termos de média e desvio padrão constam na Figura 8.38. Não foi realizado com a escova suave, pois não se iria observar variação na pesagem do provete devido à baixa precisão do provete.

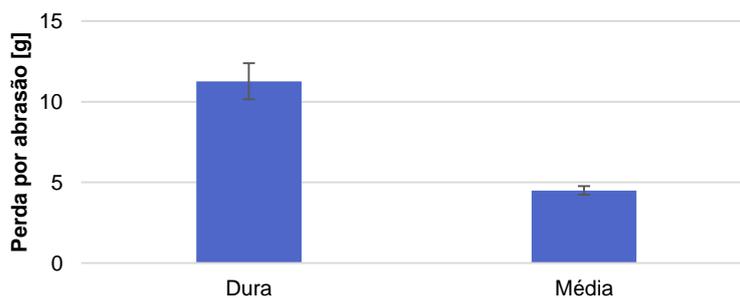


Figura 8.38 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à abrasão da argamassa sobre tijolo com escova dura e média

8.5.7. Porosimetria de mercúrio

Procedimento de ensaio

Para a realização do ensaio de porosimetria na argamassa aplicada sobre tijolo utilizou-se uma amostra retirada da zona em contacto com o tijolo, seguindo-se o mesmo procedimento já descrito na secção 8.4.11.

Resultados

Os resultados obtidos no ensaio de porosimetria de mercúrio sobre a argamassa aplicada sobre o tijolo em termos de massa volúmica, massa volúmica aparente e porosidade constam no Quadro 8.4, enquanto a curva de distribuição de dimensão dos poros constam na Figura 8.39.

Da observação da curva é possível concluir que a argamassa aplicada sobre tijolo em sala condicionada apresenta uma curva de distribuição porosimétrica monomodal apresentando um pico de maior de distribuição de poros próximo dos 45 µm.

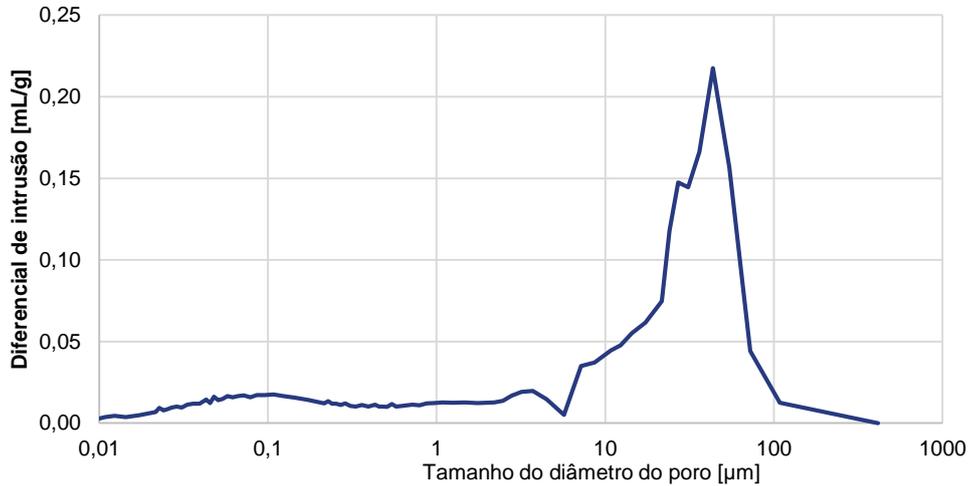


Figura 8.39 – Curva de distribuição do tamanho do diâmetro dos poros em argamassa sobre o tijolo

Quadro 8.4 – Resultados obtidos no ensaio de porosimetria de mercúrio

| | |
|--|------|
| Massa volúmica [kg/dm³] | 1,99 |
| Massa volúmica aparente [kg/dm³] | 2,87 |
| Porosidade [%] | 31 |

8.6. Argamassa no estado endurecido – reboco dos muretes

8.6.1. Dureza superficial por durómetro

Procedimento de ensaio

O procedimento utilizado foi o mesmo referido em 8.5.3. (Figura 8.40).

O resultado deste ensaio corresponde à média dos 12 valores obtidos para cada murete.



Figura 8.40 – Ensaio de dureza superficial por durómetro Shore A no reboco sobre um murete

Resultados

Os resultados obtidos no ensaio de dureza superficial constam da Figura 8.41.

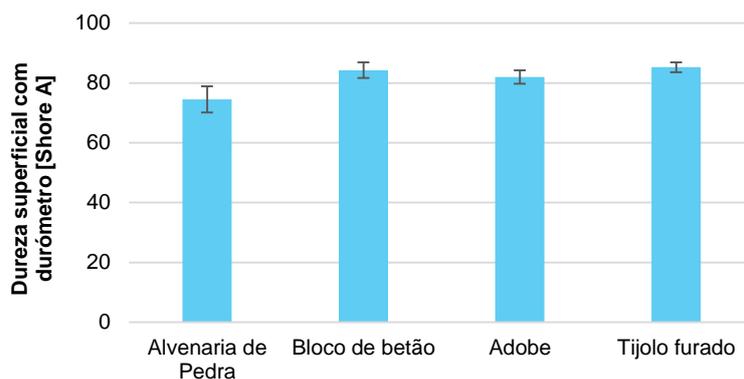


Figura 8.41 – Resultados de dureza superficial por durómetro nos rebocos aplicados sobre diversos muretes

8.6.2. Resistência superficial por esclerómetro

Procedimento de ensaio

Este ensaio possibilita uma avaliação da resistência de um material e da sua dureza superficial. O ensaio baseou-se na norma ASTM C805 [ASTM, 2008], utilizando-se um esclerómetro pendular do modelo Schmidt PM (Figura 8.42) que, através de uma massa conhecida, provoca uma reação elástica por impulso que choca contra a superfície do revestimento. Através da quantidade de energia recuperada pelo ressalto, obtém-se um índice de dureza da superfície ensaiada sobre uma escala graduada no aparelho. Quanto mais brando for o material, maior a quantidade de energia que ele absorve e menor é a altura do ressalto [Malanho et al., 2010].

Inicialmente escolheram-se 12 pontos para ensaiar, considerando a heterogeneidade da parede em estudo. Posteriormente colocou-se o esclerómetro encostado ao reboco em cada um desses pontos, com o ponto de aplicação da massa alinhado com o aparelho. De seguida libertou-se o pêndulo, através do botão de disparo, tendo em atenção que o equipamento tem sempre de estar bem encostado à superfície em estudo. Registaram-se as leituras dadas pelo esclerómetro em cada ponto.

A dureza superficial em cada reboco foi dada pela média de 12 medições efetuadas com o esclerómetro [graus Vickers].



Figura 8.42 – Ensaio de resistência superficial com esclerómetro pendular num reboco

Resultados

Os resultados obtidos no ensaio de resistência superficial com esclerómetro pendular constam da Figura 8.43.

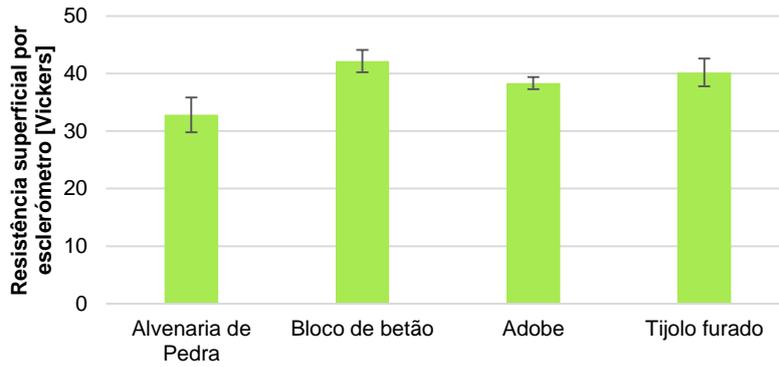


Figura 8.43 – Resultados de resistência superficial com esclerómetro pendular nos rebocos aplicados em diversos muretes

8.6.3. Velocidade de propagação dos ultrassons

Procedimento de ensaio

À semelhança do efetuado na secção 8.5.2, realizaram-se várias medições, em que o transdutor é mantido num ponto inicial e fixo A e o recetor é colocado em vários pontos ao longo de uma linha, como se pode observar na Figura 8.44 – à esquerda.

Para a realização deste ensaio foi utilizado o método de transmissão indireta (em que os transdutores são colocados na mesma face) e teve-se em conta os passos seguintes. Montou-se o equipamento de ultrassons. Mediram-se e marcaram-se os 5 pontos em que o primeiro e o segundo distam de 6 cm entre si e os restantes distam de 2 cm, tal como representa o esquema da Figura 8.44 – à direita.

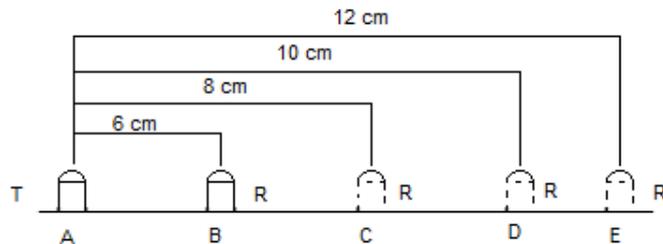


Figura 8.44 – Ensaio da velocidade de propagação dos ultrassons (à esq.); Esquema de medição do ensaio da velocidade de propagação dos ultrassons pelo método utilizado (à dir.)

Resultados

Os resultados do ensaio de propagação de ultrassons nos muretes constam na Figura 8.45.

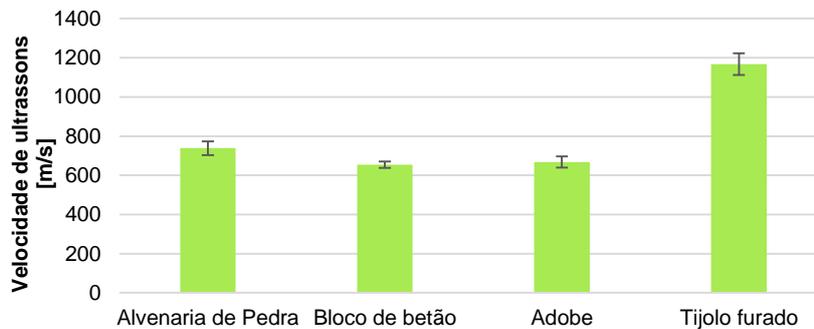


Figura 8.45 – Resultados de velocidade de propagação dos ultrassons do reboco aplicado sobre os diversos muretes

8.6.4. Coesão superficial

Procedimento de ensaio

Relativamente ao procedimento de ensaio, a única diferença face ao descrito na secção 8.5.4. é que é colocada uma placa revestida com esponja num dos lados sobre cada retângulo de fita adesiva colada nos rebocos. Com o esclerómetro pendular é lançada uma massa conhecida sobre a placa, para que seja aplicada uma força uniforme sobre todo o retângulo de fita-cola. Descolam-se os retângulos, que são novamente pesados (Figura 8.46 – à esquerda).

Este ensaio foi realizado num período com condições climatéricas húmidas e secas de forma a analisar a influência das condições atmosféricas sobre o reboco. As medições foram realizadas numa faixa superior e noutra inferior de forma a poder observar a influência da absorção de água por capilaridade e de vapor de água por higroscopicidade do reboco (Figura 8.46 – à direita).

Em condições de tempo seco a força sobre a fita-cola foi exercida com a auxílio da mão e não do esclerómetro pendular, de forma a poder-se a analisar a influência da força exercida no resultado final.

Deste ensaio resulta a quantidade de matéria que fica retida na fita-cola, sendo expresso em g.

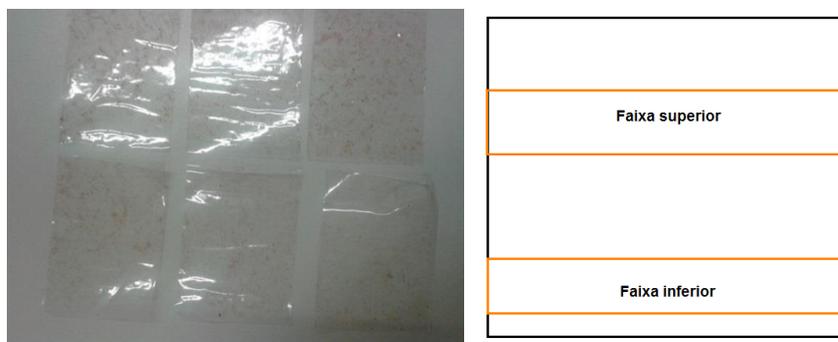


Figura 8.46 – Fita adesiva com o material retido (à esq.); Mapeamento das zonas de ensaio (à dir.)

Resultados

Os resultados obtidos no ensaio de coesão superficial constam na Figura 8.47.

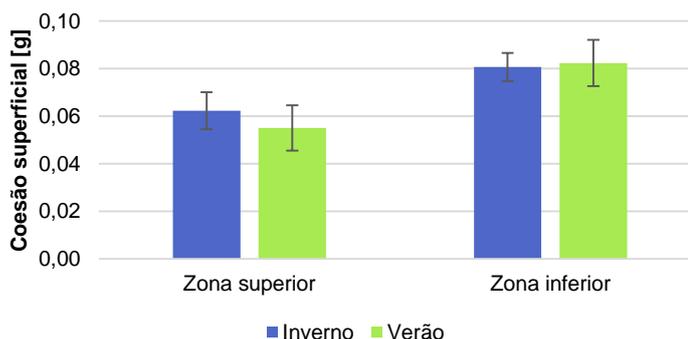


Figura 8.47 - Resultados do ensaio de coesão superficial em duas faixas dos rebocos sobre os muretes em condições climatéricas diferentes

8.6.5. Resistência superficial e deformabilidade com choque da esfera

Procedimento de ensaio

O ensaio com o choque de esfera, realizado com o aparelho de *Martinet-Baronnie* (Figura 8.48), permite avaliar a deformabilidade de rebocos, através da resistência ao impacto de uma esfera de aproximadamente 50 mm de diâmetro e 0,5 kg de massa.

Os resultados do ensaio são expressos através da medição do diâmetro da massa provocada pela esfera no reboco. Fazendo uma análise simplista, pode dizer-se que quanto menor o diâmetro da massa, maior a resistência do reboco. No entanto, deve ter-se em consideração que um diâmetro relativamente elevado pode significar um bom resultado, desde que não seja acompanhado de fissuração, uma vez que indica uma elevada deformabilidade, característica muito vantajosa numa argamassa de substituição [Veiga e Carvalho, 2000].

O ensaio baseia-se na ficha de ensaio Fe Pa 25 [LNEC, 1980], que recomenda a execução do ensaio em pelo menos 5 pontos distintos de cada superfície a ensaiar. Para além do aparelho de *Martinet-Baronnie* é necessária ainda uma régua de precisão de 0,1 mm.

O procedimento do ensaio é o seguinte. Após identificar os pontos a ensaiar, colocou-se o “braço” do aparelho junto ao “corpo”, encostando a esfera ao rolo existente no “pé” do aparelho (Figura 8.49 – à esquerda). Após ser garantida a horizontalidade do aparelho, deixou-se cair livremente a esfera contra a superfície a ensaiar. No final de cada ensaio, mediu-se o diâmetro da massa provocada pela esfera na superfície, com o auxílio de uma craveira (Figura 8.49 – ao centro). O ensaio repetiu-se para todos os pontos definidos.

O ensaio foi realizado em condições climáticas húmidas e secas.

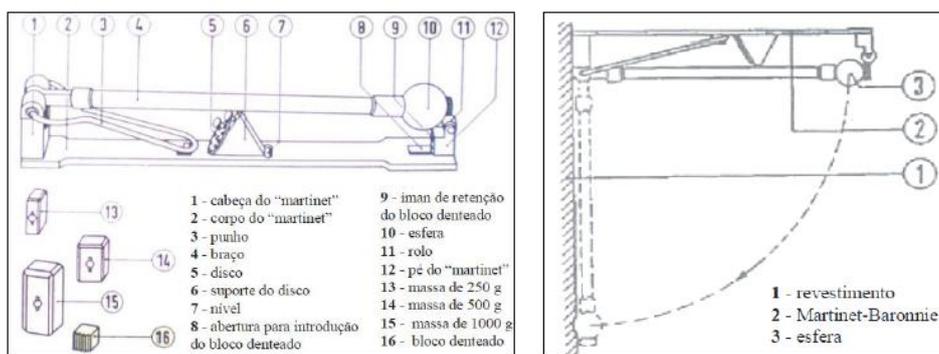


Figura 8.48 – Esquema do aparelho de *Martinet-Baronnie* e do ensaio do choque da esfera [Lino, 2013]



Figura 8.49 – Equipamento de *Martinet-Baronnie* (à esq.); Medição do diâmetro da massa (ao centro); Massa provocada pelo equipamento (à dir.)

Resultados

Na Figura 8.50 é possível observar os valores do diâmetro da massa causada por este ensaio em termos de média e desvio padrão, para as diferentes condições climáticas.

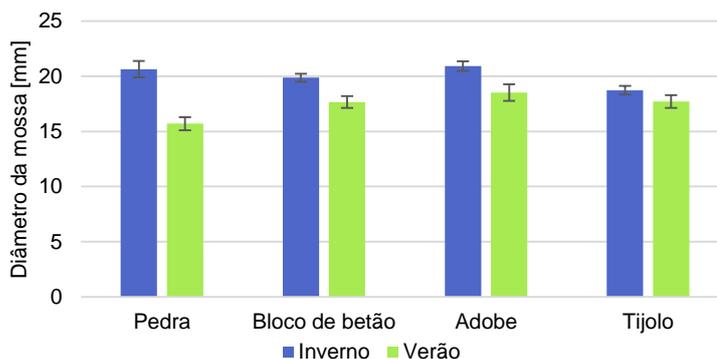


Figura 8.50 – Resultados obtidos no ensaio de resistência superficial com choque da esfera sobre os rebocos aplicados nos muretes, em diferentes condições climáticas

8.6.6. Aderência ao suporte

Procedimento de ensaio

O ensaio foi realizado à argamassa de reboco aplicada sobre os quatro suportes diferentes tendo sido seguido o procedimento de ensaio descrito na secção 8.5.5.

Resultados

Tal como referido anteriormente o ensaio foi realizado sobre os quatro rebocos aplicados em suportes diferentes. No entanto apenas o ensaio realizado ao reboco sobre o murete de tijolo pode ser considerado válido, segundo a norma EN 1015-12 [CEN, 2000], uma vez que a rotura ocorreu na interface argamassa/suporte; em todos os outros rebocos sobre muretes ocorreu na interface pastilha/argamassa (Figura 8.51).

O resultado de aderência ao suporte no murete de tijolo é de $0,15 \pm 0,02$ N/mm², enquanto os restantes provetes apresentam um valor nulo.



Figura 8.51 – Rotura na interface pastilha/argamassa (à esq.); Rotura na interface argamassa/suporte (à dir.)

8.6.7. Porosimetria de mercúrio

Procedimento de ensaio

O ensaio de porosimetria de mercúrio sobre a argamassa de reboco aplicada sobre os muretes é realizado sobre amostras retiradas de cada um dos muretes. O procedimento foi descrito na secção 8.4.11.

Resultados

Os resultados obtidos em termos de massa volúmica, massa volúmica aparente e porosidade da argamassa aplicada sobre cada um dos muretes constam no Quadro 8.5. A curva de distribuição dos poros das argamassas de reboco sobre diferentes rebocos constam na Figura 8.52.

Da observação da curva é possível concluir que as argamassas de reboco aplicadas sobre diferentes rebocos contêm maiores quantidades de poros com dimensões entre os 10 µm e os 50 µm.

Quadro 8.5 – Resultados obtidos através do ensaio de porosimetria de mercúrio

| | Pedra argamassada | | Bloco de betão | Adobe | Tijolo furado |
|---|-------------------|----------|----------------|-------|---------------|
| | Superior | Inferior | | | |
| Massa volúmica [kg/dm ³] | 2,02 | 1,86 | 2,05 | 1,86 | 1,81 |
| Massa volúmica aparente [kg/dm ³] | 3,05 | 2,70 | 3,01 | 2,88 | 2,60 |
| Porosidade [%] | 34 | 31 | 32 | 30 | 30 |

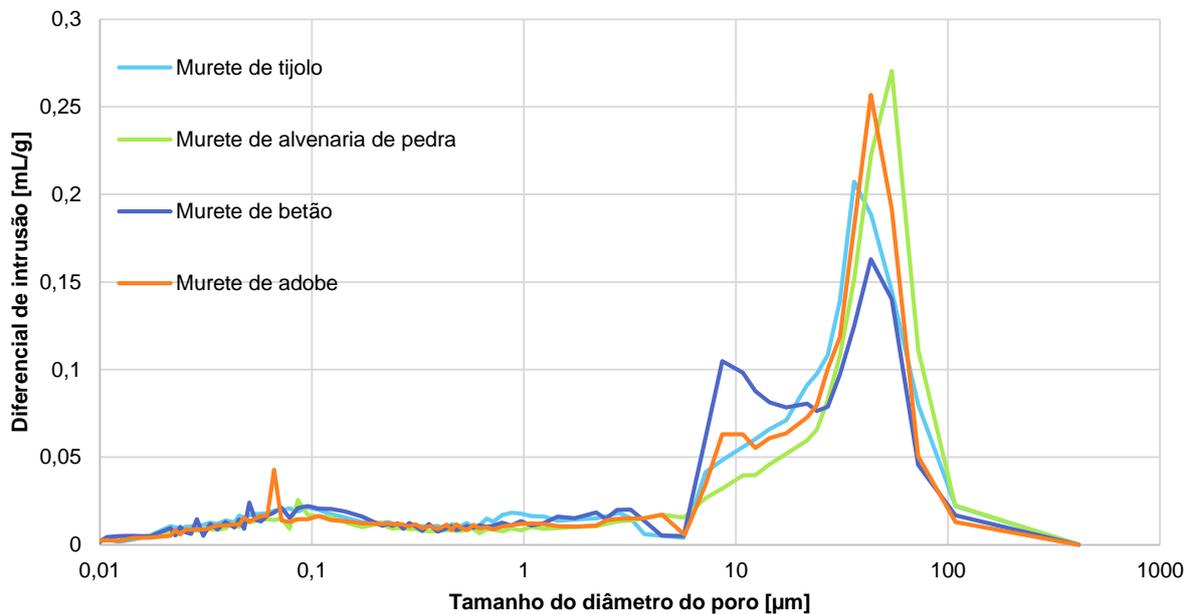


Figura 8.52 – Curva de distribuição do tamanho do diâmetro dos poros em argamassa de rebocos aplicada sobre diferentes muretes

8.7. Síntese da caracterização da argamassa pré-doseada de terra da fase experimental inicial

Tal como referido anteriormente, pretendia-se que a caracterização da argamassa pré-doseada produzida no *workshop* e reproduzida posteriormente em laboratório mas através de misturadora que pode ser utilizada em obra, possibilitasse efetuar uma caracterização exaustiva dessa argamassa e estabelecer ou afinar procedimentos de ensaio. Ambos esses objetivos foram atingidos.

8.7.1. Resultados da argamassa

No Quadro 8.6 apresentam-se os valores médios e desvios-padrão obtidos na caracterização no estado fresco da argamassa preparada *in situ* e da mesma amassadura preparada em laboratório. Para simplificação designa-se esta argamassa como P₀.

A norma DIN 18947 [NABau, 2013] define que a argamassa no estado fresco deve ter massa volúmica superior a $1,2 \text{ kg/dm}^3$ e uma consistência por espalhamento de $175 \pm 5 \text{ mm}$, pelo que se pode concluir que a argamassa de terra preparada *in situ* cumpre o exigido pela norma em termos de consistência por espalhamento e massa volúmica, enquanto a argamassa preparada em laboratório, com o mesmo teor em água, apresenta uma consistência por espalhamento apenas ligeiramente superior ao definido como limite. É importante referir que nenhuma das argamassas foi preparada exatamente de acordo com o procedimento de amassadura definido na norma DIN 18947 [NABau, 2013], como referido na secção 5.1 e 5.3.

Em termos de retração linear, a argamassa de terra em estudo apresenta um valor de retração inferior a 3%, como se pode observar no Quadro 8.7, estando por isso de acordo com a norma DIN 18947 [NABau, 2013]. Do quadro pode constatar-se que a retração detetada foi crescente com a dimensão da dimensão medida.

O Quadro 8.8 apresenta os resultados obtidos, em termos médios e desvios-padrão, nos ensaios de resistência mecânica, absorção capilar, secagem e de resistência à difusão do vapor de água.

Quadro 8.6 – Resultados médios e desvios-padrões das amassaduras da argamassa P_0 no estado fresco

| | <i>In situ</i> | Laboratório |
|---|----------------|-------------|
| Consistência por Espalhamento [mm] | 178.8±2.5 | 182.3±2.5 |
| Abaixamento [mm] | - | 14.2 |
| Consistência por penetrómetro [mm] | - | 2.4±0.1 |
| Massa volúmica [kg/dm^3] | 2.03 | 2.11 |
| Teor de ar [%] | 2.8 | 2.5 |
| Retenção de água [%] | - | 67.5±1.3 |
| Teor de água [%] | 20.1±0.1 | 19.4±0,3 |

Quadro 8.7 - Resultados médios e desvios-padrão da retração nos provetes da argamassa P_0

| Provetes | Retração [%] |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| Teste de Alcock 600x40x40 [mm] | 0,61±0,00 |
| Planares 500x200x15 [mm] | Segundo o comprimento 0,58±0,23 |
| | Segundo a largura 0,32±0,00 |
| Prismáticos 160x40x40 [mm] | 0,21±0,08 |

Em termos de resistência mecânica (resistência à compressão, tração e aderência ao suporte) a argamassa pode ser classificada como sendo de classe SI, tendo em conta que apresenta valores de resistência à tração por flexão não inferiores a $0,3 \text{ N/mm}^2$, resistência à compressão superior a $1,0 \text{ N/mm}^2$ e aderência ao suporte superior a $0,05 \text{ N/mm}^2$.

Os valores de resistência à difusão do vapor de água, μ , e de espessura da camada de difusão de vapor de água equivalente, S_d , encontram-se dentro da escala definida pela norma DIN 18947 [NABau, 2013] que define que as argamassas de terra apresentam um valor de resistência à difusão de vapor de água entre 5 e 10 (Quadro 8.8).

Relativamente aos valores do ensaio de capilaridade e secagem, apresentados para cada tipo de impermeabilização, permitem recomendar que o processo de preparação das amostras é muito importante.

Os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade mostra que a impermeabilização com película aderente de polietileno não é um método aconselhado de impermeabilização, devendo-se aplicar sempre resina *epóxi* (ou equivalente) como método de impermeabilização lateral. Por outro lado, a absorção capilar dos provetes sem qualquer tipo de impermeabilização é a mais alta. Uma vez que a parte

da norma EN 1015 relativa ao ensaio de capilaridade, EN 1015-18 [CEN, 2002], recomenda uma impermeabilização lateral eficiente, considera-se mais eficiente que o mesmo procedimento se adote também para as argamassas de terra, quando a capilaridade for considerada requisito a considerar.

Os resultados de índice de secagem e de taxa de secagem, em termos médios e de desvios-padrão, permitem também observar que a preparação das amostras têm uma influência menos importante para a velocidade de secagem e determinação do índice de secagem, em comparação com o coeficiente de capilaridade. No entanto a película aderente de polietileno aumenta ligeiramente a velocidade de secagem em comparação com a resina *epóxi*, significando que a secagem inicial aparenta ser mais rápida através desta preparação dos provetes. A película de polietileno retarda ligeiramente a secagem completa, em comparação com a resina.

Em termos de preparação da amostra, a tendência ao nível da taxa de secagem parece ser proporcional à do coeficiente de capilaridade. Para o índice de secagem, as amostras sem qualquer tipo de impermeabilização lateral e com resina *epóxi* apresentam tendência proporcional à do índice de secagem e coeficiente de capilaridade, enquanto as amostras com película aderente de polietileno apresentam um comportamento que não está de acordo com o comportamento dos provetes preparados com resina. Por estes motivos, o uso de película aderente de polietileno para impermeabilização lateral dos provetes deve ser descartado.

Quadro 8.8 – Resultados obtidos, em termos médios e de desvio-padrão, nos ensaios de resistência, de absorção capilar, de secagem e de resistência à difusão do vapor de água

| | | | |
|---|--|-----------------|-------------|
| Módulo de elasticidade dinâmico [N/mm²] | | 3610±128 | |
| Resistência à tração [N/mm²] | | 0,27±0,04 | |
| Resistência à compressão [N/mm²] | | 1,07±0,08 | |
| Capilaridade | CC [kg/(m².min^{0,5})] | Resina | 0,50 ± 0,06 |
| | | Película | 0,86 ± 0,04 |
| | | S/ imp. | 1,84 ± 0,34 |
| Secagem | TS [kg/(m².h)] | Resina | 0,30 ± 0,01 |
| | | Película | 0,33 ± 0,02 |
| | | S/ imp. | 0,64 ± 0,07 |
| | IS [-] | Resina | 0,18 ± 0,01 |
| | | Película | 0,22 ± 0,02 |
| | | S/ imp. | 0,14 ± 0,03 |
| Resistência à difusão do vapor de água | | μ [-] | 8,0±0,03 |
| | | Sd [m] | 0,16±0,01 |

O Quadro 8.9 apresenta os valores obtidos no ensaio de condutibilidade térmica nos diferentes provetes de ensaio. É importante referir que todos os provetes cumprem as recomendações do equipamento Heat Transfer Analyser ISOMET 2104, exceto os provetes prismáticos de 40x40x160 [mm]. No entanto todos os provetes apresentam um valor de condutibilidade térmica na casa dos 0,9 W/(m.K).

Quadro 8.9 - Resultados obtidos, em termos médios e de desvios-padrão, no ensaio de condutibilidade térmica

| | 40x40x160 [mm] | Ø90 mm e 15 mm de esp. | Ø90 mm e 20 mm de esp. | 500x200x15 [mm] | 1,5cm de arg. sobre tijolo |
|--------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| λ [W/(m.K)] | 0,98±0,04 | 0,85±0,03 | 0,91±0,04 | 0,94±0,01 | 0,92±0,09 |

Em relação aos resultados obtidos no ensaio de aderência ao suporte sobre os rebocos de argamassa aplicados nos muretes é possível concluir que a aderência ao suporte é igual tanto no provete de argamassa realizado em laboratório como no reboco de argamassa aplicado *in situ* e que não foi possível avaliar a aderência ao suporte da argamassa aos restantes suportes por deficiência na preparação das pastilhas para ensaio (Quadro 8.10). A impossibilidade de obter amostras viáveis para o ensaio de aderência ao suporte nas argamassas aplicadas como reboco em muretes de alvenaria de pedra, blocos de betão e adobe pode ter a ver como dois fatores: devido ao facto de a cola ter sido aplicada num período de tempo em que a humidade do ar era elevada, pode não ter secado o suficiente ou apenas ter sido absorvida pela camada inicial de argamassa; a reduzida coesão da argamassa de terra pode ter levado à rotura numa zona superficial da argamassa.

Quadro 8.10 – Resultados obtidos, em termos médios e desvio-padrão, nos ensaios de aderência ao suporte, abrasão, coesão superficial, dureza superficial e resistência superficial por esclerómetro e choque de esfera

| | | Ø90 mm e 20 mm esp. | Arg sobre tijolo | Reboco +Alv.Pedra | Reboco +Alv.Bloco de betão | Reboco +Alv.Adobe | Reboco +Alv.Tijolo |
|---|---------------------|---------------------|------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|--------------------|
| Aderência ao suporte [N/mm²] | | - | 0,15±0,03 | 0 | 0 | 0 | 0,15±0,02 |
| Abrasão [g] | Escova dura | 18,1±3,1 | 11,2±2,2 | - | - | - | - |
| | Escova média | 3,9±0,5 | 4,5±0,5 | - | - | - | - |
| | Escova mole | 0,3±0,0 | 0,3±0,0 | - | - | - | - |
| Coesão superficial [g] | Inverno | - | 0,10±0,03 | - | - | - | 0,062±0,016 |
| | | - | | - | - | 0,081±0,012 | |
| | Verão | - | | - | - | 0,055±0,019 | |
| | | - | | - | - | 0,082±0,020 | |
| Dureza superficial [Shore A] | | - | 80±6 | 75±9 | 84±5 | 82±5 | 85±3 |
| Velocidade de ultrassons [m/s] | | - | 1352±195 | 738±70 | 654±33 | 668±57 | 1168±110 |
| Resistência superficial por esclerómetro [Vickers] | | - | - | 33±6 | 42±4 | 38±2 | 40±5 |
| Resistência superficial por choque da esfera [mm] | Inverno | - | - | 20,64±1,47 | 19,87±0,70 | 20,93±0,88 | 18,74±0,79 |
| | Verão | - | - | 15,71±1,19 | 17,66±1,08 | 18,53±1,50 | 17,72±1,14 |

A utilização de escovas com durezas diferentes influencia muito o resultado do ensaio de resistência à abrasão (Figura 8.53). Analisando os valores de perda de massa com a realização do ensaio de resistência à abrasão para cada tipo de escova (Quadro 8.10), é possível concluir que a argamassa não é classificável através da norma DIN 18947 [NABau, 2013] quanto à sua resistência à abrasão utilizando a escova dura e a escova média, pois originam perdas de massa superiores ao definido pela norma. Quando utilizada a escova mole os valores apresentados permitem classificar a argamassa como sendo de classe SII. Por este motivo é imprescindível a definição extra do tipo de escova a utilizar no ensaio e garantir ainda que este se efetua realmente com a carga definida. A aplicação da carga constante definida na DIN [NABau, 2013] sobre a escova pode dificultar a execução do ensaio sobre um reboco aplicado *in situ*.

Da comparação dos resultados obtidos com a realização do ensaio com três tipos de escovas diferentes é possível concluir que a melhor opção será a escova de dureza média, pois a escova dura (vermelha) provoca um desgaste excessivo na superfície enquanto a escova mole (preta) provoca um desgaste muito superficial. O facto do ensaio com esta escova não ter cumprido a norma pode dever-se ao facto de ter sido efetuado pesando os provetes antes e após ensaio e aferindo de forma exata a diferença

de massa; recolher e pesar o material solto pela abrasão, tal como definido na norma, pode incorrer em perdas de material não contabilizado.



Figura 8.53 – Efeito de cada escova nos provetes circulares

O ensaio de coesão superficial permitiu avaliar quantitativamente a perda de material à superfície. Pela análise dos resultados que constam no Quadro 8.10 é possível concluir que não existe grandes variações entre a argamassa aplicada sobre o tijolo em condições laboratoriais e o reboco aplicado nos muretes, ao nível da coesão superficial.

Em termos de velocidade de propagação dos ultrassons é possível concluir que a argamassa aplicada sobre o tijolo furado de 7 cm apresenta uma velocidade de propagação de ultrassons ligeiramente superior em relação ao reboco de argamassa aplicado sobre o murete de tijolo. Por outro lado, tanto a argamassa sobre o tijolo como o reboco de argamassa sobre o murete de tijolo apresentam valores de velocidade de propagação dos ultrassons superiores aos restantes rebocos de argamassa (Quadro 8.10). Quanto maior a velocidade de ultrassons, mais compacta a argamassa. Em relação à dureza superficial por durómetro Shore A conclui-se que a dureza superficial, em qualquer um dos suportes, ronda os 80 Shore A.

Em relação ao ensaio de resistência superficial ao choque da esfera é notória a diminuição do diâmetro da massa em condições climatéricas secas (reboco mais seco) em relação a condições climatéricas húmidas (reboco mais húmido, por higroscopicidade). A resistência superficial por esclerómetro pendular ronda os 40 graus Vickers em todos os rebocos aplicados sobre os muretes.

Seria expectável que os ensaios de velocidade de propagação por ultrassons e de resistência superficial por esclerómetro pendular apresentassem resultados tendencialmente semelhantes, o que não acontece na argamassa aplicada como reboco sobre os muretes; com efeito, o maior valor de velocidade de propagação por ultrassons é apresentada pela argamassa aplicada sobre tijolo, enquanto o maior valor de resistência superficial por esclerómetro pendular é apresentado pela argamassa sobre bloco de betão. Esta variação de valores pode ter a ver com diferentes níveis de influência do suporte, uma vez que no ensaio de velocidade de propagação por ultrassons as ondas podem nalguns casos atingir o suporte, enquanto no ensaio de resistência superficial por esclerómetro pendular a sua influência é mais indireta.

O ensaio de resistência superficial por esclerómetro e por choque da esfera permitem avaliar indiretamente a aderência ao suporte da argamassa, uma vez que a solicitam por choque.

O Quadro 8.11 apresenta os valores médios obtidos no ensaio de adsorção e desadsorção do vapor de água para os diferentes provetes ensaiados.

Comparando os valores obtidos com as classes definidas na norma DIN 18947 [NABau, 2013], verifica-se que, de acordo com os resultados de todos os provetes, a argamassa é classificada como sendo de classe WSIII.

A dimensão da superfície das amostras tem uma grande influência sobre os valores medidos; no entanto, e para a mesma área, a espessura da amostra não aparenta ter uma influência significativa. Não obstante, a tendência apresentada por todos os provetes parece ser muito semelhante, como pode ser observado no declive dos últimos segmentos de todas as amostras (Figura 8.27). Tal situação, após comprovação, poderá conduzir à possibilidade de se estabelecer uma relação entre provetes tornando possível a realização do ensaio de adsorção do vapor de água com o mesmo tipo de provetes circulares utilizados para a determinação da condutibilidade térmica, permeabilidade ao vapor e abrasão. A comprovar-se, evitava-se a necessidade de produzir provetes específicos para este ensaio.

Quadro 8.11 – Resultados médios do ensaio de adsorção de vapor de água

| $\Delta Wt/Area$ [g/m ²] | Adsorção | | | Desadsorção | | |
|---|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| | Ø 9cm e 1,5cm de espessura | Ø 9cm e 2cm de es- pessura | Prismas 500x200x15 [mm] | Ø 9cm e 1,5cm de espessura | Ø 9cm e 2cm de es- pessura | Prismas 500x200x15 [mm] |
| 0,5 | 8,7 | 10,3 | 29,0 | 16,9 | 12,0 | 13,3 |
| 1 | 18,0 | 24,0 | 60,3 | 30,1 | 19,8 | 22,3 |
| 3 | 36,9 | 34,1 | 75,0 | 54,0 | 46,0 | 42,0 |
| 6 | 49,4 | 45,3 | 90,3 | 78,2 | 68,6 | 59,3 |
| 12 | 68,5 | 67,7 | 105,3 | 108,4 | 100,8 | 74,3 |

De acordo com a norma DIN 18947 [NABau, 2013] e através dos provetes prismáticos, verifica-se que esta argamassa, em termos de massa volúmica aparente, pode ser classificada como sendo de classe 1,8, uma vez que apresenta valores entre 1,61 e 1,80 kg/dm³ (Quadro 8.12).

A massa volúmica e a porosidade aberta da argamassa em estudo foram determinadas por porosimetria de intrusão de mercúrio (MIP) e a mesma técnica foi utilizada para determinar o tamanho dos poros. A técnica foi aplicada em amostras retiradas de provetes prismáticos de 40x40x160 [mm], sem qualquer influência dum suporte, mas também a partir da camada de argamassa aplicada no tijolo furado de 7 cm de espessura, em condições controladas de laboratório, assim como em amostras de argamassa aplicada no reboco dos diferentes muretes.

A massa volúmica e a porosidade aberta obtida através do MIP para cada uma das amostras ensaiadas são apresentadas no Quadro 8.12.

Quadro 8.12 – Resultados obtidos no MIP para massa volúmica aparente e porosidade, e de massa volúmica aparente também por método geométrico

| | | Massa volúmica [kg/dm ³] | Porosidade [%] | |
|---------------------------------|------------------------|---|-------------------|----|
| Provetes prismáticos | Geométrico | 1,77 ±0,02 | - | |
| | MIP | 1,78 | 31 | |
| Arg sobre Tijolo (MIP) | | 1,99 | 31 | |
| Reboco nos muretes (MIP) | Tijolo furado | 1,81 | 30 | |
| | Bloco de betão | 2,05 | 32 | |
| | Adobe | 1,86 | 30 | |
| | Pedra argamas- sada | Zona superior | 2,02 | 34 |
| | | Zona inferior | 1,86 | 31 |

Verifica-se que o método geométrico aparenta ser um método fiável, comparativamente ao valor obtido pelo MIP e que a influência de um suporte poroso parece ser no sentido de aumentar a massa volúmica da argamassa. No entanto, a tendência da porosidade é proporcional à da massa volúmica, o que

não é expectável. A tendência da porosidade aberta indica, no entanto, uma pequena variação (entre 30% e 34%) para todas as amostras de argamassa, a partir do prisma (sem suporte poroso) ou sobre suportes com maior ou menor porosidade.

Interessa em trabalhos futuros aprofundar esta temática.

8.7.2. Procedimentos de ensaio

Após a conclusão da campanha experimental de caracterização da argamassa da fase experimental inicial é de referir que os ensaios de consistência por espalhamento e massa volúmica, realizados à argamassa no estado fresco, são bastante importante não só pelo facto de serem requisitos na norma DIN 18947 [NABau, 2013], mas também porque nos permitem avaliar a trabalhabilidade da argamassa.

A determinação da massa volúmica aparente é importante para poder classificar a argamassa, tal como as resistências à tração e à compressão e aderência ao suporte. Uma vez que se determinam as características mecânicas da argamassa de terra, faz sentido determinar o módulo de elasticidade dinâmico.

Apesar da norma DIN 18947 [NABau, 2013] não contemplar o ensaio de absorção de água por capilaridade na caracterização das argamassas de terra, considera-se importante caracterizar a argamassa a este nível pois a parede onde poderá ser aplicado o reboco de argamassa de terra pode não apresentar uma solução de corte hídrico ou apresentar problemas de absorção de água por capilaridade que se poderão refletir no reboco posteriormente.

Há que referir que o método de impermeabilização lateral dos provetes no ensaio de capilaridade será com resina, tal como já referido, devido ao facto de apresentar os melhores resultados de coeficiente de capilaridade e ser semelhante ao definido na EN 1015-18 [CEN, 2002] para outros tipos de argamassas.

O ensaio de adsorção de vapor de água é também importante realizar de modo a avaliar a capacidade higroscópica desta argamassa.

A avaliação da resistência à abrasão dos rebocos de argamassa de terra é importante devido ao facto deste tipo de argamassa poder ser utilizado no interior sem qualquer tipo de proteção. É de referir ainda que para a realização deste ensaio é necessário utilizar uma escova de dureza média para que se possam obter resultados aceitáveis.

9. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS FORMULADAS EM LABORATÓRIO

Numa segunda campanha, em laboratório, foram realizadas as argamassas já definidas no Quadro 7.1 e que se particularizam mais detalhadamente no Quadro 9.1.

Quadro 9.1 – Traços volumétricos das argamassas formuladas

| Traço volumétrico | | | | | | |
|-------------------|-------|----------|----------|--------|-----|------|
| Argamassa | Terra | Areia AG | Areia AF | Fibras | PCM | Água |
| P | | | 1 | | - | 0,2 |
| FS | 1 | - | 3 | - | - | 0,05 |
| FS_PCM20 | 1 | - | 2,4 | - | 0,6 | 0,05 |
| CS | 1 | 3 | - | - | - | 0,04 |
| CS_PCM20 | 1 | 2,4 | - | - | 0,6 | 0,04 |
| CS45_FS30 | 1 | 1,8 | 1,2 | - | - | 0,05 |
| CS30_FS45 | 1 | 1,2 | 1,8 | - | - | 0,05 |
| CS30_FS25_PCM20 | 1 | 1,2 | 1 | - | 0,8 | 0,05 |
| CS30_FS15_PCM30 | 1 | 1,2 | 0,6 | - | 1,2 | 0,05 |
| CS30_FS45_F5 | 1 | 1,2 | 1,8 | 0,2 | - | 0,06 |

Para caracterizar estas argamassas foram utilizados os mesmos ensaios já realizados na argamassa da fase experimental inicial, P₀. Para as argamassas que apresentam materiais de mudança de fase (PCM) na sua constituição, para além dos ensaios realizados, foram realizados ensaios específicos para a caracterização da argamassa com este tipo de material.

Os valores parciais obtidos nos ensaios constam no Anexo A.3.

9.1. Constituintes das argamassas

9.1.1. Baridade

O ensaio para determinar a baridade (Figura 9.1) seguiu o procedimento descrito na secção 8.2.1., tendo sido realizado não só para a argamassa pré-doseada P mas também para todos os constituintes das restantes argamassas formuladas em laboratório, isto é, terra argilosa, areias fina e grossa, fibras e material de mudança de fase (PCM). Os valores obtidos no ensaio em termos de média e desvio-padrão (estes foram muito reduzidos) são apresentados na Figura 9.2.



Figura 9.1 – Ensaio de baridade dos PCM (à esq.); Ensaio de baridade das fibras vegetais (à dir.)

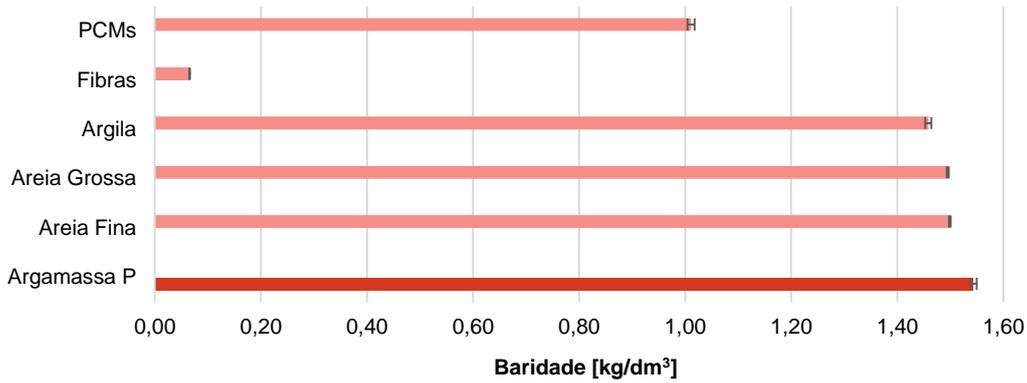


Figura 9.2 – Resultados médios e desvio-padrão do ensaio de baridade

Com os valores da baridade é possível determinar os traços em massa das argamassas, que se apresentam no Quadro 9.2.

Quadro 9.2 – Traços em massa das argamassas formuladas

| Argamassa | Terra | Areia AG | Areia AF | Fibras | PCM |
|-----------------|-------|----------|----------|--------|-----|
| FS | 1 | - | 4,5 | - | - |
| FS_PCM20 | 1 | - | 3,6 | - | 0,6 |
| CS | 1 | 4,5 | - | - | - |
| CS_PCM20 | 1 | 3,6 | - | - | 0,6 |
| CS45_FS30 | 1 | 2,7 | 1,8 | - | - |
| CS30_FS45 | 1 | 1,8 | 2,7 | - | - |
| CS30_FS25_PCM20 | 1 | 1,8 | 1,5 | - | 0,8 |
| CS30_FS15_PCM30 | 1 | 1,8 | 0,9 | - | 1,2 |
| CS30_FS45_F5 | 1 | 1,8 | 2,7 | 0,014 | - |

9.1.2. Análise granulométrica

A análise granulométrica da argamassa pré-doseada, P e de cada um dos constituintes das argamassas formuladas em laboratório foi realizada de acordo com o descrito na secção 8.2.2. A Figura 9.3 apresenta as curvas granulométricas tanto da argamassa pré-doseada P como de cada uma dos materiais constituintes das argamassas formuladas em laboratório.

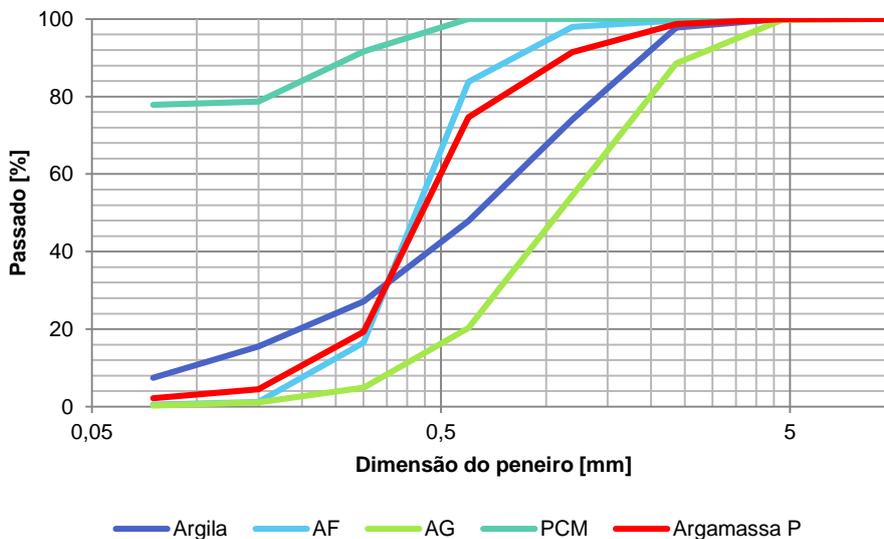


Figura 9.3 – Curvas granulométricas da argamassa pré-doseada P e dos constituintes das argamassas formuladas em laboratório

9.1.3. Reação ao fogo

Para a argamassa pré-doseada de terra, P, foi utilizado o mesmo método descrito na secção 8.2.3. Para a argamassa CS30_FS45_F5, a única das argamassas formuladas em laboratório com adição de fibras, sabe-se que a percentagem de fibras adicionada à mistura foi de 5%.

A argamassa pré-doseada, P, apresenta uma percentagem de 0,5% de fibras enquanto a argamassa misturada em laboratório apresenta uma percentagem de 5%.

9.2. Argamassas no estado fresco

9.2.1. Consistência por espalhamento

A consistência por espalhamento foi determinada como descrito no ponto 8.3.1., tendo sido determinada para cada uma das argamassas. Os resultados são expressos na Figura 9.4. A consistência por espalhamento apresentada pelas argamassas situa-se abaixo do definido pela norma DIN 18947 [NABau, 2013], exceto no caso da argamassa CS30_FS45_F5 que apresenta consistência por espalhamento superior ao definido.

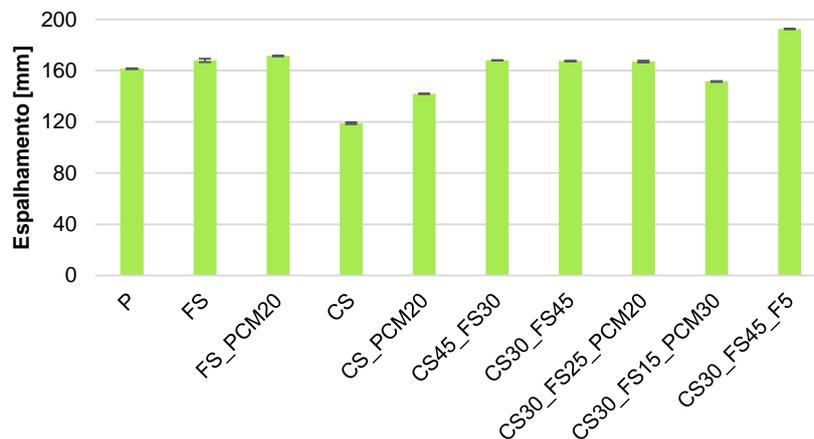


Figura 9.4 – Resultados obtidos no ensaio de consistência por espalhamento

Há que referir que não tendo sido utilizada sempre a mesma quantidade de água nas argamassas (uma vez que se tentou utilizar a quantidade de água necessária para obter boa trabalhabilidade) é expectável que a consistência por espalhamento varie.

9.2.2. Massa volúmica

A massa volúmica no estado fresco das argamassas foi determinada como descrito no ponto 8.3.2. Os resultados do ensaio são expressos em kg/dm^3 e constam da Figura 9.5.

9.2.3. Retração por secagem

Devido a problemas no laboratório não se aferiu a retração nos provetes com 160 mm de comprimento. Aplicou-se o procedimento de ensaio descrito na secção 8.3.7., mas apenas nos provetes circulares de 90 mm de diâmetro e 20 mm de espessura. Os resultados obtidos constam na Figura 9.6.

Logo após o início da secagem dos provetes detetou-se a ocorrência de alguma fissuração em todas as argamassas com PCM, especialmente visível nos provetes de argamassa sobre tijolo e sobre bloco de betão.

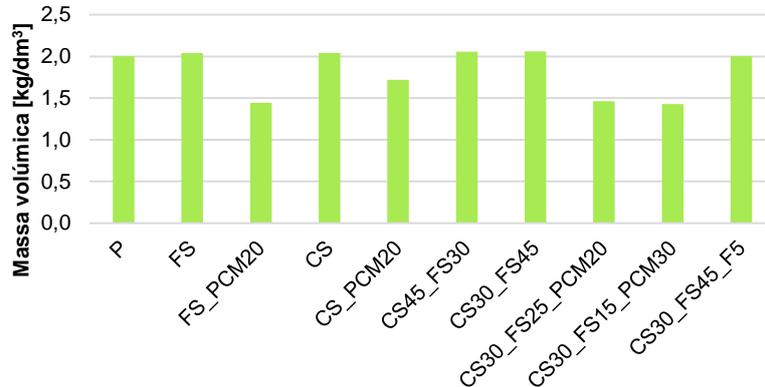


Figura 9.5 – Resultados obtidos de massa volúmica das argamassas

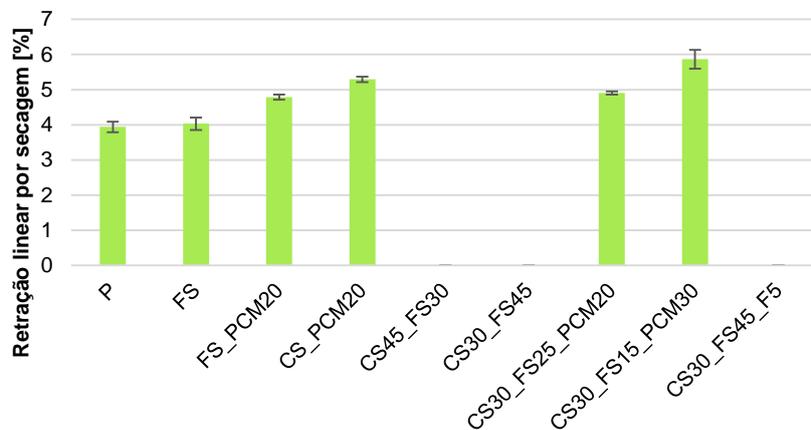


Figura 9.6 – Resultados médios e desvios-padrão de retração diametral por secagem em provetes circulares com 90 mm de diâmetro

9.3. Argamassas no estado endurecido – provetes simples

9.3.1. Massa volúmica aparente

A massa volúmica aparente dos provetes de 40x40x160 [mm] foi determinada como descrito no ponto 8.4.1. Os valores obtidos, expressos em kg/dm^3 , constam da Figura 9.7.

9.3.2. Condutibilidade térmica

O ensaio de condutibilidade térmica foi realizado sobre os provetes de 40x40x160 [mm] e nos provetes circulares de 90 mm de diâmetro e 20 mm de espessura, tendo sido realizado como descrito no ponto 8.4.2.

Os valores de condutibilidade térmica, expressos em $\text{W}/(\text{m.K})$, constam da Figura 9.8, em termos de média e desvio padrão.

Em relação à condutibilidade térmica das argamassas é possível concluir que as argamassas sem a incorporação de PCM apresentam um valor de condutibilidade térmica de aproximadamente $0,9 \text{ W}/(\text{m.K})$ enquanto aquelas que incorporam PCM apresentam valores aproximadamente de $0,5 \text{ W}/(\text{m.K})$.

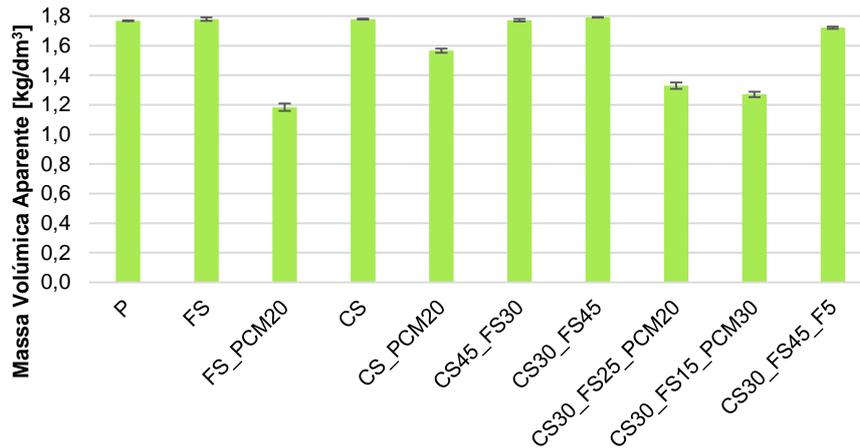


Figura 9.7 – Resultados médios e desvios-padrão da massa volúmica aparente

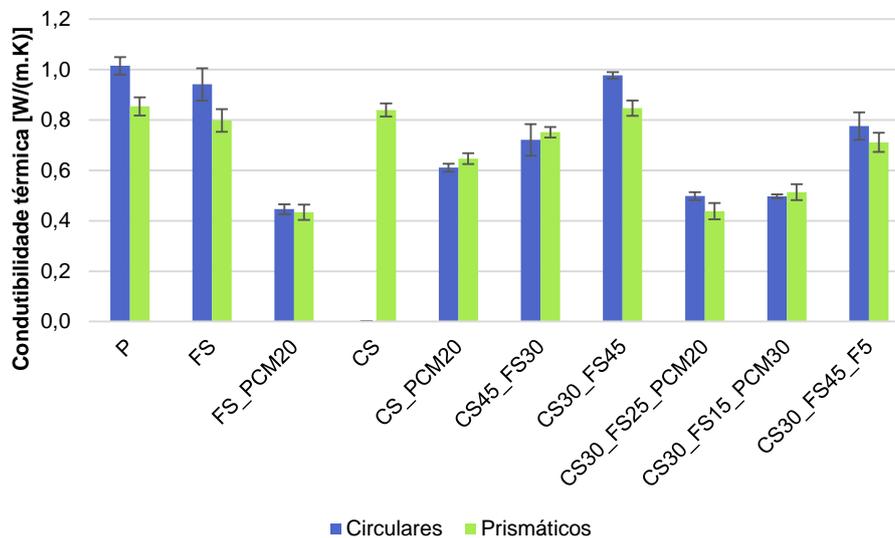


Figura 9.8 – Resultados médios e desvio padrão da condutibilidade térmica aferida nos provetes circulares e prismáticos

9.3.3. Módulo de elasticidade dinâmico

Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico dos provetes de argamassa foi utilizado o procedimento de ensaio descrito no ponto 8.4.3., tendo sido utilizados três provetes de 40x40x160 [mm] para a sua realização. Os resultados obtidos em termos de média e desvio padrão constam no Figura 9.9. Em termos de módulo de elasticidade dinâmico pode ter ocorrido algum problema com o valor registado da argamassa com 30% de PCM e baixa percentagem de areia fina. Sobressai a redução ocorrida nas argamassas com 20% de PCM e areia fina e também com as restantes argamassas com PCM.

O módulo de elasticidade dinâmico diminui com o aumento da quantidade de PCM adicionada às argamassas. No entanto a argamassa com maior quantidade de areia grossa (AG) apresenta menor valor de módulo de elasticidade.

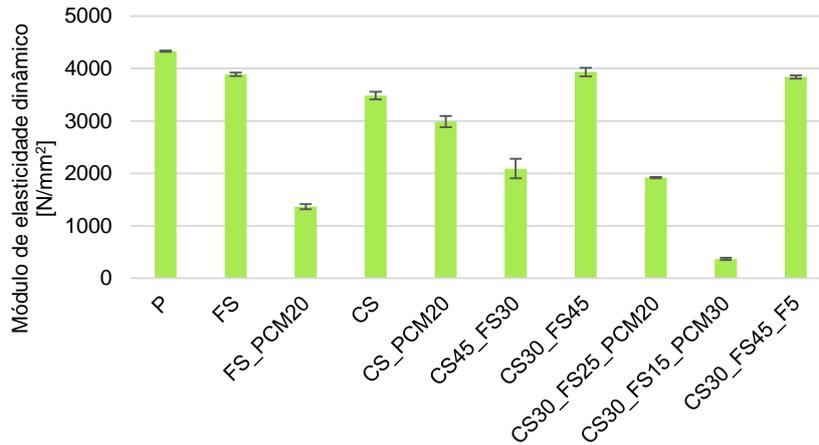


Figura 9.9 – Resultados em termos médios e desvio-padrão do módulo de elasticidade dinâmico

9.3.4. Resistência à tração por flexão

O procedimento de ensaio para a determinação da resistência à tração por flexão é o descrito no ponto 8.4.4., tendo sido utilizados três provetes de 40x40x160 [mm]. Os valores obtidos, em termos de média e desvio padrão neste ensaio podem ser observados no Figura 9.10.

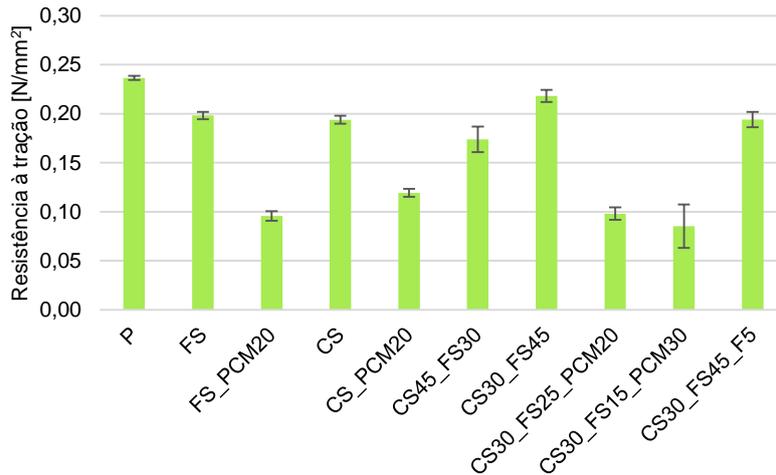


Figura 9.10 – Resultados em termos médios e desvio-padrão de resistência à tração por flexão

Em termos de resistência à tração salienta-se a redução ocorrida nas argamassas com 20% e 30% de PCM.

9.3.5. Resistência à compressão

Para a determinação da resistência à compressão dos provetes de argamassa são utilizadas as partes sobranes dos provetes utilizados no ensaio de resistência à tração por flexão, sendo o procedimento o descrito no ponto 8.4.5. Os valores obtidos, em termos de média e desvio padrão neste ensaio podem ser observados na Figura 9.11.

Em termos de resistência à compressão sobressai a quebra acentuada das argamassas com 20% de PCM e areia fina ou mistura de areias.

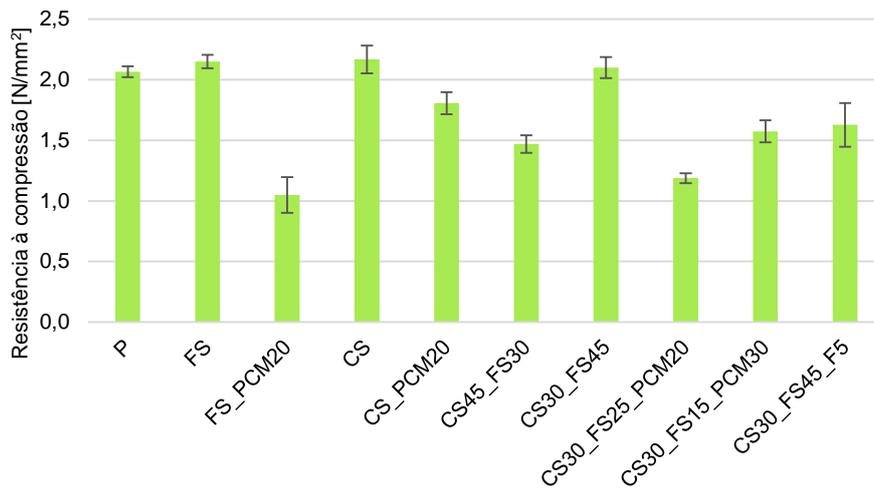


Figura 9.11 – Resultados em termos médios e desvio-padrão de resistência à compressão

9.3.6. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade é realizado com três provetes de 40x40x40 [mm] e o procedimento de ensaio é o descrito no ponto 8.4.6., tendo os provetes sido impermeabilizados lateralmente com resina *epóxi*, uma vez que o estudo realizado com a argamassa da fase experimental inicial P₀ mostrou que este tipo de impermeabilização lateral se apresenta como mais eficiente. A curva média obtida no ensaio de capilaridade, resultante da medição de três provetes de cada argamassa, com impermeabilização lateral através de resina *epóxi* encontra-se na Figura 9.12. Verificam-se genericamente três tipos de comportamento: da argamassa FS_PCM20, com maior coeficiente de capilaridade e tendendo para um valor assintótico (máximo de água absorvida por área de contacto) de aproximadamente 12,5 kg/m², das argamassas FS, tendendo para um valor assintótico de cerca de 10 kg/m², com comportamento intermédio, e das restantes argamassas, com menor coeficiente de capilaridade.

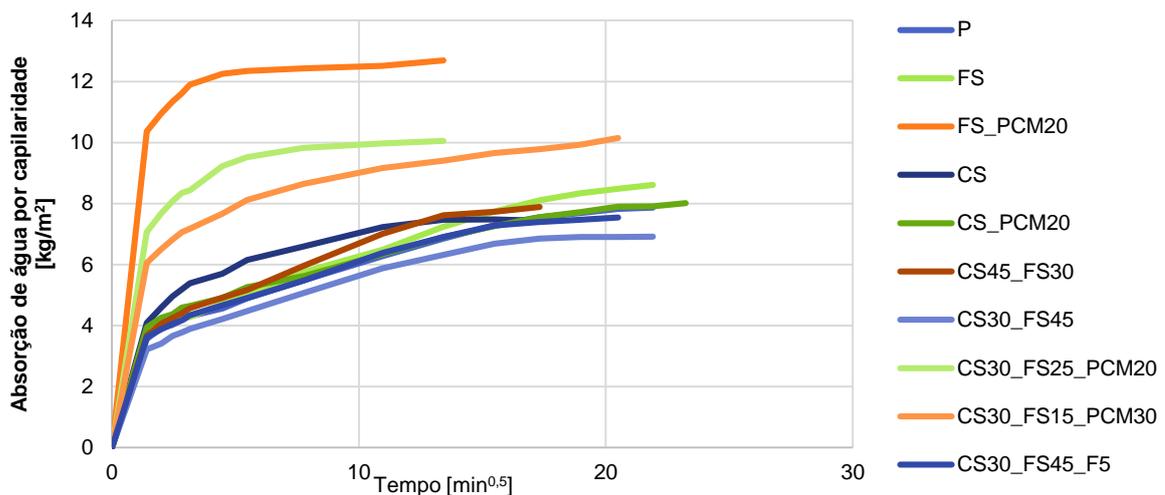


Figura 9.12 – Curvas de capilaridades correspondentes a cada argamassa

9.3.7. Secagem

O ensaio de secagem destas argamassas é realizado logo após finalizado o ensaio de absorção de água por capilaridade, utilizando os mesmos provetes, e o procedimento de ensaio é o descrito no ponto

8.4.7. Tal como aconteceu com a argamassa P₀, também não foi possível deixar os provetes das argamassa formuladas em laboratório saturarem completamente. As curvas médias obtidas no ensaio de secagem, resultantes da medição de três provetes de cada argamassa, encontra-se na Figura 9.13.

Em termos de secagem, a partir das curvas de secagem observa-se um comportamento relativamente semelhante entre as argamassa, todas com muito boa capacidade de secagem.

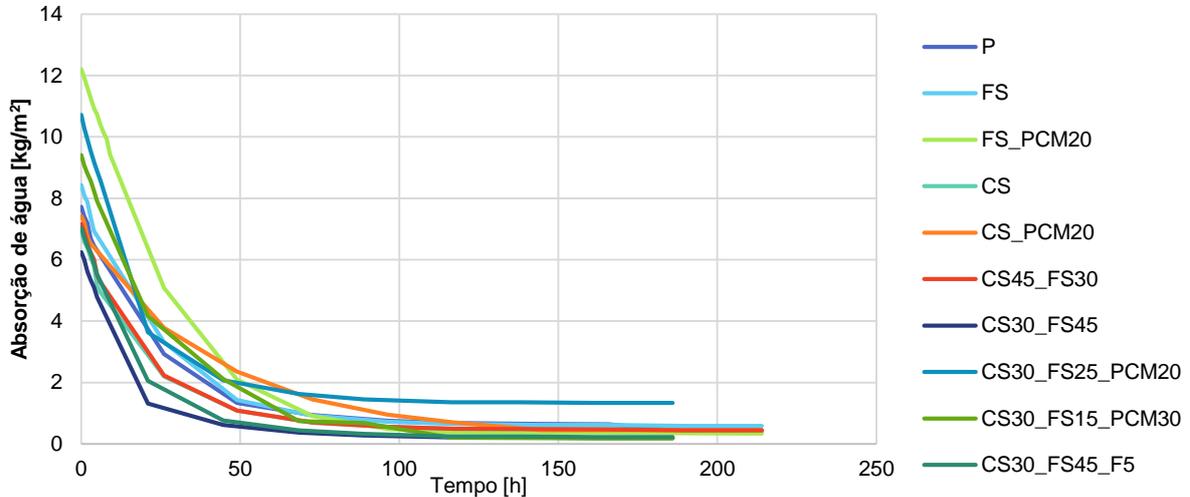


Figura 9.13 – Curvas de secagem correspondentes a cada argamassa

9.3.8. Resistência à difusão do vapor de água

Para o ensaio de resistência à difusão do vapor de água foi utilizado o procedimento de ensaio descrito no ponto 8.4.8. Foram utilizados para este ensaio três provetes circulares de 90 mm de diâmetro e 20 mm de espessura. Os valores obtidos, em termos de média e desvio padrão, de fator de resistência à difusão de vapor de água (μ) e de espessura da camada de difusão de vapor de água equivalente (S_d) constam na Figura 9.14.

Relativamente à permeabilidade ao vapor de água verifica-se que todas as argamassas são muito permeáveis, com variações de μ que apenas sobressaem mais um pouco no caso da argamassa com 30% de PCM.

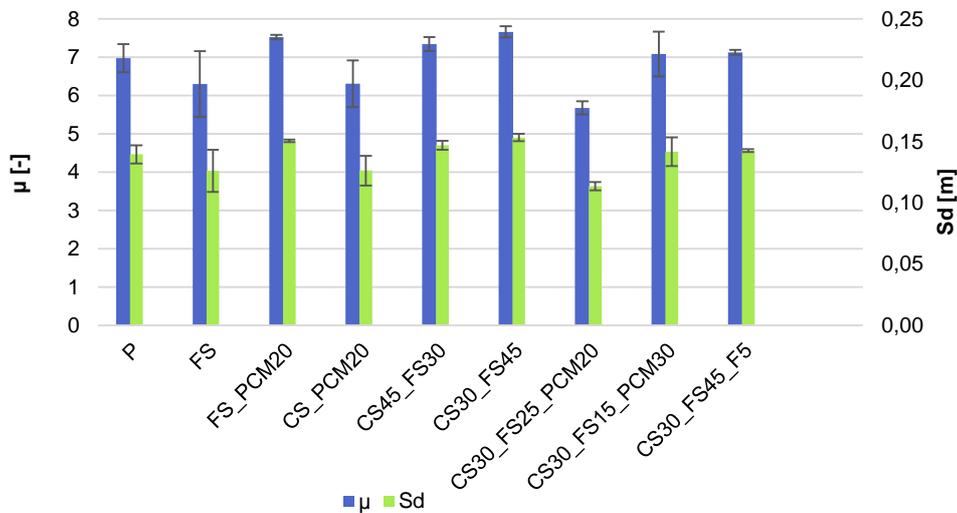


Figura 9.14 – Resultados da difusão do vapor de água das argamassas

9.3.9. Adsorção do vapor de água

Para o ensaio de adsorção do vapor de água foi utilizado o procedimento de ensaio descrito no ponto 8.4.9. Foram utilizados para este ensaio três provetes circulares de 90 mm de diâmetro e 20 mm de espessura. A curva de adsorção dos provetes de cada argamassa pode ser observada na Figura 9.15.

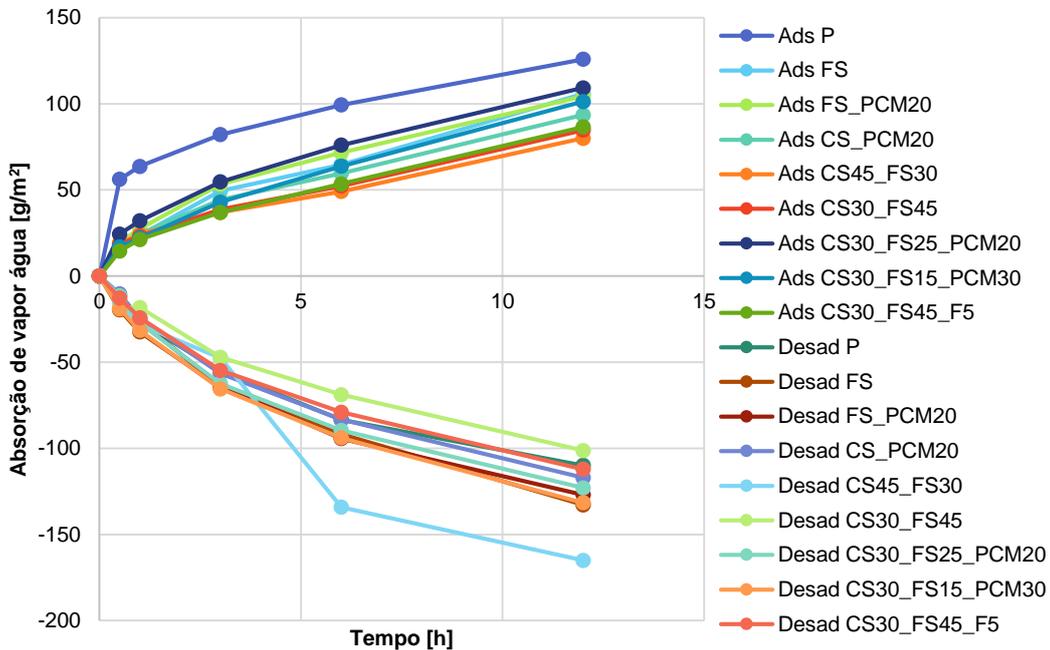


Figura 9.15 – Curvas de adsorção e desadsorção obtidas no ensaio de adsorção de vapor de água

Em termos de adsorção de vapor de água verifica-se que a argamassa pré-doseada P apresenta o maior valor de adsorção de água (aproximadamente 125 g/m^2), enquanto as restantes argamassas apresentam valores entre 75 g/m^2 e 110 g/m^2 .

Relativamente à desadsorção todas as argamassas apresentam valores que rondam os 120 g/m^2 , exceto a argamassa CS45_FS30 que apresenta um valor de desadsorção superior a 150 g/m^2 . Há que referir que a argamassa CS45_FS30 a partir das 3,5 horas apresenta um comportamento irregular quando comparado com as restantes argamassas; este comportamento pode estar relacionado com pequena microfissuração que tenha ocorrido nos provetes da argamassa, sem que esta tenha sido visulizada.

9.4. Argamassa no estado endurecido – provetes sobre o tijolo e bloco de betão

9.4.1. Condutibilidade térmica

O procedimento de ensaio utilizado foi o descrito no ponto 8.5.1. (Figura 9.16). Os valores de condutibilidade térmica, em termos de médios e desvios-padrão, obtidos nos provetes de argamassa sobre o tijolo e sobre os blocos de betão constam na Figura 9.17.

A condutibilidade térmica obtida nas argamassas aplicadas sobre tijolo e sobre bloco de betão é genericamente muito semelhante. Sobressaem deste ponto de vista as argamassas formuladas com PCM e com fibras, comparativamente às restantes. No entanto, o acréscimo que pode ser obtido em termos de resistência térmica é sempre proporcional à espessura com que o reboco seja aplicado e os valores variam consoante o teor de humidade presente no reboco.



Figura 9.16 – Ensaio de condutibilidade térmica sobre os blocos de betão

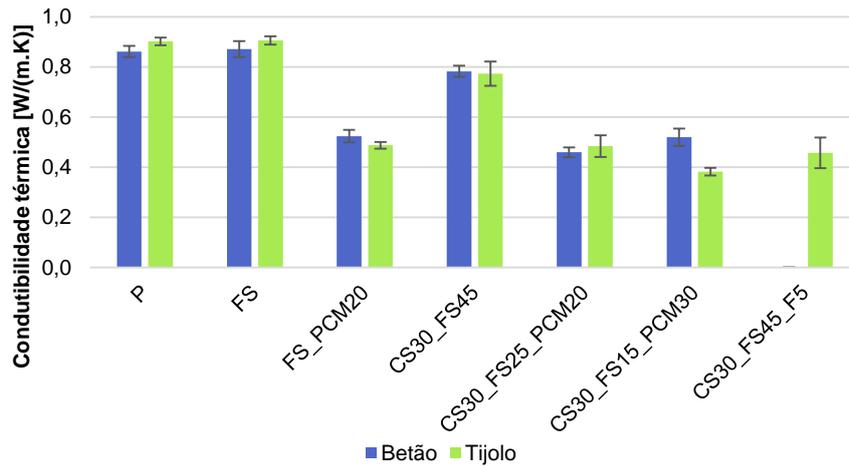


Figura 9.17 – Resultados da condutibilidade térmica da argamassa aplicada em tijolo e bloco de betão

9.4.2. Velocidade de propagação dos ultrassons

O procedimento de ensaio utilizado foi o descrito no ponto 8.5.2. Os valores de velocidade de propagação dos ultrassons em termos médios e de desvios-padrão constam na Figura 9.18.

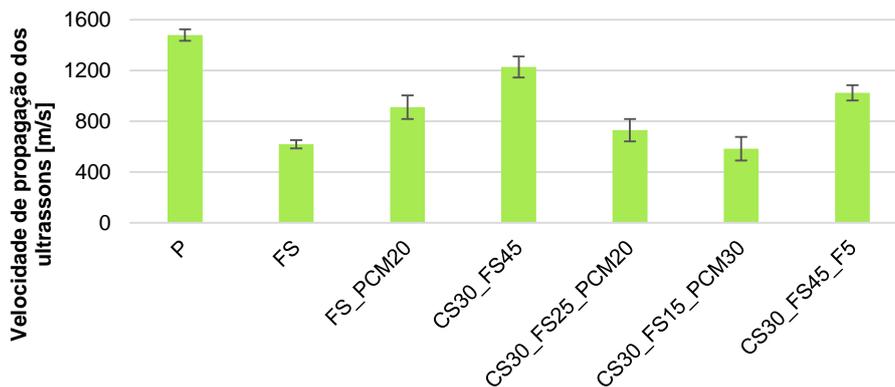


Figura 9.18 – Resultados em termos médios e desvio-padrão da velocidade de propagação dos ultrassons

Verifica-se que a velocidade de propagação dos ultrassons diminui bastante em algumas argamassas comparativamente à argamassa pré-doseada. No entanto, de entre as argamassas formuladas sobressai a de mistura de areias sem e com fibras. De relembrar que nos provetes de argamassas com PCM se visualizou fissuração, que pode justificar os valores respetivos.

9.4.3. Dureza superficial por durómetro

O procedimento de ensaio utilizado foi o descrito no ponto 8.5.3. Os valores obtidos, em termos de média e desvio padrão, no ensaio de dureza superficial por durómetro de Shore A constam na Figura 9.19.

Relativamente à dureza superficial por durómetro observa-se um ligeiro decréscimo, comparativamente à argamassa pré-doseada, das argamassas com PCM e areia fina e com mistura de areias e um pouco maior com PCM e mistura de areias. A argamassa formulada só com areia fina apresenta valor de dureza comparável à argamassa pré-doseada.

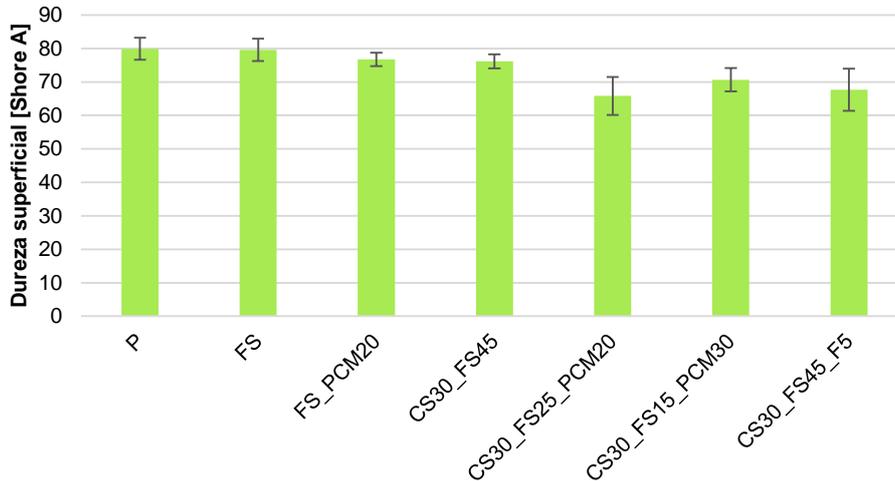


Figura 9.19 – Resultados em termos médios e desvio-padrão da dureza superficial sobre os tijolos

9.4.4. Coesão superficial

O procedimento de ensaio utilizado foi o descrito no ponto 8.5.4. Os valores de perda de massa obtidos, em termos de média e desvio padrão, no ensaio de coesão superficial constam na Figura 9.20.

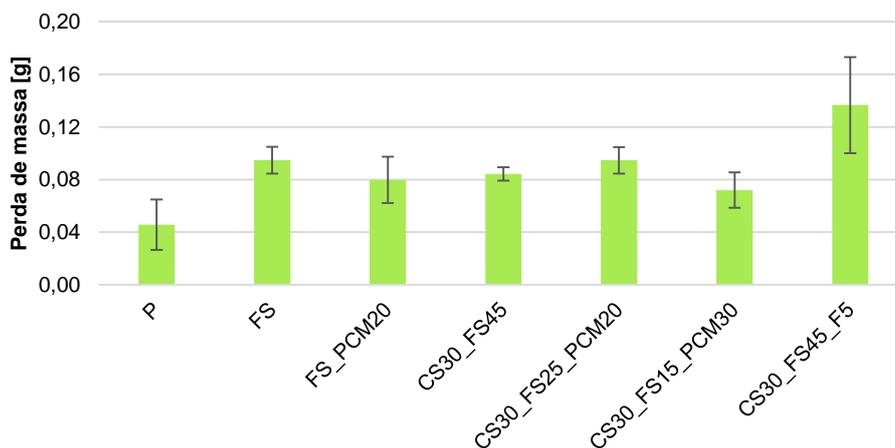


Figura 9.20 – Resultados em termos médios e desvio-padrão da coesão superficial das argamassas sobre tijolo

Em termos de coesão superficial das argamassas aplicadas sobre tijolo constata-se que esta apresenta ser um pouco menor nas argamassas formuladas em laboratório e bastante menor na argamassa com fibras, comparativamente à argamassa pré-doseada. A coesão superficial apresentada nas diferentes argamassas toma valores médios de 0,08 g exceto a argamassa P que tem menor perda por coesão superficial e a argamassa CS30_FS45_F5 que tem maior perda.

9.4.5. Aderência ao suporte

O procedimento de ensaio utilizado foi o descrito no ponto 8.5.5. Apesar de o ensaio ter sido realizado em tijolos com diferentes argamassas só foi possível considerar válido o ensaio em algumas argamassas (Figura 9.21). Segundo a norma EN 1015-12 [CEN, 2000], sempre que a rotura ocorre pela interface pastilha/argamassa o ensaio é considerado inválido.

Os resultados obtidos, em termos de média e desvio padrão, do ensaio de aderência ao suporte sobre os provetes de argamassa sobre tijolo e sobre o bloco de betão constam na Figura 9.22. Sobressaem os elevados desvios-padrão registados na generalidade das argamassas aplicadas sobre os dois tipos de suporte.



Figura 9.21 – Ensaio de aderência ao suporte no provete de argamassa sobre o tijolo (à esq.); Ensaio de aderência ao suporte no provete de argamassa sobre o bloco de betão (à dir.)

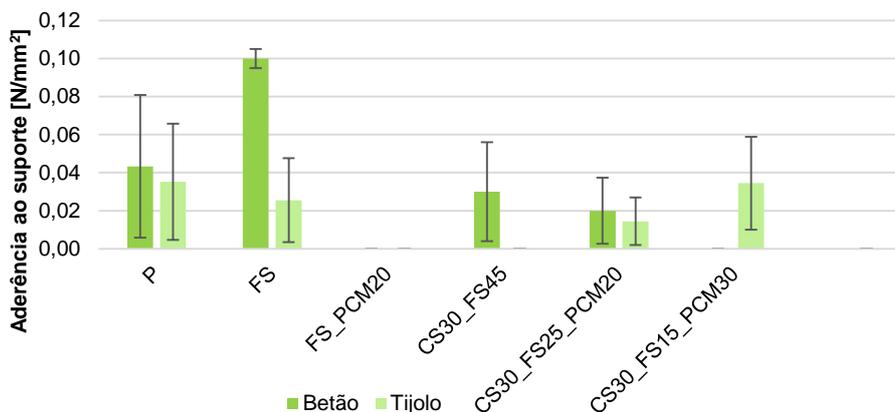


Figura 9.22 – Resultados em termos médios e desvio-padrão da aderência das argamassas ao tijolo e ao bloco de betão

Em termos de aderência verifica-se que os valores obtidos nos diferentes suportes são semelhantes, exceto no caso da argamassa FS que para além de apresentar uma aderência ao suporte sobre o bloco de betão superior ao que é apresentado em todas as outras argamassas, também é muito superior à apresentada em relação ao tijolo. No entanto, face à dispersão de resultados obtidos e à dificuldade na realização do ensaio, justifica-se um estudo mais aprofundado relativamente a esta característica.

9.4.6. Resistência à abrasão

O procedimento de ensaio utilizado foi o descrito no ponto 8.5.6., tendo o ensaio sido realizado em todos os tijolos em que as diferentes argamassas foram aplicadas. Pelo estudo realizado sobre a argamassa pré-doseada de terra da fase experimental inicial, P₀, concluiu-se a escova de dureza média (escova

azul com 65 mm de diâmetro) seria a mais apropriada para a realização deste tipo de ensaio, tendo sido por este motivo a escova utilizada neste ensaio.

O método de pesagem da perda de massa do provete também foi alterado. Em vez de ser pesado o tijolo antes e depois do ensaio e determinada a diferença, foi recolhida a amostra para uma caixa de *Petri* e pesada numa balança com 0,001g de precisão (Figura 9.23). Os valores de resistência à abrasão obtidos em termos de média e desvio-padrão constam na Figura 9.24.

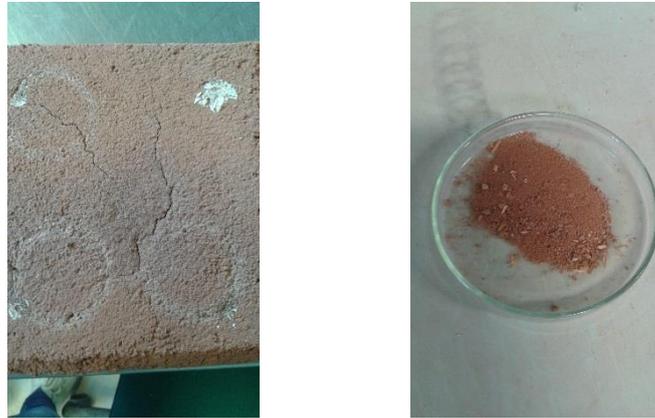


Figura 9.23 – Aspeto do tijolo após o ensaio de resistência à abrasão (à esq.); Material recolhido durante o ensaio de resistência à abrasão (à dir.)

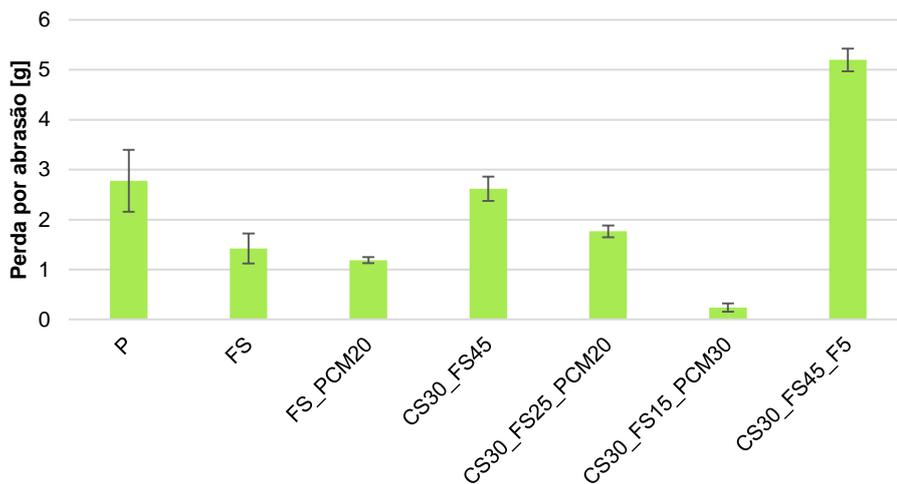


Figura 9.24 – Resultados em termos médios e desvio-padrão da abrasão das argamassas no tijolo

Verifica-se que, em termos de abrasão, ocorrem menos perdas nas argamassas com PCM que nas restantes, incluindo a pré-doseada. Este facto pode ficar a dever-se a: massa original dos provetes e aferição de variação percentual em vez de massa direta de perda; perda de material a recolher para pesagem.

9.4.7. Análise termográfica

De modo a estudar a influência dos PCM nas argamassas de terra foi utilizada uma câmara termográfica ThermoCAM B4 da Flir para medir a temperatura superficial dos provetes de argamassa sobre tijolo.

Os provetes foram colocados a uma temperatura de 5°C durante 48 horas para que a temperatura estabilizasse nos provetes. De seguida foram colocados numa sala a uma temperatura de 30°C. Ao longo

de um dia (aos 0, 81, 135 minutos e 5 horas) foi observada a variação de temperatura dos provetes, sendo captados termogramas, que podem ser observado na Figura 9.25.

Por análise dos termogramas obtidos no decorrer do ensaio observa-se alguma diferenciação de temperaturas entre os provetes com e sem incorporação de PCM (provetes b, d e e).

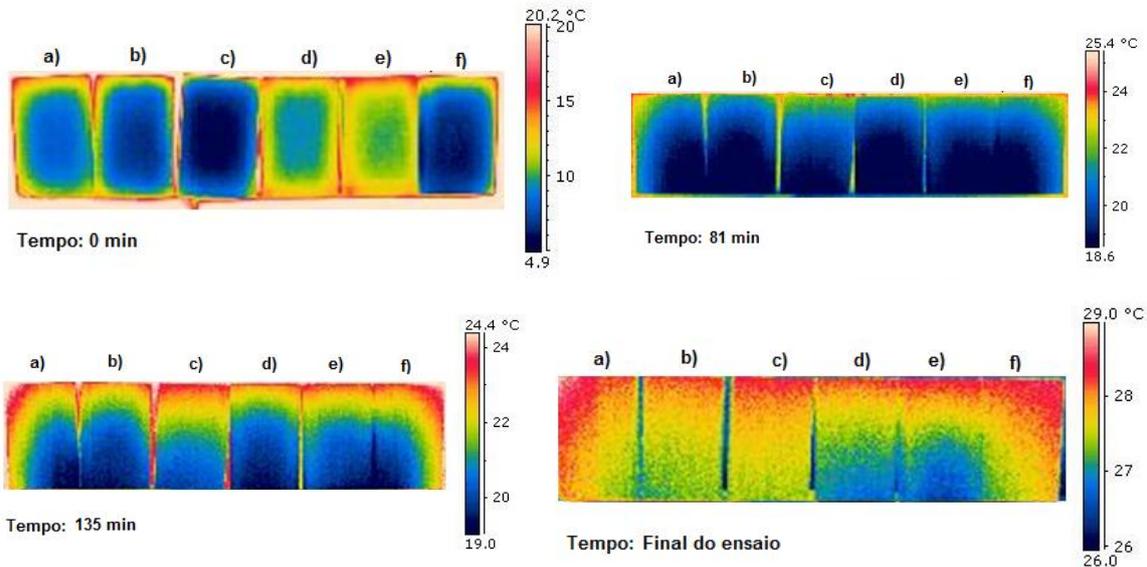


Figura 9.25 – Termogramas obtidos no ensaio de termografia em que: a) P; b)FS_PCM20; c) CS30_FS45; d) CS30_FS25_PCM20; e) CS30_FS15_PCM30; f) CS30_FS45_F5

9.5. Argamassa no estado endurecido – reboco dos muretes

Devido ao facto de não haver suporte nem materiais suficientes para realizar um reboco completo com as diferentes argamassas optou-se por fazer faixas de reboco sobre uma parte do murete de tijolo na face Norte. Por este motivo não foi possível realizar o ensaio de resistência superficial por esclerómetro pendular e de resistência superficial com choque da esfera, por receio de provocar o destaque da faixa de argamassa ao suporte.

9.5.1. Dureza superficial por durómetro

O procedimento de ensaio foi descrito na secção 8.6.1. Os resultados, em termos médios e de desvio-padrão, obtidos no ensaio de dureza superficial por durómetro Shore A sobre as argamassas aplicadas no murete de tijolo constam na Figura 9.26.

Verifica-se que a dureza superficial tem tendência para diminuir com a introdução de PCM e de areia grossa como agregado único. As argamassas com areia fina apresentam dureza comparável à da argamassa pré-doseada.

9.5.2. Velocidade de propagação dos ultrassons

O procedimento de ensaio foi descrito na secção 8.6.3. (Figura 9.27), tendo-se realizado ao longo de alinhamentos verticais. Os resultados do ensaio de propagação de ultrassons nos muretes constam na Figura 9.28.

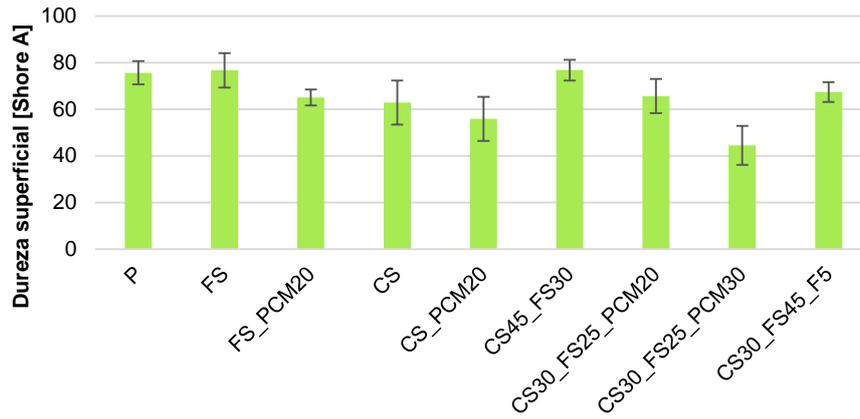


Figura 9.26 – Resultados em termos médios e desvio-padrão da dureza superficial por durómetro dos rebocos no murete de tijolo



Figura 9.27 – Ensaio de velocidade de propagação de ultrassons sobre faixas de rebocos de argamassa no murete de tijolo

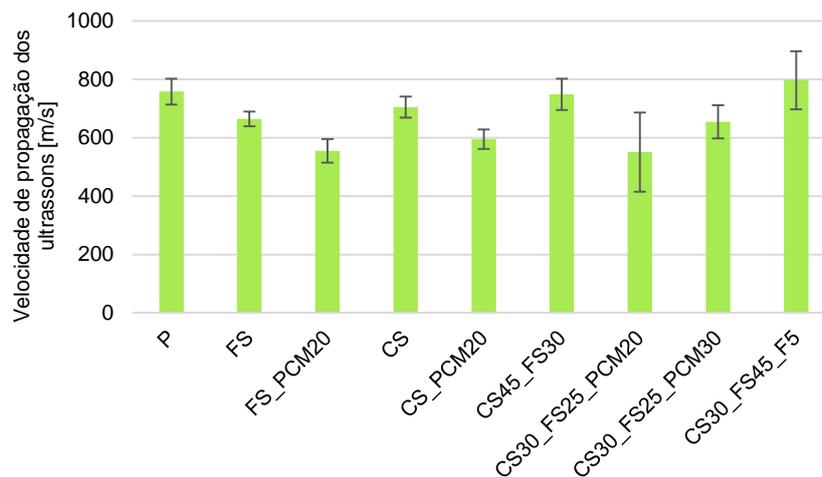


Figura 9.28 – Resultados obtidos no ensaio de velocidade de propagação dos ultrassons

Verifica-se que a velocidade de propagação dos ultrassons diminui com a introdução de 20% de PCM em substituição do agregado e praticamente se mantem com a introdução de fibras em substituição de igual volume de areia ou com variações entre areia fina e grossa, comparativamente à argamassa pré-doseada.

9.6. Síntese dos resultados das argamassas formuladas em laboratório

Um dos objetivos deste capítulo passava pela caracterização de várias argamassas, em que se fez variar as dimensões da areia e se adicionam fibras e material de mudança de fase, através dos procedimentos de ensaio analisados e definidos no capítulo anterior. Passava ainda por compará-las com uma argamassa pré-doseada formulada industrialmente com o mesmo tipo de terra argilosa, areia fina e fibras.

No Quadro 9.3 apresentam-se os valores obtidos nos ensaios realizados à argamassa no estado fresco, em termos de consistência por espalhamento e massa volúmica.

Quadro 9.3 – Resultados obtidos nos ensaios de caracterização no estado fresco

| Argamassa | Consistência por espalhamento [mm] | Massa volúmica [kg/dm ³] |
|-----------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| P | 161,5±0,71 | 2,00 |
| FS | 168±2,83 | 2,04 |
| FS_PCM20 | 171,5±0,71 | 1,44 |
| CS | 119±1,41 | 2,04 |
| CS_PCM20 | 142±0,00 | 1,72 |
| CS45_FS30 | 168±0,00 | 2,06 |
| CS30_FS45 | 167,5±0,71 | 2,06 |
| CS30_FS25_PCM20 | 167±1,41 | 1,46 |
| CS30_FS15_PCM30 | 151,5±0,71 | 1,43 |
| CS30_FS45_F5 | 192,5±0,71 | 2,00 |

As argamassas FS_PCM20 e CS30_FS45_F5 são as únicas argamassas que cumprem a consistência por espalhamento definida na norma DIN 18947 [NABau, 2013], mas por outro lado todas as argamassas cumprem a massa volúmica definida pela mesma norma. É importante salientar que existe uma variação do teor de água entre as argamassas pelo que a consistência por espalhamento não é comparável entre argamassas.

O Quadro 9.4 resume todos os resultados obtidos nos ensaios realizados à argamassa no estado endurecido.

As argamassas P, FS, CS, CS45_FS30, CS30_FS45 e CS30_FS45_F5 podem ser classificadas, segundo a norma DIN 18947 [NABau, 2013], como sendo de classe 1,8 uma vez que apresentam valores de massa volúmica aparente entre 1,61 e 1,80 kg/dm³. A argamassa CS_PCM20 deve ser classificada como sendo de classe 1,6 (valores entre 1,41 e 1,60 kg/dm³), as argamassas CS30_FS25_PCM20 e CS30_FS15_PCM30 classificadas como de classe 1,4 (valores entre 1,21 e 1,40 kg/dm³) e a argamassa FS_PCM20 como de classe 1,2 (entre 1,01 e 1,20 kg/dm³).

Em termos de resistências mecânicas nenhuma das argamassas pode ser classificada pois nenhuma delas cumpre os valores mínimos de resistência à tração por flexão e aderência ao suporte estipulados pela norma DIN 18947 [NABau, 2013], ou seja, não inferior a 0,3 N/mm² e não inferior a 0,05 N/mm², respetivamente.

No que diz respeito à resistência à abrasão as argamassas FS e FS_PCM20 podem ser classificadas, segundo a norma DIN 18947 [NABau, 2013] como de classe SI, apresentando valores inferiores a 1,5 g, e a argamassa CS30_FS15_PCM30 classificada como de classe SII, apresentando valores inferiores a 0,7 g. As restantes argamassas não podem ser classificadas segundo esta norma alemã uma vez que apresentam valores de perda de massa superiores aos estabelecidos pela norma.

Os valores de fator e resistência à difusão de vapor de água apresentados pelas diferentes argamassas estão dentro da gama estabelecida pela norma alemã [NABau, 2013].

Os valores de resistência superficial por durómetro Shore A são semelhantes quando o ensaio é realizado em laboratório e *in situ*. O mesmo acontece em quase todas as argamassas no ensaio de velocidade de propagação de ultrassons.

Quadro 9.4 - Resultados médios e desvios-padrão obtidos nos ensaios realizados às argamassas com os diferentes provetes

| Ensaio | Unid. | P | FS | FS_PCM20 | CS | CS_PCM20 | CS45_FS30 | CS30_FS45 | CS30_FS25_PCM20 | CS30_FS15_PCM30 | CS30_FS45_F5 | |
|------------------------------|-----------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|-----------------|--------------|-----------|
| Retração | % | 3,94±0,29 | 4,03±0,36 | 4,79±0,15 | - | 5,29±0,15 | 0,00±0,00 | 0,00±0,00 | 4,91±0,09 | 5,86±0,54 | 0,00±0,00 | |
| MV_{aparente} | [kg/dm ³] | 1,77±0,00 | 1,78±0,02 | 1,18±0,05 | 1,78±0,01 | 1,57±0,03 | 1,77±0,02 | 1,79±0,00 | 1,33±0,04 | 1,27±0,04 | 1,72±0,02 | |
| λ | ∅ 90mm e 20mm esp | [W/(m.K)] | 1,0±0,1 | 0,9±0,1 | 0,4±0,0 | - | 0,6±0,0 | 0,7±0,1 | 1,0±0,0 | 0,5±0,0 | 0,5±0,0 | 0,8±0,1 |
| | S.Tijolo | | 0,9±0,0 | 0,9±0,0 | 0,5±0,0 | - | - | - | 0,8±0,1 | 0,5±0,1 | 0,4±0,0 | 0,5±0,1 |
| | Prisma | | 0,9±0,1 | 0,8±0,1 | 0,4±0,1 | 0,8±0,1 | 0,6±0,0 | 0,8±0,0 | 0,8±0,1 | 0,4±0,1 | 0,5±0,1 | 0,7±0,1 |
| | S.Betão | | 0,9±0,0 | 0,9±0,1 | 0,5±0,0 | - | - | - | 0,8±0,0 | 0,5±0,0 | 0,5±0,1 | - |
| Ed | [N/mm ²] | 4331±25 | 3889±65 | 1366±91 | 3486±145 | 2989±210 | 2093±367 | 3933±161 | 1920±28 | 370±48 | 3838±57 | |
| Rt | [N/mm ²] | 0,24±0,00 | 0,20±0,01 | 0,10±0,01 | 0,19±0,01 | 0,12±0,01 | 0,17±0,03 | 0,22±0,01 | 0,10±0,01 | 0,09±0,04 | 0,19±0,01 | |
| Rc | [N/mm ²] | 2,07±0,09 | 2,15±0,11 | 1,05±0,29 | 2,17±0,23 | 1,81±0,18 | 1,47±0,14 | 2,10±0,17 | 1,19±0,08 | 1,57±0,18 | 1,63±0,36 | |
| Ad. | S.Tijolo | [N/mm ²] | 0,04±0,06 | 0,03±0,04 | 0 | - | - | - | 0 | 0,01±0,03 | 0,03±0,05 | 0 |
| | S.Betão | | 0,04±0,08 | 0,10±0,01 | 0 | - | - | - | 0,03±0,05 | 0,02±0,03 | 0 | - |
| Ab | [g] | 2,8±1,2 | 1,4±0,6 | 1,2±0,1 | - | - | - | 2,6±0,5 | 1,8±0,2 | 0,2±0,2 | 5,2±0,5 | |
| C_{sup} | [g] | 0,05±0,04 | 0,09±0,02 | 0,08±0,04 | - | - | - | 0,08±0,01 | 0,09±0,02 | 0,07±0,03 | 0,14±0,07 | |
| R_{dva} | μ | [-] | 7,00±0,74 | 6,30±1,72 | 7,50±0,11 | - | 6,30±1,21 | 7,30±0,37 | 7,70±0,30 | 5,70±0,33 | 7,10±1,17 | 7,10±0,13 |
| | Sd | [m] | 0,10±0,01 | 0,10±0,03 | 0,20±0,00 | - | 0,10±0,02 | 0,10±0,01 | 0,20±0,01 | 0,10±0,01 | 0,10±0,02 | 0,10±0,00 |
| Cap. | CC | [kg/(m ² .min ^{0,5})] | 0,41±0,06 | 0,31±0,02 | 0,86±0,71 | 0,74±0,15 | 0,41±0,04 | 0,50±0,04 | 0,40±0,04 | 0,91±0,12 | 0,65±0,39 | 0,40±0,02 |
| Sec. | TS | [kg/(m ² .h)] | 0,18±0,02 | 0,19±0,01 | 0,27±0,01 | 0,17±0,00 | 0,13±0,01 | 0,18±0,00 | 0,23±0,04 | 0,33±0,01 | 0,25±0,07 | 0,23±0,01 |
| | IS | [-] | 0,23±0,02 | 0,23±0,01 | 0,21±0,00 | 0,20±0,01 | 0,30±0,01 | 0,20±0,00 | 0,15±0,03 | 0,23±0,14 | 0,22±0,01 | 0,17±0,01 |
| DS_{dur} | S.Tijolo | [Shore A] | 80±7 | 80±7 | 77±4 | - | - | - | 76±4 | 66±11 | 71±7 | 68±13 |
| | S.Mu- rete | | 76±10 | 77±15 | 65±7 | 63±19 | 56±19 | 77±9 | - | 66±15 | 45±17 | 67±9 |
| U_{us} | S.Tijolo | [m/s] | 1478±90 | 617±65 | 910±185 | - | - | - | 1228±167 | 729±175 | 583±185 | 1022±120 |
| | S.Mu- rete | | 758±88 | 664±50 | 555±80 | 704±72 | 595±67 | 748±107 | - | 551±271 | 654±115 | 797±199 |

Como já foi referido, o ensaio de coesão superficial é realizado com o auxílio de uma fita adesiva retangular enquanto a medição com durómetro é realizada apenas através de um pequeno ponto. A área de contacto com a superfície pode influenciar os resultados obtidos, uma vez que o ensaio de coesão superficial pode apanhar grãos de argamassa presentes no provete ao contrário do durómetro.

Os resultados obtidos no ensaio de adsorção e desadsorção constam no Quadro 9.5. Pela observação dos valores obtidos é possível concluir que todas as argamassas pertencem à classe de adsorção WSIII.

Quadro 9.5 – Resultados em termos médios e desvio-padrão de adsorção e desadsorção do vapor de água dos protótipos de argamassa

| Adsorção do vapor de água [g/m ²] | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|----------|----------|-----------|-----------|-----------------|-----------------|--------------|
| Tempo [h] | P | FS | FS_PCM20 | CS_PCM20 | CS45_FS30 | CS30_FS45 | CS30_FS25_PCM20 | CS30_FS15_PCM30 | CS30_FS45_F5 |
| 0,5 | 56,1 | 18,6 | 19,6 | 17,3 | 18,8 | 18,4 | 24,4 | 17,0 | 14,6 |
| 1 | 63,7 | 23,6 | 27,3 | 24,4 | 24,2 | 23,0 | 32,0 | 22,1 | 21,2 |
| 3 | 82,1 | 49,3 | 53,3 | 44,2 | 36,9 | 38,6 | 54,6 | 42,9 | 36,9 |
| 6 | 99,4 | 64,7 | 71,6 | 59,7 | 49,1 | 52,3 | 76,0 | 63,7 | 53,5 |
| 12 | 125,9 | 105,7 | 104,2 | 93,5 | 79,9 | 84,7 | 109,3 | 101,3 | 86,6 |
| Desadsorção do vapor de água [g/m ²] | | | | | | | | | |
| | P | FS | FS_PCM20 | CS_PCM20 | CS45_FS30 | CS30_FS45 | CS30_FS25_PCM20 | CS30_FS15_PCM30 | CS30_FS45_F5 |
| 0,5 | -11,7 | -19,7 | -14,6 | -10,4 | -15,4 | -18,3 | -11,5 | -19,0 | -12,8 |
| 1 | -26,8 | -32,4 | -26,2 | -24,5 | -28,2 | -18,3 | -27,3 | -31,5 | -24,2 |
| 3 | -55,0 | -64,7 | -63,8 | -56,6 | -47,4 | -47,2 | -62,5 | -65,5 | -54,8 |
| 6 | -83,4 | -91,8 | -94,3 | -83,3 | -134,2 | -68,8 | -89,6 | -94,0 | -79,0 |
| 12 | -109,9 | -132,8 | -127,0 | -117,1 | -165,0 | -101,3 | -122,9 | -131,5 | -112,1 |

10. DISCUSSÃO E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Após realizada toda a campanha experimental e de analisados individualmente, por ensaio, os resultados obtidos, é possível relacionar os resultados dos vários ensaios que caracterizam as argamassas de terra, mas também analisá-los comparativamente a outras argamassas, mais convencionais, de modo a poder retirar algumas conclusões.

10.1. Matéria-prima e estado fresco

Tal como referido na secção 9.1.3., a argamassa com incorporação de 5% de fibras vegetais não pode ser classificada como sendo não inflamável.

Em termos de argamassa no estado fresco, através da observação da Figura 10.1 é possível concluir que todas as argamassas de terra analisadas apresentam massa volúmica superior ao definido pela norma DIN 18947 [NABau, 2013]; no entanto nem todas as argamassas cumprem o definido pela norma para a consistência por espalhamento.

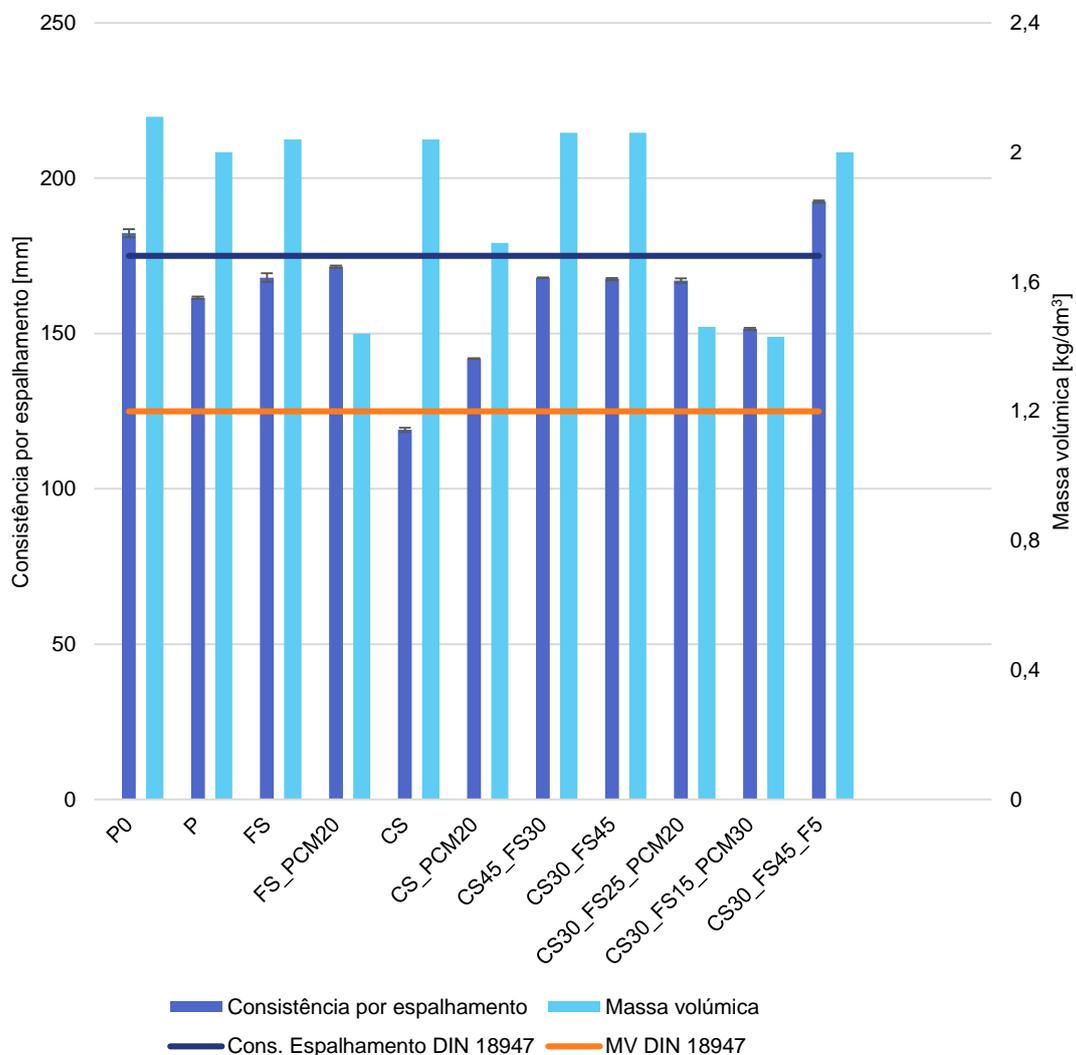


Figura 10.1 – Consistência por espalhamento e massa volúmica das argamassas e limites definidos pela norma DIN 18947 [NABau, 2013]

Uma justificação para isto pode ser o facto da mesa de espalhamento utilizada não estar de acordo com a última revisão da norma EN 1015-3 [CEN, 1999b]. Há que referir que não foi utilizado o mesmo teor de água em todas as argamassas (Figura 10.2), pelo que é expetável que ocorram variações na consistência por espalhamento, não podendo as argamassas ser comparadas ao nível desta propriedade.

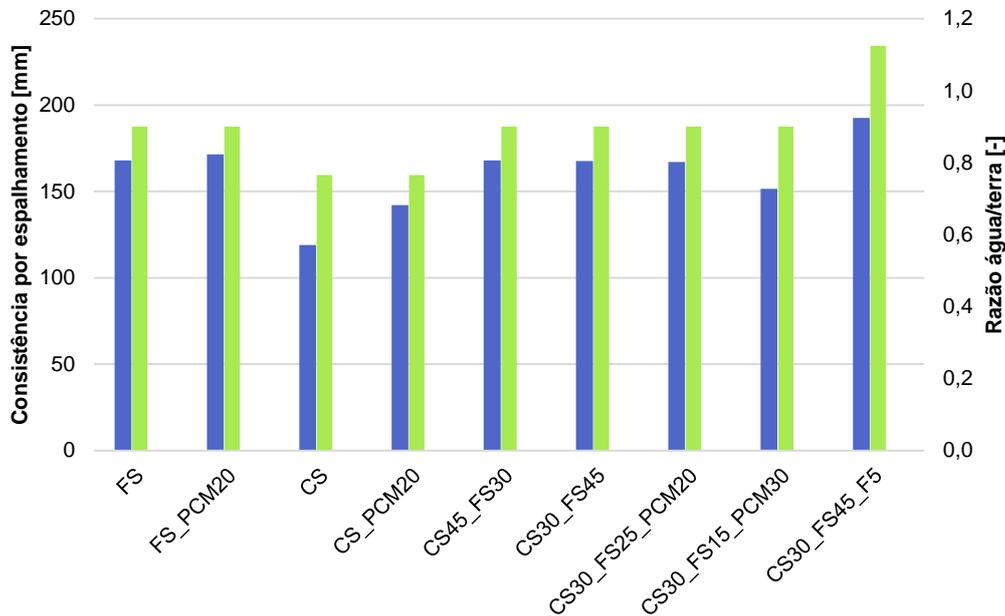


Figura 10.2 – Consistência por espalhamento e razão água/terra das diferentes argamassas formuladas em laboratório

Segundo Röhlen & Ziegert (2011) as argamassas reboco de terra podem apresentar um valor de retração até 2,5%. Por outro lado a norma DIN 18947 [NABau, 2013], tal como referido anteriormente, define que a retração linear por secagem de rebocos de argamassa de terra pode chegar no máximo aos 3%. Todos os provetes de argamassa P_0 apresentaram valores de retração linear inferiores a 3%. Tal como referido anteriormente, devido a problemas no laboratório não foi possível medir a retração linear nos provetes prismáticos das argamassas formuladas em laboratório. No entanto, constatou-se visualmente que a retração nos provetes prismáticos era muito menor que a aferida nos provetes circulares. Assim, para que fosse possível quantificar a retração destas argamassas, foi medida a retração diametral nos provetes circulares na argamassa P_0 e em todas as argamassas formuladas em laboratório de modo a ser possível realizar comparações de resultados. Os resultados da retração nos provetes circulares das argamassas formuladas em laboratório constam na Figura 9.6 tendo a argamassa P_0 apresentado um valor de retração nestes provetes de, aproximadamente, 1,71%. No entanto, considera-se que não é viável comparar estes valores medidos com os limites da norma DIN 18947 [NABau, 2013], uma vez que a medição da retração neste tipo de provetes não é eficiente para o fim em vista.

10.2. Estado endurecido

Pode concluir-se que todas as argamassas sem incorporação de PCM apresentam massas volúmicas superiores, pertencendo todas elas à classe 1,8 (Figura 10.3). Todas as argamassas com adição de PCM apresentam massas volúmicas inferiores. Através dos valores de massa volúmica apresentados pelas argamassas sem incorporação de PCM é possível concluir que estas apresentam valores semelhantes aos

obtidos noutras argamassas de terra, pois apresentam valores entre 1,4 e 1,8 kg/dm³ [Röhlen & Ziegert, 2011].

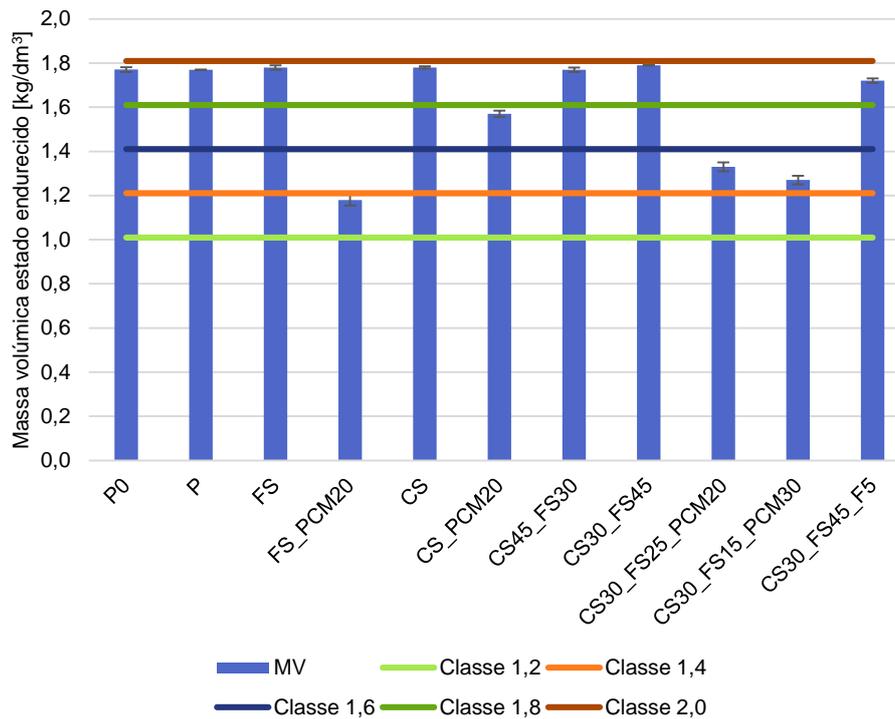


Figura 10.3 – Massa volúmica das argamassas no estado endurecido e limites inferiores das classes de massa volúmica definidas pela norma DIN 18947 [NABau, 2013]

Da observação da Figura 10.4 é possível concluir que as argamassas com incorporação de PCM apresentam valores de condutibilidade térmica mais reduzidos.

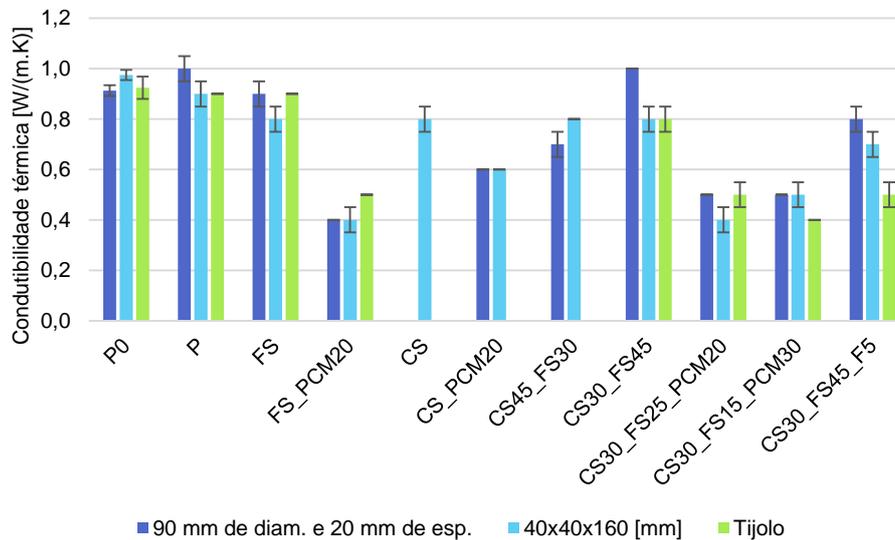


Figura 10.4 – Condutibilidade térmica das diferentes argamassas em diferentes provetes

As argamassas analisadas na presente dissertação apresentam valores próximos de 0,9 W/(m.K) que se aproximam de 0,80 W/(m.K), valor definido pelo ITE 50 [Pina dos Santos et al., 2006] para argamassas de rebocos de cal e areia com massa volúmica de 1,60 kg/dm³.

Quando relacionada a condutibilidade térmica dos provetes de argamassa com a sua massa volúmica aparente é possível obter uma tendência entre o comportamento de uma característica face à outra (Figura 10.5).

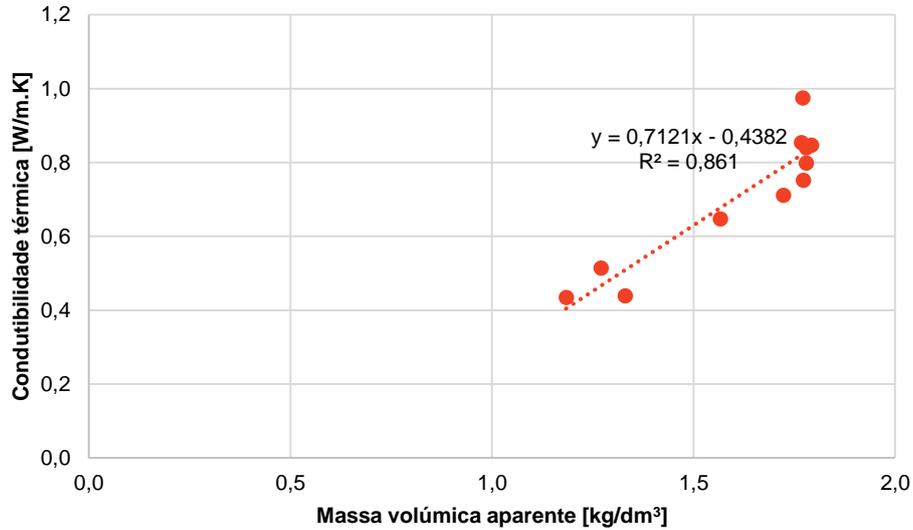


Figura 10.5 – Relação entre a massa volúmica aparente e a condutibilidade térmica das argamassas de terra

A Figura 10.6 apresenta as resistências mecânicas e o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas analisadas.

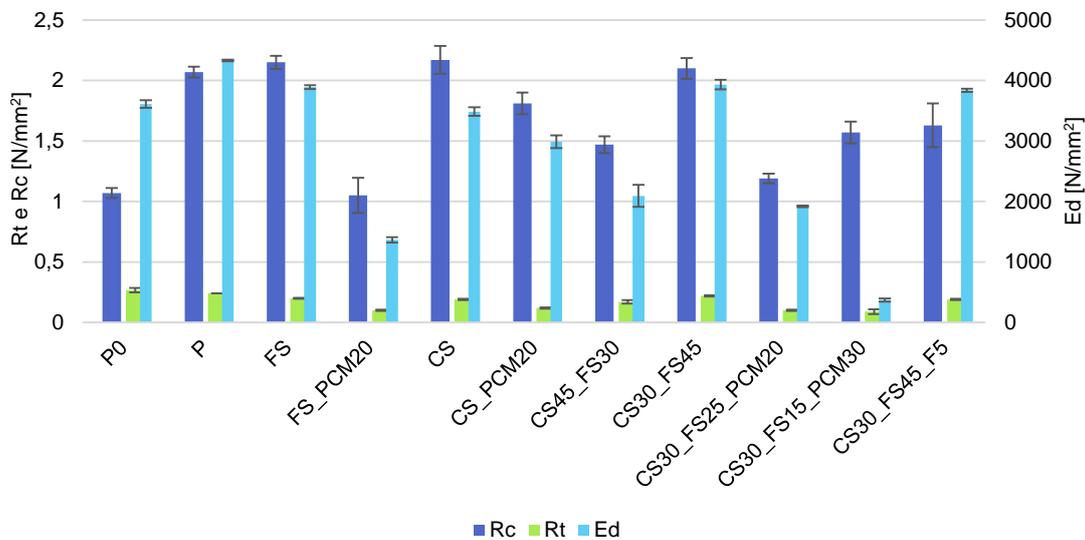


Figura 10.6 – Resistências mecânicas das diferentes argamassas

No com que se refere à resistência à compressão, as argamassas de terra estudadas podem ser classificadas segundo a norma NP EN 998-1 [IPQ, 2010] como sendo de classe CSI, uma vez que apresenta valores entre 0,4 e 2,5 N/mm².

Segundo Röhlen & Ziegert (2011) o valor de resistência à compressão habitual para argamassas de terra encontra-se entre 1 e 3 N/mm², sendo assim possível concluir que as argamassas em estudo apresentam valores semelhantes. No que toca ao módulo de elasticidade dinâmico, os mesmos autores definem que este se situa habitualmente entre 450 e 3000 N/mm² pelo que é possível concluir que apenas a argamassa CS30_FS15_PCM30 não se encontra nestas condições.

As resistências mecânicas podem relacionar-se com a condutibilidade térmica, massa volúmica e módulo de elasticidade dinâmico.

A Figura 10.7 mostra que existe uma tendência bastante aproximada entre o aumento da condutibilidade térmica e o aumento da resistência à tração, ao contrário do que acontece na relação entre a condutibilidade térmica e a resistência à compressão, uma vez que a tendência apresenta um erro um pouco superior.

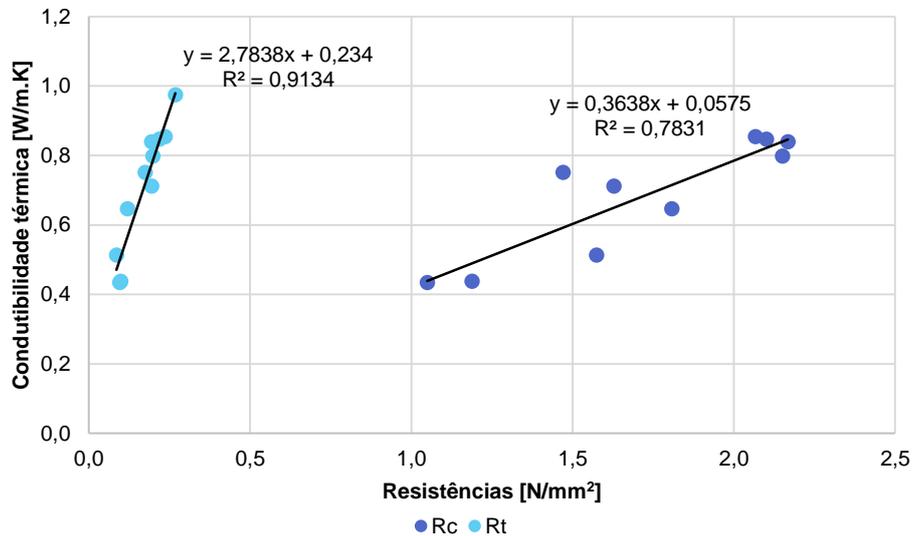


Figura 10.7 – Relação entre a condutibilidade térmica e as resistências à compressão e à tração das argamassas de terra

Da relação entre a massa volúmica aparente e as resistências mecânicas das argamassas é possível concluir, através da observação da Figura 10.8 e Figura 10.9, que existe uma relação mais aproximada entre o aumento da massa volúmica aparente e a resistência à tração, ao contrário do que acontece com a relação entre a massa volúmica aparente e a resistência à compressão. A relação entre a resistência à tração e à compressão e o módulo de elasticidade dinâmico apresentam tendência muito aproximadas (Figura 10.10 e Figura 10.11).

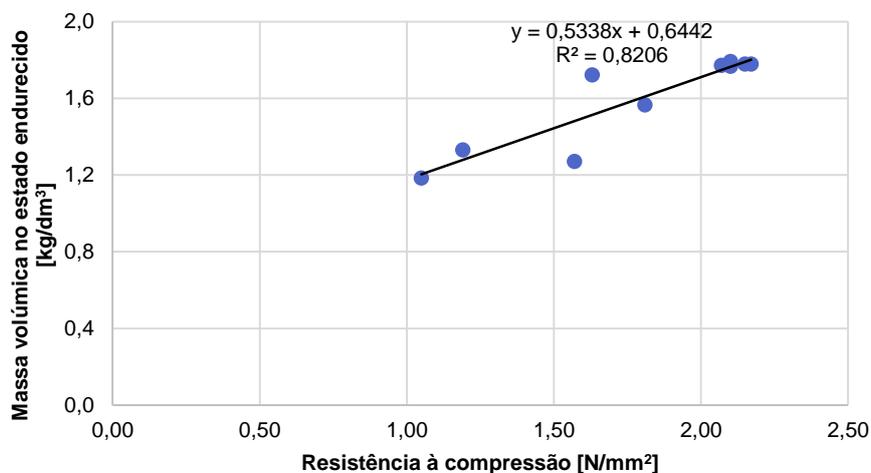


Figura 10.8 – Relação entre a massa volúmica aparente e a resistência à compressão das argamassas

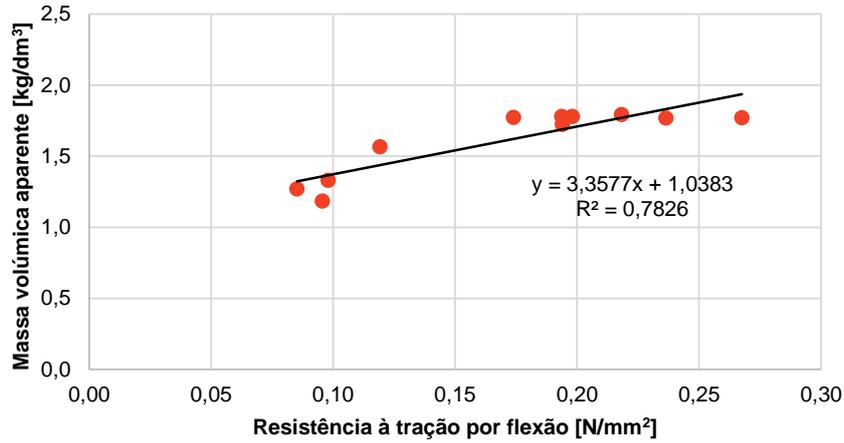


Figura 10.9 – Relação entre a massa volúmica aparente e a resistência à tração por flexão das argamassas de terra

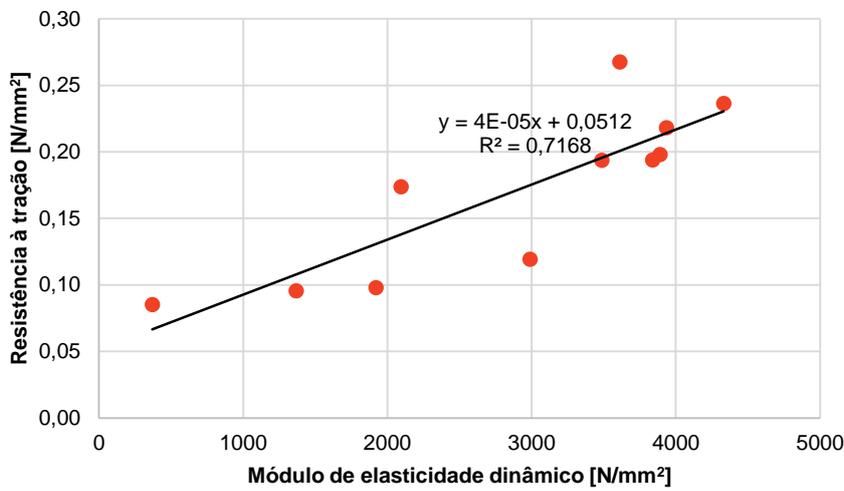


Figura 10.10 – Relação entre a resistência à tração e o módulo de elasticidade dinâmico

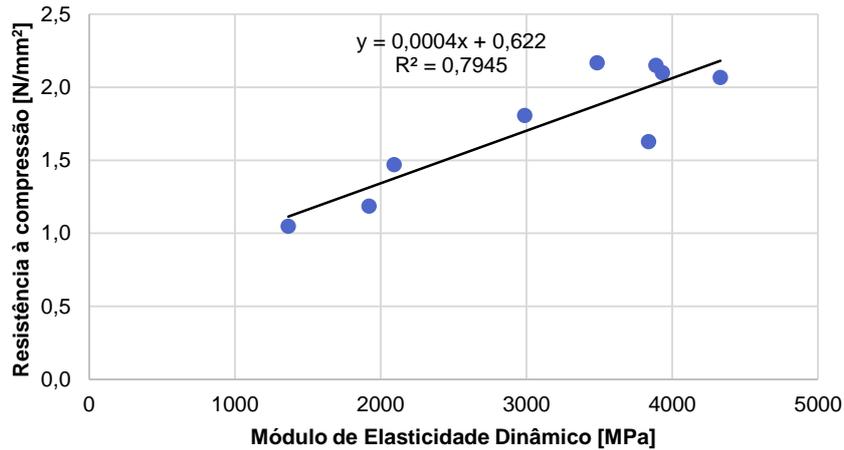


Figura 10.11 – Relação entre a resistência à compressão e ao módulo de elasticidade dinâmico

Da análise dos resultados obtidos no ensaio de aderência ao suporte (Figura 10.12) é possível observar que todas as argamassas, exceto a argamassa P₀, apresentam valores inferiores aos definidos pela norma DIN 18947 [NABau, 2013]. Com muitas das argamassas não foi possível obter amostras viáveis

(rotura ao efetuar o corte ou rotura pela superfície de colagem), sendo por isso possível concluir que não apresentam boa aderência ao suporte.

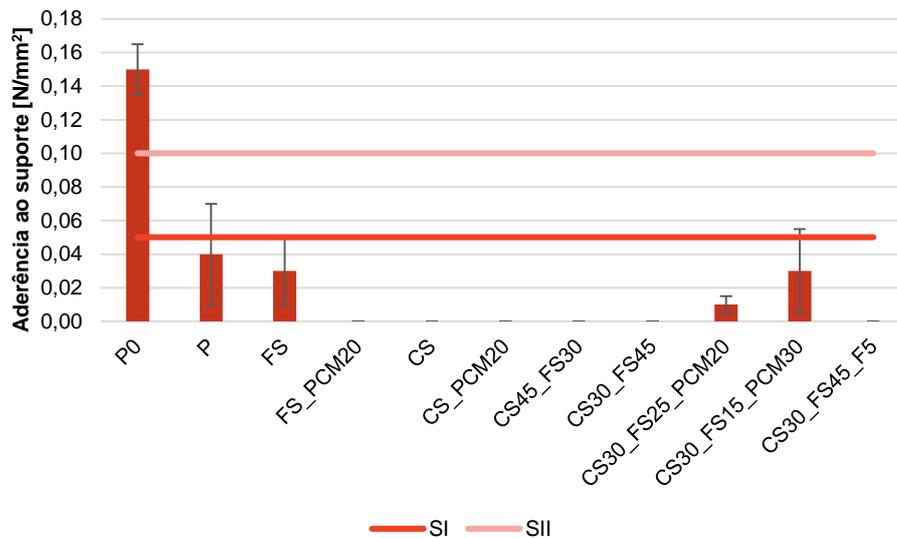


Figura 10.12 – Resultados obtidos no ensaio de aderência e valores mínimos definidos pelas classes de aderência ao suporte definidas pela norma DIN 18947 [NABau, 2013]

No que diz respeito à resistência à abrasão apresentada pelas argamassas de terra estudadas (Figura 10.13), apenas as argamassas FS, FS_PCM20 e CS30_FS15_PCM30 apresentam valores aceitáveis de perda por abrasão. À semelhança do caso anterior, interessa aprofundar o estudo para aferir a que se devem as diferenças obtidas entre as argamassas P₀ e P.

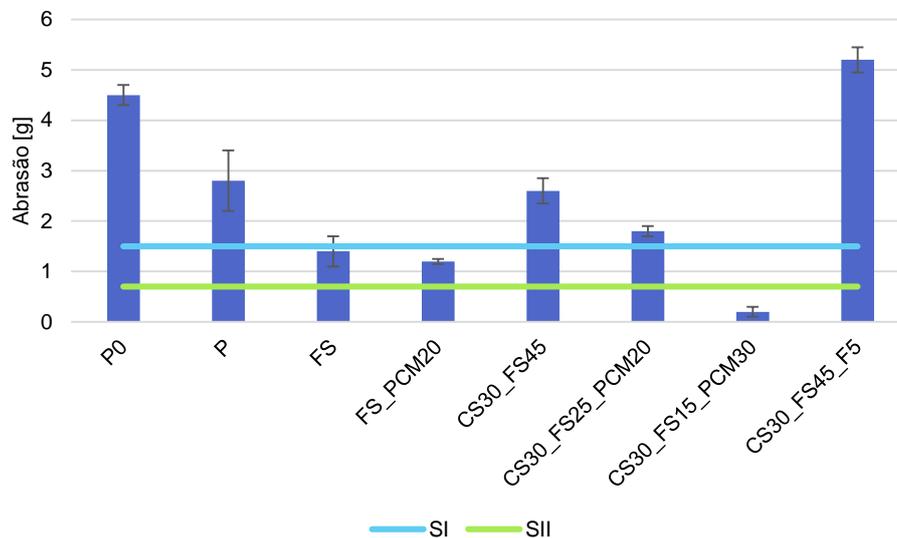


Figura 10.13 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à abrasão e os valores máximos das classes definidas na norma DIN 18947 [NABau, 2013]

Pelos resultados de coesão superficial obtidos (Figura 10.14) é possível concluir que a argamassa CS30_FS45_F5 apresenta a menor coesão superficial ao contrário da argamassa P que apresenta a maior coesão superficial.

A norma DIN 18947 [NABau, 2013] define que pode ser definido um valor entre 5 e 10 para o fator de resistência à difusão do vapor de água. Todas as argamassas estudadas apresentam valores dentro da gama de valores definidos pela norma alemã (Figura 10.15). Segundo Röhlen & Ziegert (2011), um estudo

realizado no Instituto Federal BAM apurou que as argamassas de terra apresentam valores de fator de resistência à difusão do vapor de água de 10, utilizando o método de tina húmida. Desta forma é possível concluir que as argamassas de terra em estudo apresentam valores inferiores, mas semelhantes.

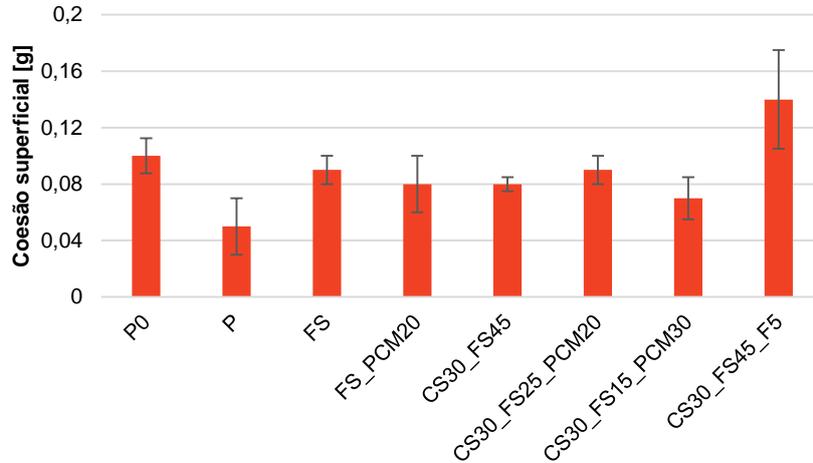


Figura 10.14 – Resultados obtidos no ensaio de coesão superficial

Os valores de coeficiente de capilaridade obtidos para estas argamassas de terra (Quadro 8.8 e Quadro 9.4) permitem avaliar este tipo de argamassas em termos de ascensão de água por capilaridade. Das argamassas estudadas apenas a argamassa FS pode ser classificada como de classe WI, segundo a norma NP EN 998-1 [IPQ, 2010], por apresentar um valor de coeficiente de capilaridade inferior a 0,4 kg/(m².min^{1/2}). As restantes argamassas apresentam resultados que não permitem a classificação segundo esta norma portuguesa.

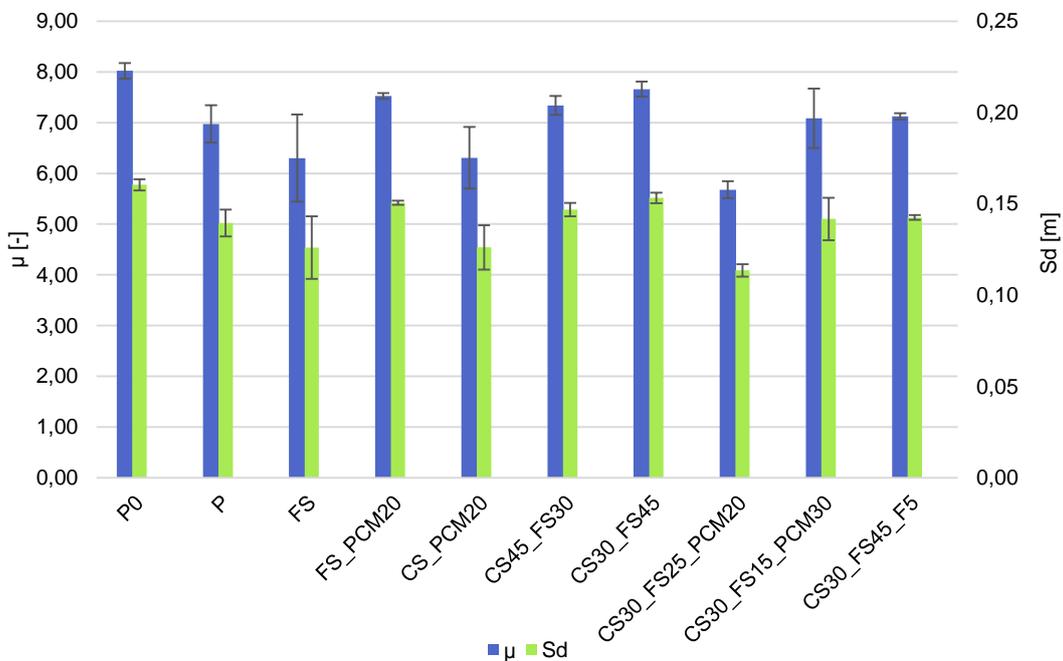


Figura 10.15 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à difusão do vapor de água

Através dos resultados de porosidade aberta obtidos na argamassa pré-doseada da fase experimental inicial, P_0 , é possível concluir que esta apresenta valores semelhantes a outras argamassas de terra que apresentam valores de porosidade aberta entre os 20 e 30% [Röhlen & Ziegert, 2011].

Da observação das curvas de distribuição porosimétrica obtidas no ensaio de porosimetria de mercúrio (Figura 10.16), resultantes da média de duas amostras de cada argamassa ensaiada, é possível concluir que a argamassa P_0 analisada a partir de provete simples (amostra proveniente dos provetes de 40x40x160 [mm], sem influência de suporte poroso) e a argamassa P_0 aplicada em reboco sobre o murete de alvenaria de blocos de betão apresentam curvas de distribuição porosimétrica bi-modais. Nestas pode-se observar a ocorrência de dois picos de maior número de poros, ocorrendo estes próximo dos 10 μm e dos 30 μm variando num intervalo de intrusão de 0,07 e 0,13 ml/g no caso dos provetes de argamassa simples, enquanto os provetes de argamassa sobre murete de betão apresentam picos próximos dos 15 μm e dos 55 μm variando estes num intervalo de intrusão entre 0,08 ml/g e 0,18 ml/g. O mesmo não acontece nas restantes argamassas P_0 aplicadas sobre tijolo em sala condicionada e como reboco sobre diferentes muretes (de alvenarias de tijolo, pedra argamassada e adobe), uma vez que estas apresentam uma curva de distribuição porosimétrica monomodal, com um único pico próximo dos 50 μm , coincidente com o segundo pico que ocorre nas argamassas simples e de reboco sobre o murete de blocos de betão mas apresentando valores de intrusão de mercúrio entre 0,20 e 0,27 mL/g.

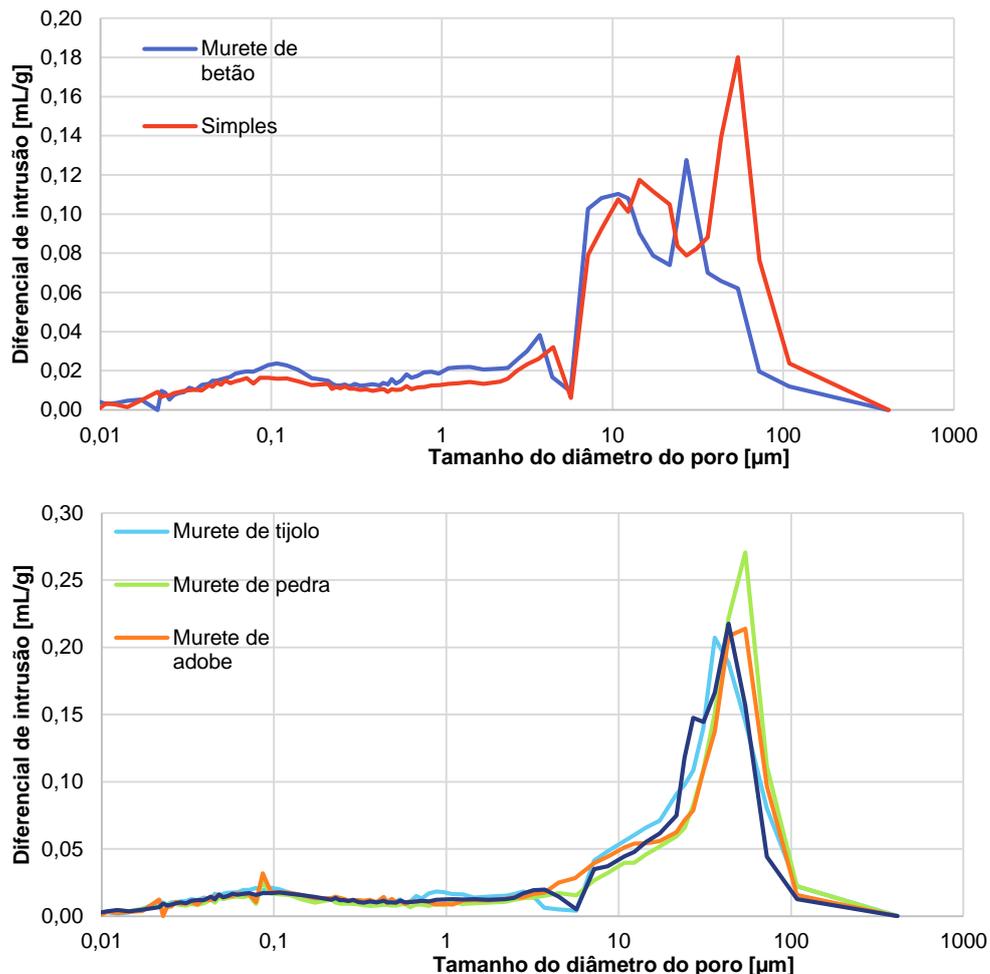


Figura 10.16 – Distribuição do tamanho dos poros das amostras da argamassa P_0 analisadas – sobre muretes de alvenaria, sobre tijolo e de provetes simples, sem suporte poroso

A dimensão dos poros apresentada por esta argamassa P_0 corresponde ao intervalo definido por Snethlage e adaptado por Charda para ocorrência de absorção capilar (0,1 μm e 1000 μm) [citados por Rato, 2006]. No entanto, os poros grandes têm menor pressão capilar e essa menor pressão é particularmente sensível para poros maiores que 10 μm . Por isso, para o estudo da absorção capilar é também importante a análise da gama de poros entre 0,1 e 10 μm . Nessa gama encontram-se dois pequenos picos, um cerca dos 4 μm e outro cerca dos 0,1 μm (Figura 10.17).

Segundo Rato (2006) é geralmente aceite que a resistência mecânica da argamassa aumente com a diminuição da porosidade aberta. No estudo da argamassa P_0 não se pode avaliar esta relação na medida em que apenas se tem uma argamassa (com um valor de porosidade e de resistências), não sendo assim possível avaliar a variabilidade da resistência com a porosidade. Para analisar esta variação propõe-se a realização do ensaio de porosimetria de mercúrio das argamassas formuladas em laboratório (que não foi possível efetuar no período de tempo em que decorreu esta dissertação mas que está previsto realizar em estudos subsequentes) por forma a determinar a porosidade aberta de cada uma delas e ser possível, assim, relacioná-las com as resistências mecânicas obtidas por cada uma.

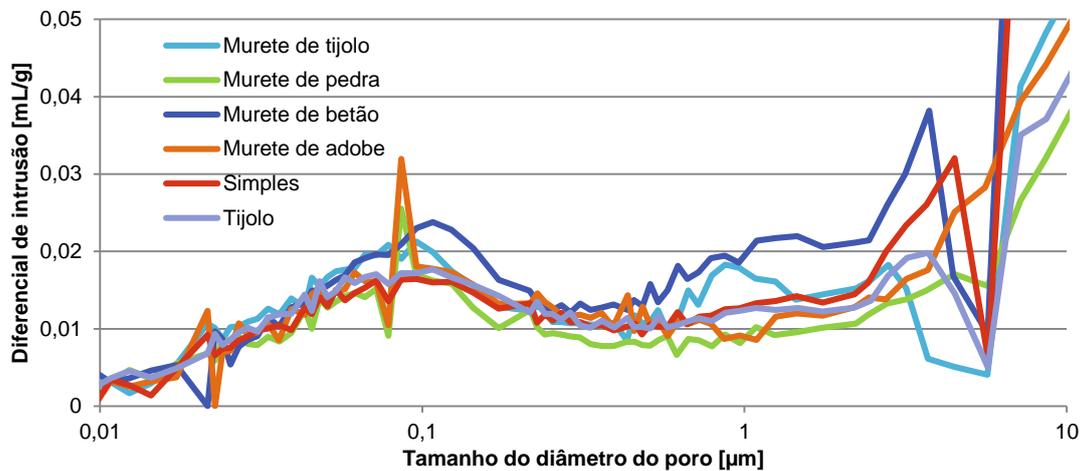


Figura 10.17 – Distribuição do tamanho dos poros das amostras da argamassa P_0 no intervalo entre 0,01 μm e 10 μm em amostra de argamassa sobre murete pedra, betão e adobe

Rato (2006) afirma que, em argamassas de ligantes correntes, à medida que aumenta a finura da areia, diminuem as resistências mecânicas. No presente estudo esta tendência não se comprova, uma vez que as resistências das argamassas FS e CS são semelhantes, apesar de uma conter areia fina e a outra areia grossa, respetivamente. No entanto quando é incorporado PCM em substituição parcial da areia fina, com elevado grau de finura e, conseqüentemente, maior superfície específica, as resistências decrescem.

O coeficiente de capilaridade depende da dimensão dos poros e da conectividade entre eles, apresentando valores mais elevados em argamassas mais porosas [Rato, 2006]. Uma vez que a argamassa P_0 apresenta uma elevada quantidade de poros com cerca de 60 μm é possível concluir que se está perante poros capilares de dimensões consideráveis. Sabe-se que, com o aumento do diâmetro dos poros dentro da gama capilar, aumenta a velocidade de absorção inicial e, conseqüentemente, aumenta o coeficiente de capilaridade (uma vez que este é determinado pelos instantes iniciais) [Rato, 2006]. Na verdade durante a realização do ensaio pode observar-se esta rápida absorção de água, na medida em que, em alguns provetes, passados 10 minutos do ensaio já era visível a presença de água no seu topo.

Quando a água passa de um poro de menores dimensões para um poro com dimensões superiores existe um retardamento da penetração da água, uma vez que o volume a ocupar é superior e a quantidade

de água permanece igual [Rato, 2006]. Esta pode ser a razão pela qual alguns dos provetes demoraram mais tempo a apresentar água na superfície superior.

Não foi possível determinar o valor assintótico da argamassa P_0 devido à baixa resistência dos provetes (todos sem estabilização química) quando em contacto permanente com água líquida; com efeito, ao início dos sinais de estabilização da curva de absorção capilar dos provetes estes foram retirados do contacto com a água, não sendo possível uma definição concreta do valor assintótico. Sabe-se que quanto maior a porosidade aberta, tendencialmente maior é o valor assintótico. Esta situação é devida a existir mais espaço disponível e maior quantidade de água absorvida; sendo menor a velocidade inicial de ascensão da água, o coeficiente de capilaridade será tendencialmente inferior [Rato, 2006]. A porosidade aberta para este tipo de argamassa apresentou o valor de 31% (que se assemelha aos valores de porosidade aberta de argamassas correntes de cal aérea, por exemplo) e o valor de coeficiente de capilaridade de $0,50 \pm 0,06 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$ (valor obtido através da impermeabilização lateral por resina epóxi).

No presente estudo pode concluir-se que realmente as argamassas com areia fina e com PCM de elevada finura apresentam tendência para valores assintóticos mais elevados. As argamassas com adição de areia fina apresentam valores de coeficiente de capilaridade mais baixos, o que, no entanto, não acontece com as argamassas com adição de areia fina e PCM, que apresentam os valores mais altos de coeficiente de capilaridade.

Por outro lado, quanto maiores forem os poros, menor é a altura de água atingida e, conseqüentemente, menor a quantidade de água absorvida. Pode concluir-se que os poros não deverão ter uma dimensão muito elevada, pelo que permitem atingir uma altura de água elevada.

Para uma análise da tendência entre a porosidade aberta e a absorção de água por capilaridade das argamassas, mais uma vez se propõe a determinação da porosidade aberta e da porosimetria de todas as argamassas formuladas em laboratório através de MIP para ser possível comparar esta característica com o coeficiente de capilaridade apresentado por cada uma delas.

Estas argamassas com tanta absorção capilar e poros maiores que $10 \mu\text{m}$ parecem comprovar a tese de que, neste tipo de argamassas, os poros entre 10 e $100 \mu\text{m}$ têm contribuição ainda significativa para a capilaridade

A difusão de vapor de água numa argamassa depende da porosidade aberta, da conectividade entre poros e, em menor importância, da dimensão dos poros [Rato, 2006]. O fluxo de vapor de água é maior em argamassas mais porosas e com maior conectividade entre poros. Por outro lado, o fluxo de vapor de água é menor em argamassas com menor dimensão de poros. Em argamassas à base de cal e cimento uma quantidade superior de areia fina pode diminuir a permeabilidade ao vapor de água [Rato, 2006]. No entanto esta tendência não se verifica nas argamassas de terra em estudo.

Analisando os resultados obtidos no ensaio de adsorção de vapor de água das argamassas é possível concluir que todas elas podem ser classificadas como de classe de adsorção WSIII, segundo a norma DIN 18947 [NABau, 2013]. A argamassa P é aquela que apresenta valores de adsorção de vapor de água mais elevado.

As argamassas de terra apresentam uma capacidade higroscópica anormalmente elevada. Segundo Röhlen & Ziegert (2011), habitualmente, as argamassas de reboco de terra apresentam valores de adsorção de água entre os 50 e os $70 \text{ g}/\text{m}^2$.

Ziegert (2011) realizou um estudo ao nível da capacidade adsorvente de uma argamassa de terra pré-doseada do mesmo fabricante das argamassas pré-doseadas analisadas na presente dissertação.

Neste estudo a argamassa ao fim de 12 horas apresentou cerca de 100 g/m² de vapor de água adsorvido, sendo o estudo desenvolvido segundo a norma DIN 18947 [NABau, 2013]. Comparando estes resultados com os resultados obtidos pela argamassa pré-doseada da fase experimental inicial, P₀ (única argamassa que utiliza os provetes planares definidos na norma DIN 18947 [NABau, 2013] e utilizados no estudo de Ziegert (2011)), é possível verificar que a argamassa P₀ apresenta um valor de adsorção de vapor de água de aproximadamente 105 g/m², muito semelhante ao do referido autor.

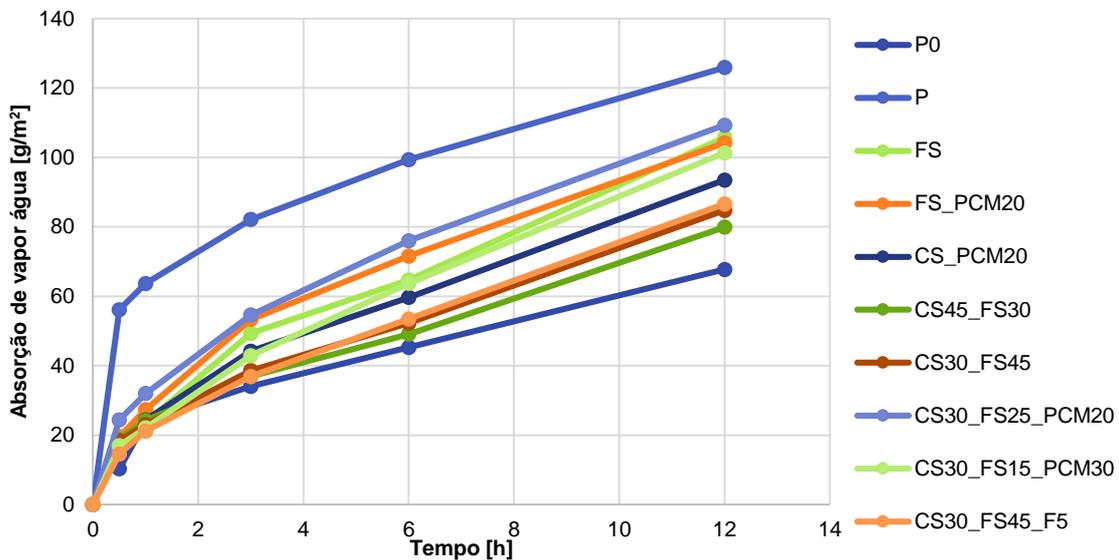


Figura 10.18 – Resultados obtidos no ensaio de adsorção de vapor de água

As argamassas P₀ e P são ambas comercializadas pré-doseadas como o mesmo produto e podem diferir apenas pela utilização de lotes diferentes de terra e areia e pelo processo de amassadura. Na realidade, apenas o processo de amassadura das argamassas formuladas em laboratório seguiu o definido na norma DIN [NABau, 2013], pelo manuseamento das argamassas talvez fosse benéfica uma amassadura mais prolongada, tal como foi realizado nas amassaduras realizadas na fase experimental inicial. Admite-se que também possam ter sido inseridas diferenças ao nível da preparação dos provetes de argamassa aplicada sobre tijolo. Com efeito, as preparações foram feitas por operadores distintos aquando da fase experimental inicial e da fase de formulação de argamassas em laboratório. De qualquer modo, em trabalhos futuros este é um assunto que interessa aprofundar.

10.3. Comparação de resultados com outros autores

Gomes (2013) estudou a consistência por espalhamento e a massa volúmica de argamassas de terra como e sem fibras, tendo obtido valores de 170 mm de consistência por espalhamento e valores de massa volúmica no estado fresco de 1872±1,4 kg/m³ e 1783±0,3 kg/m³, para argamassas de terra sem e com fibras, respetivamente. Pode concluir-se que as argamassas em estudo apresentam valores próximos dos obtidos pelo autor, não podendo ser os resultados diretamente comparados uma vez que o teor de água presente difere entre argamassas.

No que diz respeito à massa volúmica aparente, Gomes (2013) obteve valores entre 1500 e 1750 kg/m³ para argamassas de terra com e sem fibras. O mesmo autor estudou ainda as características das

argamassas de terra com incorporação de cal aérea e fibras tendo obtido valores de massa volúmica aparente de 1700 kg/m^3 e 1500 kg/m^3 , para argamassas de cal aérea sem e com fibras, respetivamente. Jamú (2013) também estudou a incorporação de terra em argamassas de cal aérea, tendo obtidos resultados de massa volúmica aparente entre 1700 e 1800 kg/m^3 . Concluir-se que os valores obtidos por estes autores são semelhantes aos obtidos no presente estudo.

Em termos de retração linear das argamassas de terra com e sem adição fibras, Gomes (2013) obteve valores de retração linear inferiores aos 3% definidos para argamassas de terra. Os resultados de retração linear obtidos pelo mesmo autor em argamassas de terra com incorporação de cal aérea e fibras apresentam também valores de retração linear inferior a 3%.

Dependendo da massa volúmica aparente, a condutibilidade térmica das argamassas de terra rondam tipicamente o valor de $0,17$ e $1,1 \text{ W/(m.K)}$ [Röhlen & Ziegert 2011], valores próximos dos obtidos nas argamassas estudadas na presente dissertação.

Jamú (2013) no estudo realizado com argamassas de cal aérea e incorporação de terra obteve valores de condutibilidade térmica de $0,7 \text{ W/(m.K)}$ para argamassa sobre tijolo e de $0,8 \text{ W/(m.K)}$ para provetes prismáticos, tendo o ensaio dos provetes sido realizado com o mesmo equipamento e procedimento de ensaio utilizado na presente dissertação. Pode concluir que os valores obtidos para as argamassas de terra em estudo são superiores exceto no caso das argamassas com incorporação de PCM que são inferiores (cerca de $0,5 \text{ W/(m.K)}$) e no caso de argamassas com elevada quantidade de agregado grosso que apresentam os mesmos resultados.

Comparando os resultados de resistências mecânicas obtidos no presente estudo com a gama de valores recomendadas por Veiga et al. (2010) para argamassas de reboco interior de cal, todas as argamassas com adição de PCM apresentam valores de resistência à tração inferiores a esta gama (entre $0,2$ e $0,7 \text{ N/mm}^2$). O mesmo acontece com o módulo de elasticidade com exceção de uma das argamassas com PCM (CS_PCM20) que se encontra dentro da gama estabelecida (entre 2000 e 5000 N/mm^2). No que se refere à resistência à compressão todas as argamassas cumprem a gama definida por estes autores (entre $0,4$ e $2,5 \text{ N/mm}^2$). Desta forma, conclui-se que as argamassas sem incorporação de PCM apresentam características mecânicas semelhantes a outros tipos de argamassas, nomeadamente com base em cal aérea. Comparando com o Quadro 3.1 [Veiga et al, 2010] apresentado na secção 3.5, verifica-se que esta argamassa pode ser considerada adequada para aplicação na conservação de edifícios históricos.

Estudos desenvolvidos por Matias et al. (2012) mostram que argamassas de cal aérea com resíduos de cerâmica podem atingir valores de resistência à compressão aos 120 dias de idade que ultrapassam 7 N/mm^2 e de resistência à flexão que se aproximam de $0,35 \text{ N/mm}^2$. Comparativamente, as argamassas do presente estudo apresentam valores de resistência mecânicas inferiores.

Comparando as argamassas estudadas na presente dissertação com as argamassas de terra caracterizadas por Gomes (2013) é possível concluir que apenas as argamassas sem incorporação de PCM estudadas apresentam valores de resistência à tração superiores aos que foram obtidos pelo autor (entre $0,15$ e $0,175 \text{ N/mm}^2$). O mesmo acontece quando comparados os valores de resistência à tração obtidos pelo mesmo autor em argamassas de terra com incorporação de cal aérea com ou sem fibras ($0,15 \text{ N/mm}^2$). Em termos de resistência à compressão, as argamassas de terra de Gomes (2013) apresentam valores inferiores aos obtidos pelas argamassas estudadas na presente dissertação. Quando comparados os resultados das argamassas de terra com incorporação de cal aérea com e sem fibras deste autor com as argamassas de terra estudadas conclui-se que os valores obtidos pelo autor são inferiores. Por fim, no que diz

respeito ao módulo de elasticidade dinâmico em argamassas de terra estudadas por Gomes (2013), os valores são inferiores aos obtidos nas argamassas em estudo e o mesmo acontece nas argamassas de terra com incorporação de cal aérea com e sem fibras vegetais.

Para argamassas de cal aérea, Faria et al. (2008) obteve valores de módulo de elasticidade (2100 ± 53 N/mm²) inferiores aos obtidos neste estudo para argamassas de terra, exceto no caso das argamassas com incorporação de PCM que apresentam valores inferiores aos obtidos pelo autor. Em termos de resistência à compressão, o mesmo autor obteve também valores inferiores ($0,75 \pm 0,03$ N/mm²) e por fim no que diz respeito à resistência à tração os valores obtidos pelo autor ($0,32 \pm 0,01$ N/mm²) são superiores aos obtidos nas argamassas de terra em estudo.

Segundo Röhlen & Ziegert (2011), as argamassas de reboco de terra devem apresentar valores de aderência entre o suporte e o reboco de pelo menos 0,03 N/mm², sendo o valor de 0,15 N/mm² o mais habitual. Os valores de aderência ao suporte de outras argamassas são tipicamente superiores como é o caso de argamassas de cal (variam entre 0,1 e 0,2 N/mm²) [Röhlen & Ziegert, 2011]. No entanto, a situação de dificuldade de execução do ensaio sentida nas argamassas de terra da presente dissertação ocorrem também frequentemente com argamassas de cal aérea. Analisando os resultados obtidos pelas argamassas estudadas é possível concluir que apenas as argamassas pré-doseadas, P₀ e P, cumprem o valor mínimo de 0,03 N/mm², referenciado pelos autores Röhlen & Ziegert (2011), sendo que apenas a argamassa P₀ apresenta valores de aderência ao suporte semelhante ao apresentado pelos autores.

Em termos de permeabilidade ao vapor de água, os valores das argamassas de terra estudadas são superiores aos determinados por Faria (2014) para argamassas de cal aérea (entre 1,67 e $2,19 \times 10^{-11}$ kg/m.s.Pa). Os valores de espessura da camada de ar de difusão de vapor de água equivalente obtidos no presente estudo são também superiores aos obtidos para argamassas de cal (variam entre 0,089 e 0,117 m).

Comparando com as argamassas de terra caracterizadas por Gomes (2013), que também não têm ligante e cujos provetes são impermeabilizados com parafinas, apresentam-se resultados de índice de secagem inferiores aos obtidos pelo autor, exceto no caso da argamassa CS30_FS45 e CS30_FS45_F5 que apresentam valores semelhantes. Jamú (2013) com o seu estudo sobre argamassas de cal aérea com diferentes percentagens de terra obteve coeficientes de capilaridade muito superiores aos que foram obtidos por argamassas de terra (variam entre 3 e 4 kg/(m².s^{1/2})).

Gomes (2013) para argamassas de terra sobre suportes de terra obteve valores inferiores a 80 Shore A em todas as argamassas de terra com e sem fibras e em todas as argamassas de terra com incorporação de cal aérea com e sem fibras. A argamassa pré-doseada de terra em estudo aplicada sobre adobe apresenta valores superiores a 80 Shore A. Jamú (2013) obteve valores de dureza superficial por durómetro inferiores para argamassas de cal aérea e de cal aérea com terra (entre 63 e 70 Shore A).

Em termos de velocidade de propagação de ultrassons as argamassas de terra e de terra com cal aérea com e sem fibras estudadas por Gomes (2013) apresentam valores superiores (superior a 1000 m/s) aos valores obtidos pela argamassa pré-doseada de terra aplicada sobre alvenaria de adobe.

Jamú (2013) obteve valores de resistência superficial por esclerómetro pendural de argamassas de cal aérea e de cal com terra sobre muretes superiores aos valores obtidos pelas argamassas de terra em estudo (cerca de 80 graus Vickers). Em termos de velocidade de propagação de ultrassons sobre mu-

retes, a argamassa de cal aérea apresenta valores inferiores (551 ± 94 m/s) aos apresentados pelas argamassas em estudo, enquanto a argamassa de terra apresenta valores superiores (775 ± 98 m/s), exceto no caso das argamassas sobre tijolo.

10.4. Características das argamassas de terra face aos locais de aplicação

As argamassas de terra para reboco interior podem ser aplicadas em locais secos em que não ocorram lavagens, águas correntes ou elevadas quantidades de vapor de água, como por exemplo quartos ou salas, devido à sua degradação em contacto com a água. Em zonas de grande desgaste, como por exemplo escadas, estas não podem ser aplicadas devido à sua baixa resistência e coesão superficial.

A utilização em compartimentos como quartos ou salas está ainda condicionada com utilização dos mesmos, uma vez que se for utilizada para uma sala de uma creche ou para o quarto de uma criança, este reboco pode degradar-se facilmente face aos problemas associados à presença de crianças.

Para minimizar estes riscos, os rebocos interiores de argamassas de terra deverão ser protegidos com consolidantes para garantirem uma maior durabilidade e poderem ser aplicados em zonas em que não poderiam ser utilizadas sem esta proteção.

11. CONCLUSÕES

11.1. Considerações finais

A presente dissertação iniciou-se com uma contextualização histórica da utilização da terra na construção, uma abordagem às características da terra e das argamassas de terra, assim como aos impactos energéticos e ambientais que estas apresentam. Abordou-se ainda o tema das nanotecnologias em argamassas, assim como a normalização e procedimentos de ensaio a realizar em argamassas de terra. Neste âmbito deu-se particular relevo à única norma de que se tem conhecimento especificamente sobre este tipo de produto.

A campanha experimental permitiu avaliar as características das argamassas de terra a nível do produto pré-doseado e dos seus materiais constituintes, assim como no estado fresco e no estado endurecido em três aplicações distintas – provetes simples, argamassa sobre tijolo e reboco de argamassa sobre quatro muretes diferentes (alvenaria de pedra argamassada, bloco de betão, adobes e tijolo furado). Essa avaliação foi realizada com base na norma alemã DIN 18947 [NABau, 2013], especifica para argamassas de terra, assim como normas europeias e procedimentos de ensaios definidos por outros autores. Foram estudadas duas argamassas pré-doseadas do mesmo produtor (com diferentes datas de produção) e argamassas formuladas em laboratório, com traço volumétrico de 1:3 (terra argilosa: areia) em que se variou o tipo de areia e se adicionaram fibras ou materiais de mudança de fase.

Finalizadas as diferentes etapas deste estudo considera-se que os objetivos de contribuir para um conhecimento mais aprofundado das características de argamassas de terra para rebocos foram cumpridos.

Analisando os ensaios realizados às argamassas no estado fresco, a trabalhabilidade apresentada pelas argamassas com valores de consistência por espalhamento na ordem dos 175 mm foi excelente. A argamassa CS30_FS45_F5, apresentando um elevado valor de consistência por espalhamento, mostra uma trabalhabilidade superior às restantes, o que se pode em parte dever a uma mais elevada quantidade de água adicionada à mistura.

Quanto aos ensaios realizados às argamassas no estado endurecido é possível concluir que as argamassas de terra com incorporação de PCM apresentam menores valores de massa volúmica aparente e de condutibilidade térmica. A incorporação deste tipo de material de mudança de fase leva à diminuição das resistências mecânicas das argamassas de terra.

As argamassas de terra apresentam elevadas capacidades higroscópicas e fatores de resistência à difusão de vapor de água que rondam os 5 e os 10, podendo contribuir efetivamente para o conforto do interior dos espaços onde são aplicadas.

A incorporação dos PCM pode trazer benefícios às argamassas de terra e ao interior das habitações, uma vez que estes têm como objetivo a melhoria da regulação dos espaços interiores sem necessidade de elevados consumos energéticos. A continuação dos estudos sobre a incorporação deste tipo de material em argamassas pode levar empresas como a BSAF a interessar-se mais pelo meio ambiente, juntando um produto químico sem grandes riscos para o ambiente a uma argamassa eco-eficiente.

A presente dissertação poderá contribuir para o estabelecimento de uma norma portuguesa ou até mesmo para uma norma europeia que defina os métodos de ensaio para a caracterização de argamassas

de terra, assim como a sua classificação, avançando um pouco mais face à norma alemã atualmente em vigor nesse país.

Analisadas as vantagens e benefícios (bem como os inconvenientes, de que se destaca uma demorada secagem, face a outros tipos de argamassas) que este tipo de argamassas apresentam, considera-se e espera-se que a presente dissertação possa ajudar na promoção deste tipo de argamassas de reboco de terra para utilização no revestimento interior das alvenarias.

Este tipo de argamassas, para além dos benefícios já referidos, podem apresentar alguns benefícios económicos devido ao baixo custo de produção. O presente estudo, ao promover este tipo de argamassas, pode servir para uma mais ampla consciencialização dos utilizadores dos edifícios para a importância da sustentabilidade na construção, para um aumento do interesse e solicitação deste tipo de rebocos e, dessa forma, propiciar algumas pequenas e médias empresas a investir na área de produção e de aplicação deste tipo de argamassas com a utilização de terras locais, levando a um aumento de postos de trabalho a nível local.

Tal como referido anteriormente, uma parte dos resultados obtidos na presente dissertação foram já apresentados em publicações científicas. Estão a ser desenvolvidos artigos para publicação complementar.

11.2. Propostas de trabalhos futuros

De forma a dar continuidade ao trabalho desenvolvido na presente dissertação, sugerem-se alguns trabalhos futuros para que seja possível confirmar alguns resultados obtidos e se possam realizar novos estudos para uma compreensão de algumas características.

Na continuação dos estudos sobre as argamassas de terra, aconselha-se a realização do ensaio de corte definido por Hamard et al. (2013), que pode ser efetuado *in situ*, numa fase de avaliação da adequabilidade de rebocos, de modo a avaliar as características desta argamassa quando sujeita a tensões de corte.

A realização do ensaio de porosimetria de mercúrio sobre as argamassas formuladas em laboratório é proposta para que seja possível avaliar a influência da microestrutura nas características das argamassas e, particularmente, à otimização da sua formulação.

Aconselha-se a continuação da caracterização das argamassas formuladas em laboratório aplicadas como rebocos, realizando ensaios como a coesão superficial, resistência superficial com esclerómetro pendular, choque da esfera e penetração controlada, realizados em diferentes zonas do reboco e em condições ambientais diferentes. Dessa forma será avaliado o envelhecimento das argamassas em condições naturais e/ou através de envelhecimento acelerado.

De modo a conhecer a influência deste tipo de material nas argamassas de terra propõe-se o estudo aprofundado dos resultados do ensaio de termografia sobre a argamassa aplicada sobre os tijolos e a realização de novos ensaios que mostrem as potencialidades que a aplicação deste material pode ter na regulação da temperatura interior, como é o caso de um ensaio com células de teste.

Em relação à incorporação dos materiais de mudança de fase nas argamassas de terra, é necessário o estudo de uma formulação de argamassa otimizada de modo a melhorar as resistências apresentadas.

BIBLIOGRAFIA

- ANTÃO, A. (2010) – *Mecânica dos solos C*. Sebenta da unidade curricular de Mecânica de Solos. FCT UNL.
- ASTM Standards (2008) – ASTM C805-08 - *Standard test method for rebound hammer of hardened concrete*. United States, ASTM.
- ASTM Standards (2000) – ASTM D2240-00 - *Standard test method for rubber property – durometer hardness*. United States, ASTM.
- BASF, disponível em <http://www.basf.com>. Consultado em junho de 2014.
- BRUNO, P.; FARIA, P.; CANDEIAS, A.; MIRÃO, J. (2010) - Earth mortars from on pre-historic habitat settlements in south Portugal. Case studies. *J. Iberian Archaeology* 13 (2010), 51-67.
- CASTILLA, F. J. (2011) – *Revestimientos y acabados superficiales en construcciones con tierra contemporáneas*. *Informes de la Construcción*, 63 (523), p. 143-152.
- CEN (1998a) – EN 1015-1: 1998 - *Methods of test for mortars for masonry. Part 1: Determination of particle size distribution (by sieve analysis)*. Brussels.
- CEN (1998b) – EN 1015-2: 1998 – *Methods of test for mortars for masonry. Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*. Brussels.
- CEN (1998c) – EN 1015-4:1998 – *Methods of test for mortar for masonry – Part 4: Determination of consistence of fresh mortar (by Plinger Penetration)*. Brussels.
- CEN (1998d) – EN 1015-6:1998 – *Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar*. Brussels.
- CEN (1998e) – EN 1015-7:1998 – *Methods of test for mortar for masonry - Part 7: Determination of air content of fresh mortar*. Brussels.
- CEN (1999a) – EN 1015-3:1999 – *Methods of test for mortar for masonry. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. Brussels.
- CEN (1999b) – EN 1015-11: 1999 – *Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. Brussels.
- CEN (1999c) - prEN 1015-8, draft European Standard, *Methods of test for mortar for masonry – Part 8: Determination of water retentivity of fresh mortar*.
- CEN (2000) – EN 1015-12:2000 – *Methods of test for mortar for masonry. Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates*. Brussels.
- CEN (2002) – EN 1015-18:2002 – *Methods of test for mortars for masonry. Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*. Brussels.
- CEN (2005), EN 12878:2005 - *Pigments for the colouring of building materials based on cement and/or lime. Specifications and methods of test*. Brussels.
- CEN (2009a) – prEN 15803: 2009 – *Conservation of cultural property – Test methods – Determination of water vapour permeability*. Brussels.
- CEN (2009b) – EN 15801: 2009 – *Conservation of cultural property. Test methods. Determination of water absorption by capillarity*. Brussels.
- CNR – ICR (1991) - Normal 29/88 - *Misura della perdita per evaporazione dell'acqua assorbita dal materiale*. Roma.

- CUNHA, S.; ALVES, V.; AGUIAR, J.; FERREIRA, V. (2012) - Argamassas Térmicas Sustentáveis: O Contributo dos Materiais de Mudança de Fase. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, paper 2012.
- DIN (1998) – DIN EN 4102-1:1998 - *Fire behaviour of building materials and elements - Part 1: Classification of building materials. Requirements and testing*. Berlin.
- DIN (1994) – DIN EN 4102-4:1994 - *Fire behaviour of building materials and elements - Part 4: Overview and design of classified building materials, elements and components*. Berlin.
- DRDÁCKÝ, M.; LESÁK, J.; NIEDOBA, K.; VALACH, J. (2014) – Peeling tests for assessing the cohesion and consolidation characteristics of mortar and render surfaces. *Materials and Structures*.
- EMBARRO, disponível em <http://www.embarro.com>. Consultado em fevereiro de 2014.
- FARIA, P. (2004) – Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: Contributo para o estudo da influência dos ligantes. Tese de Doutoramento, FCT UNL.
- FARIA, P. (em publicação). Rebocos com terra. Janela de oportunidades. Seminário e *workshop*. FCT UNL.
- FARIA, P.; HENRIQUES, F.; RATO, V. (2008) – Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation. *Journal of Cultural Heritage*. p. 338-346.
- FARIA, P.; SANTOS, T.; SILVA, V. (2014) – Earth-based mortars for masonry plastering. 9th International Masonry Conference 2014 (CD).
- FARIA, P.; TAVARES, M.; MENEZES, M.; VEIGA, R.; MARGALHA, G. (2010) – Traditional Portuguese techniques for application and maintenance of historic renders. RILEM Proceedings Pro 078: HMC2010, 2nd Historic Mortars Conference and RILEM TC 203-RHM Final Workshop (J.Walek, C.Groot, J.Hughes, Ed.). Prague, p. 609-617.
- FLORES, I.; SOARES, A.; BRITO, J. (2013) – A nanotecnologia aplicada às argamassas de revestimento. *TechITT*, 34 (II), p. 42 a 51.
- GOMES, M.I.; GONÇALVES, T.D.; FARIA, P. (2012) – Earth-based repair mortars: experimental analysis with different binders and natural fibers. *Rammed Earth Conservation*, Mileto, Vegas & Cristini (eds.), Taylor & Francis Group, London, p. 661-668.
- GOMES, M.I.; GONÇALVES, T.D.; FARIA, P. (2012) – Evaluación de la influencia del contenido de agua en la trabajabilidad del mortero de tierra (Avaliação da influência do teor de água na trabalhabilidade de argamassas de terra). *Apuntes – Journal of Cultural Heritage Studies*, 25 (2), p. 258-277.
- GOMES, I. (2013) – Conservação de construções de taipa: argamassas de reparação. Tese de Doutoramento, FCT UNL.
- GOMES, I.; GONÇALVES, T.D.; FARIA, P. (2014) - Unstabilised rammed earth: characterization of material collected from old constructions in South Portugal and comparison to normative requirements. *Int J. Architectural Heritage*, 8, p. 185-212.
- GRILO, J.; FARIA, P.; VEIGA, R.; SANTOS-SILVA, A.; SILVA, V.; VELOSA, A. (2014) – New Natural Hydraulic Lime mortars - Physical and microstructural properties in different curing conditions. *Construction and Building Materials*, 54, p. 378-384.
- HAMARD, E.; MOREL, J. C.; SALGADO, F.; MARCOM, A.; MEUNIER, N. (2013) - A procedure to assess the suitability of plaster to protect vernacular earthen architecture. *Journal of Cultural Heritage*, 14, p. 109-115.
- HENRIQUES, F. (2007) - *Humidade em Paredes*. Ed. Edifícios – Conservação e Reabilitação. 4ª edição. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

- 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, 31; p. 29-37.
- HENRIQUES, F. (2011) – Comportamento higratérmico de edifícios; FCT-UNL.
- IPQ (2000) – NP EN 1097-3:2000 – *Ensaio para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 3: Método para determinação da massa volúmica e dos vazios*. Caparica.
- IPQ (2002) – NP EN 1015-19:2002 – *Métodos de ensaio de argamassas para alvenaria. Parte 19: Determinação da permeabilidade ao vapor de água de argamassas de reboco endurecidas*. Caparica
- IPQ (2005), NP EN 13055-1:2005 - *Agregados leves. Parte 1: Agregados leves para betão, argamassas e caldas de injeção*. Caparica.
- IPQ (2007) – NP EN 14146:2006 – *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental)*. Caparica.
- IPQ (2008) – NP EN 1936:2008 – *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta*. Caparica.
- IPQ (2010) – NP EN 998-1:2010 – *Especificação de argamassas para alvenarias. Parte 1: Argamassas para rebocos interiores e exteriores*. Caparica.
- ISO (2001) – ISO 12572:2001 – *Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties*. Switzerland.
- JAMÚ, N. (2013) – Desenvolvimento e caracterização de argamassas de cal aérea e terra: A influência da terra como ligante. Dissertação de Mestrado, FCT UNL.
- KITA, Y. (2013) – The functions of vegetable mucilage in lime and earth mortars – A Review. 3rd Historic Mortars Conference, Glasgow, Scotland (CD).
- 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 Congresso Internacional da Habitação no Espaço Lusófono, Lisboa, LNEC (CD).
- LINO, G. (2013) – Caracterização *in situ* de rebocos com base em cal e metacaulino aplicados em muretes experimentais. Dissertação de Mestrado, FCT UNL.
- LNEC (1968) – Especificação E-219. Prospeção geotécnica de terrenos – Vocabulário. Lisboa.
- LNEC (1980) – FE Pa 25. *Ficha de ensaio para revestimentos de paredes – Ensaio de choque da esfera*. Lisboa.
- LNEC (2002) – FE Pa 39, *Ficha de ensaio para revestimentos de paredes – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão*. Lisboa.
- LNEC (2010) – FE Pa 43. *Ficha de ensaio para revestimentos de paredes – Ensaio de avaliação de características mecânicas por ultra-sons*. Lisboa.
- MALANHO, S; VEIGA, R. (2010) – Análise do comportamento mecânico em laboratório e *in situ* de revestimentos pré-doseados de cimento. Congresso APFAC 2010 (CD).
- MATIAS, G.; FARIA, P.; TORRES, I.; TOMÁS, A.; FERREIRA, T.; DUARTE, T. (2012) – Argamassas de cal aérea com resíduos de cerâmica. 4º Congresso de Argamassas e ETICS, APFAC (CD).
- MEMON, S. (2014) – Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, p. 870-906.
- MINKE, G. (2006) – Building with Earth. Design and Technology of a Sustainable Architecture, WITpress.
- MINKE, G. (2011) – Shrinkage, abrasion, erosion and sorption of clay plasters, *Informes de la Construcción*, 532 (63), p.153-158.

- NABau (2013) – DIN 18947 – Earth plasters – Terms and definitions, requirements, test methods (em alemão). Berlin.
- PINA DOS SANTOS, C. A.; MATIAS, L. (2006) – Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente de edifícios. ITE50. LNEC, Lisboa.
- PIRES, A. L. (2013) – Avaliação do comportamento higroscópico de argamassas de reboco. Dissertação de Mestrado, FCT UNL.
- QUINTELA, M. (2006) – Durabilidade de revestimentos exteriores de parede em reboco monocamada. Dissertação de Mestrado, FEUP.
- RATO, V. (2006) – Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, FCT-UNL.
- RILEM (1980) – *Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. Water absorption under low pressure. Pipe method. Test n.º II.4. Recommendations provisoires.* Materials & Structures, 13, p. 201-203.
- RILEM (1980a) – *Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. Test n.º II.5 – Evaporation curve.* Materials & Structures, 13, p. 204-207.
- ROHLEN, U.; ZIEGERT, C. (2011) – Earth building practice, Bauwerk, Beuth Verlag GmbH.
- SÁ, A.V.; AZENHA, M.; SOUSA, H.; SAMAGAIO, A. (2012) – Thermal enhancement of plastering mortars with Phase Change Materials: Experimental and numerical approach. Energy and Buildings, 49, p. 16-27.
- SANTOS, T.; FARIA, P.; SILVA, V. (2014) – Caracterização de argamassa pré-doseada de terra. Argamassas 2014 – I Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento, Univ. Coimbra, 5-6 Junho de 2014 (CD, ID04).
- TORRACA, G. (2009) – Mortars, Bricks and Concretes: Earth, Gypsum, Lime and Cements. Lectures on Materials Science for Architectural Conservation. Part 2. The Getty Conservation Institute, Los Angeles, p. 38-58.
- UNL/DEC (2000) – Fe 32 - *Fichas de ensaio – Análise de argamassas. Determinação da retenção de água. Caparica.* FCT UNL.
- VEIGA, M.R.; FRAGATA, A.; VELOSA, A.L.; MAGALHÃES, A.C.; MARGALHA, G. (2010) - Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings. International Journal of Architectural Heritage, 4, p. 177-195.
- VEIGA, M. R.; CARVALHO, F. (2000) – Experimental characterization of lime based rendering and repointing mortars. Definition of relevant laboratorial and “in situ” tests. Proceedings of the workshop Compatible Materials Recommendations for the Preservation of European Cultural Heritage. Atenas (Grécia): National Technical University of Athens (CD).
- VIEIRA, J.; SENFF, L.; GONÇALVES, H.; SILVA, L.; FERREIRA, V. M.; LABRINCHA, J. A. (2014) – Functionalization of mortars for controlling the indoor ambient of buildings. Energy and Buildings, 70, p. 224-236.
- ZIEGERT, C. (2011) – Relatório de teste 11045a – Análise de argila para construção em Portugal, Reboco de argila “EMBARRO PORTUGAL”. Laboratório Ziegert. Seiler Ingenieure GmbH.

ANEXOS

A.1. FICHA TÉCNICA DO PCM

Provisional Technical Information

Micronal® DS 5040 X

Polymer Dispersions for Construction



The Chemical Company

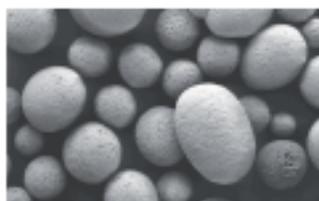
Characteristic/Chemie

Dry powder version of a paraffin wax mixture encapsulated in highly cross-linked polymethylmethacrylate, free of formaldehyde

Technical Data

| | |
|---------------------------------------|-------------------------------|
| Physical form | Powder |
| Particle size | ca. 50–300 µm |
| Bulk density | ca. 300–400 kg/m ³ |
| Melting point | ca. 23 °C |
| Enthalpy of fusion | ca. 96 kJ/kg |
| Thermal capacity (integral, 10–30 °C) | ca. 136 kJ/kg |
| Other features | Low-dusting |

The exact specifications can be found in the specification data sheet.



Electron micrograph of Micronal DS 5040 X. The powder particles consist of agglomerated microcapsules.



Areas of application

Micronal DS 5040 X is a microencapsulated phase-change material with a high thermal capacity that is used to store latent heat. It is the spray-dried version of Micronal DS 5030 X, which is supplied as an aqueous dispersion. It consists of microscopic polymer spheres with a core made from highly refined paraffin wax. Micronal DS 5040 X can be incorporated in products such as conventional, thick-layer plaster, plasterboard, fillers, floor screeds and concrete, etc., based on hydraulic and non-hydraulic binders. It can also be incorporated in wood products such as MDF and OSB and in coatings such as acrylic paints in order to increase their thermal capacity. It stores the latent heat that is absorbed when the wax in the microcapsules changes phase from solid to liquid, and the heat is released again when the wax solidifies. An advantage of the special microencapsulation process that is used to manufacture Micronal DS 5040 X is that the product is free of formaldehyde.

In interior applications, the aim is to keep the room temperature stable at 23 °C for a large part of the year in order to improve comfort and to reduce peak demand for cooling and heating.

Micronal DS 5040 X can be employed passively or in combination with an active cooling system. Phase-change materials are a useful element of climate control concepts, because they make it possible to store energy at the

time that it becomes available and then release it later when it is in demand. This enables energy to be managed more efficiently in processes such as geothermal cooling systems. Water or air can be used as the heat transfer medium when the process is reversed at night. The maximum loads on cooling systems can be reduced, which makes technical building services more energy-efficient. Ideally, active air conditioning can be dispersed with completely.

Notes on application I

It is essential that customers perform their own tests when products based on Micronal DS 5040 X are being manufactured and processed, because the compatibility of the various ingredients with each other, the curing behavior of hydraulic binders, their adhesion on different substrates and their material properties, etc., depend on numerous different factors that we are unable to cover exhaustively in our own tests.

Micronal DS 5040 X is supplied in bags with a net weight of 30 kg. As a protective measure, the powder is virtually dust-free. The usual precautions must be taken when working with products in powder form.

For transport and storage the product is subject to the regulations of class 4.2, packing group II.

A.2. Resultados individuais obtidos na caracterização da argamassa da fase experimental inicial

Absorção de água sob baixa pressão

| | Pedra | | | Betão | | | Tijolo | | | Adobe | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|------------|------------|--------|--------|--------|
| | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 | Tubo 1 | Tubo 2 | Tubo 3 |
| | 1h | 1h | 1h | - | - | - | 47min50seg | 9min20seg | 13min9seg | 45min | 45min | 45min |
| | - | - | - | - | - | - | - | 24min42seg | 31min16seg | - | - | - |
| | - | - | - | - | - | - | - | 41min0seg | 57min17seg | - | - | - |
| | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Abs. 1h (ml) | 0,25 | 0,2 | 0 | 4 | 4 | 4 | 1,2 | 3,9 | 3,2 | 1,1 | 1,1 | 1,1 |
| Média | 0,15 | | | 4 | | | 2,77 | | | 1,1 | | |
| DP | 0,13 | | | 0,00 | | | 1,40 | | | 0,00 | | |
| ca [kg/(m³.min^{1/2})] | 0,07 | 0,05 | 0,00 | 1,06 | 1,06 | 1,06 | 0,32 | 1,03 | 0,85 | 0,29 | 0,29 | 0,29 |
| Média | 0,04 | | | 1,06 | | | 0,73 | | | 0,29 | | |
| DP | 0,04 | | | 0,00 | | | 0,37 | | | 0,00 | | |

Análise granulométrica

| Peneiro | Malha [mm] | Resíduo retido | | | | | | Média | Passado |
|-------------------|--------------|----------------|------|--------|------|--------|------|-------|---------|
| | | 1,7954 | [%] | 1,7764 | [%] | 1,3373 | [%] | | |
| 3/8" | 9,5 | 0 | 0,0 | 0,0000 | 0,0 | 0,0000 | 0,0 | 0,0 | 100,0 |
| 4 | 4,75 | 0,0255 | 1,4 | 0,0123 | 0,7 | 0,0053 | 0,4 | 0,8 | 99,2 |
| 8 | 2,36 | 0,0640 | 3,6 | 0,0641 | 3,6 | 0,0343 | 2,6 | 3,2 | 95,9 |
| 16 | 1,19 | 0,1794 | 10,0 | 0,1877 | 10,6 | 0,1470 | 11,0 | 10,5 | 85,4 |
| 30 | 0,6 | 0,5427 | 30,2 | 0,6947 | 39,1 | 0,4645 | 34,7 | 34,7 | 50,7 |
| 50 | 0,3 | 0,5974 | 33,3 | 0,4814 | 27,1 | 0,4148 | 31,0 | 30,5 | 20,2 |
| 100 | 0,15 | 0,2778 | 15,5 | 0,2433 | 13,7 | 0,1987 | 14,9 | 14,7 | 5,6 |
| 200 | 0,075 | 0,0867 | 4,8 | 0,0763 | 4,3 | 0,0599 | 4,5 | 4,5 | 1,0 |
| Fundo | | 0,0177 | 1,0 | 0,0146 | 0,8 | 0,0119 | 0,9 | 0,9 | 0,1 |
| Totais (g) | | 1,7912 | 99,8 | 1,7744 | 99,9 | 1,3364 | 99,9 | 99,9 | 0,1 |

Resultados de baridade, consistência por espalhamento, consistência por penetrômetro, retenção de água e teor de água

| | Baridade [kg/dm ³] | Espalhamento [mm] | Penetrômetro [mm] | Retenção de água [%] | Teor de água [-] |
|----------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|------------------|
| | 1,16 | 185 | 2,45 | 66,07325 | 19,24 |
| | 1,16 | 180 | 2,30 | 68,07425 | 19,66 |
| | 1,18 | 182 | 2,30 | 68,41345 | 19,21 |
| Média | 1,17 | 182,3 | 2,35 | 67,52 | 19,37 |
| Desvio padrão | 0,01 | 2,5 | 0,1 | 1,26 | 0,25 |

Retração linear por secagem

| Alcock test | |
|-------------|------|
| L [mm] | 3,64 |
| % | 0,61 |

| Tabuleiros | | | | | | | | |
|------------|----------------|------|------|--------------|-------|-------|-------|------|
| | Dimensões [mm] | | | Retração [%] | | | Média | DP |
| L [mm] | 1,56 | 3,57 | 3,59 | 0,312 | 0,714 | 0,718 | 0,58 | 0,23 |
| C [mm] | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,315 | 0,315 | 0,315 | 0,32 | 0,00 |

| Prismáticos | | | | | | | | |
|-------------|----------------|-----|-----|--------------|------|------|-------|------|
| | Dimensões [mm] | | | Retração [%] | | | Média | DP |
| L [mm] | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,31 | 0,19 | 0,13 | 0,21 | 0,08 |

Massa volúmica aparente no estado endurecido

| Provete | Massas [g] | Dimensões base [mm] | | | | | | Comprimento [mm] | Volume [dm ³] | Massa volúmica [kg/dm ³] |
|---------|------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| | | Média | | | Média | | | | | |
| 1 | 443,609 | 39,31 | 39,56 | 39,44 | 39,73 | 39,83 | 39,78 | 158,48 | 0,249 | 1,78 |
| 2 | 440,126 | 40,00 | 39,21 | 39,61 | 39,50 | 39,11 | 39,31 | 158,71 | 0,247 | 1,78 |
| 3 | 444,340 | 39,56 | 39,15 | 39,36 | 39,62 | 39,91 | 39,77 | 158,00 | 0,247 | 1,80 |
| 4 | 431,950 | 39,18 | 39,75 | 39,47 | 39,54 | 39,96 | 39,75 | 158,72 | 0,249 | 1,73 |
| 5 | 443,963 | 40,68 | 38,67 | 39,68 | 39,84 | 39,73 | 39,79 | 159,19 | 0,251 | 1,77 |
| 6 | 434,888 | 38,48 | 39,50 | 38,99 | 39,83 | 39,75 | 39,79 | 159,32 | 0,247 | 1,76 |
| | | | | | | | | | Média | 1,77 |
| | | | | | | | | | Desvio Padrão | 0,02 |

Condutibilidade térmica de provetes de argamassa sobre tijolo em condições controladas

| Tijolo | λ [W/(m.K)] | | | | | | Média | Desvio Padrão | Média | Desvio Padrão |
|--------|---------------------|------|------|------|------|------|-------|---------------|-------|---------------|
| 1 | 0,96 | 0,73 | 0,90 | 0,99 | 0,78 | 0,92 | 0,88 | 0,10 | 0,924 | 0,089 |
| 2 | 0,89 | 1,03 | 0,98 | 1,00 | 0,96 | 0,97 | 0,97 | 0,05 | | |

Condutibilidade térmica em argamassa simples

| Tabuleiro de 1000 cm ² e 1,5 cm de espessura | | | | | | | Média | Desvio Padrão |
|---|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|
| Tabuleiro | λ [W/(m.K)] | | | | | Média | | |
| 1 | 0,929 | 0,957 | 0,925 | 0,812 | 0,937 | 0,017 | 0,940 | 0,007 |
| 2 | 0,99 | 0,877 | 0,936 | 0,899 | 0,934 | 0,057 | | |
| 3 | 0,959 | 0,92 | 0,964 | 0,926 | 0,948 | 0,024 | | |

| Prismas: 4cm x 4cm x 16cm | | | | | | | |
|---------------------------|---------------------|------|------|-------|---------------|-------|---------------|
| Prismas | λ [W/(m.K)] | | | Média | Desvio Padrão | Média | Desvio Padrão |
| 1 | 0,99 | 0,96 | 1,03 | 0,99 | 0,04 | 0,975 | 0,041 |
| 2 | 0,95 | 1,01 | 1,05 | 1,00 | 0,05 | | |
| 3 | 0,96 | 0,97 | 0,96 | 0,96 | 0,00 | | |
| 4 | 0,97 | 0,95 | 0,94 | 0,95 | 0,02 | | |
| 5 | 1,07 | 0,92 | 0,96 | 0,98 | 0,08 | | |
| 6 | 0,97 | 0,93 | 0,96 | 0,95 | 0,02 | | |

| Bolachas: 6cm de diâmetro e 2cm de espessura | | | | | | | |
|--|---------------------|-------|-------|-------|---------------|-------|---------------|
| Bolachas | λ [W/(m.K)] | | | Média | Desvio Padrão | Média | Desvio Padrão |
| 1 | 1,34 | 1,35 | 1,33 | 1,34 | 0,01 | 1,342 | 0,025 |
| 2 | 1,31 | 1,39 | 1,37 | 1,36 | 0,04 | | |
| 3 | 1,32 | 1,33 | 1,34 | 1,33 | 0,01 | | |
| Bolachas: 9cm de diâmetro e 1,5cm de espessura | | | | | | | |
| Bolachas | λ [W/(m.K)] | | | Média | Desvio Padrão | Média | Desvio Padrão |
| 1 | 0,804 | 0,838 | 0,866 | 0,836 | 0,031 | 0,849 | 0,033 |
| 2 | 0,850 | 0,854 | 0,876 | 0,860 | 0,014 | | |
| 3 | 0,883 | 0,906 | 0,910 | 0,900 | 0,015 | | |
| 4 | 0,836 | 0,823 | 0,867 | 0,842 | 0,023 | | |
| 5 | 0,867 | 0,846 | 0,859 | 0,857 | 0,011 | | |
| 6 | 0,788 | 0,800 | 0,812 | 0,800 | 0,012 | | |
| Bolachas: 9cm de diâmetro e 2cm de espessura | | | | | | | |
| Bolachas | λ [W/(m.K)] | | | Média | Desvio Padrão | Média | Desvio Padrão |
| 1 | 0,832 | 0,812 | 0,888 | 0,844 | 0,039 | 0,913 | 0,043 |
| 2 | 0,893 | 0,928 | 0,869 | 0,897 | 0,030 | | |
| 3 | 0,921 | 0,958 | 0,970 | 0,950 | 0,026 | | |
| 4 | 0,893 | 0,886 | 0,907 | 0,895 | 0,011 | | |
| 5 | 0,919 | 0,934 | 0,952 | 0,935 | 0,017 | | |
| 6 | 0,914 | 0,933 | 1,030 | 0,959 | 0,062 | | |

Módulo de elasticidade dos provetes de argamassa simples

| Provete | Massas [g] | Dimensões [mm] | | | Módulo de elasticidade [MPa] | | | | Módulo de elasticidade corrigido [MPa] | | | | Média | Desvio Padrão | |
|---------|------------|----------------|-------|--------|------------------------------|------|------|------|--|------|------|------|-------|---------------|--|
| 1 | 443,609 | 39,44 | 39,78 | 158,48 | 3720 | 3729 | 3703 | 3613 | 3758 | 3767 | 3741 | 3650 | 3729 | 53,81 | |
| 2 | 440,126 | 39,61 | 39,31 | 158,71 | 3624 | 3551 | 3657 | 3614 | 3661 | 3587 | 3694 | 3651 | 3649 | 44,77 | |
| 3 | 444,340 | 39,36 | 39,77 | 158,00 | 3666 | 3635 | 3638 | 3737 | 3704 | 3672 | 3675 | 3775 | 3707 | 47,92 | |
| 4 | 431,950 | 39,47 | 39,75 | 158,72 | 3381 | 3364 | 3712 | 3287 | 3416 | 3398 | 3750 | 3321 | 3471 | 190,42 | |
| 5 | 443,963 | 39,68 | 39,79 | 159,19 | 3597 | 3613 | 3566 | 3571 | 3634 | 3650 | 3603 | 3608 | 3624 | 22,38 | |
| 6 | 434,888 | 38,99 | 39,79 | 159,32 | 3445 | 3482 | 3427 | 3441 | 3480 | 3518 | 3462 | 3476 | 3484 | 23,71 | |
| | | | | | | | | | Média | | 3610 | | | | |
| | | | | | | | | | Desvio Padrão | | 128 | | | | |

Resistência a tração por flexão e à compressão

| Provete | Resistência à tração | | Resistência à compressão | |
|---------|----------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| | Força [N] | Rt [N/mm ²] | Força [N] | Rc [N/mm ²] |
| 1 | 116,248 | 0,27 | 1729,3 | 1,1 |
| 2 | 110,853 | 0,26 | 1776,8 | 1,1 |
| 3 | 128,651 | 0,30 | 1641,4 | 1,0 |
| 4 | 85,445 | 0,20 | 1719,4 | 1,1 |
| 5 | 118,723 | 0,28 | 1897,5 | 1,2 |
| 6 | 125,243 | 0,29 | 1513,0 | 0,9 |
| | Média | 0,3 | Média | 1,1 |
| | Desvio Padrão | 0,04 | Desvio Padrão | 0,08 |

Abrasão

| Escova dura | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----------------|---------------|-------|---------------|-------------------|-----------------|---------------|-------|---------------|---|
| Bolachas | | | | | Tijolo | | | | | |
| Massa inicial [g] | Massa final [g] | Diferença [g] | Média | Desvio Padrão | Massa inicial [g] | Massa final [g] | Diferença [g] | Média | Desvio Padrão | |
| 183,61 | 162,818 | 20,792 | 18,1 | 3,09 | 4675,5 | 4662,3 | 13,2 | 11,3 | 2,2 | |
| 171,622 | 152,937 | 18,685 | | | 4662,3 | 4653,5 | 8,8 | | | |
| 170,237 | 155,523 | 14,714 | | | 4653,5 | 4641,7 | 11,8 | | | |
| Escova média | | | | | | | | | | |
| Bolachas | | | | | Tijolo | | | | | |
| Massa inicial [g] | Massa final [g] | Diferença [g] | Média | Desvio Padrão | Massa inicial [g] | Massa final [g] | Diferença [g] | Média | Desvio Padrão | |
| 155,158 | 151,054 | 4,104 | 3,9 | 0,47 | 4595,2 | 4590,1 | 5,1 | 4,5 | 0,5 | |
| 185,542 | 182,168 | 3,374 | | | 4590,1 | 4586 | 4,1 | | | |
| 152,213 | 147,952 | 4,261 | | | 4586 | 4581,7 | 4,3 | | | |
| Escova macia | | | | | | | | | | |
| Bolachas | | | | | Tijolo | | | | | |
| Massa inicial [g] | Massa final [g] | Diferença [g] | Média | Desvio Padrão | Massa inicial [g] | Massa final [g] | Diferença [g] | Média | Desvio Padrão | |
| 162,368 | 162,096 | 0,272 | 0,3 | 0,02 | - | - | - | - | - | |
| 218,587 | 218,316 | 0,271 | | | - | - | - | - | - | - |
| 225,985 | 225,684 | 0,301 | | | - | - | - | - | - | - |

Aderência ao suporte

| | Tensão [MPa] | Diâmetro [mm] | | | Diâmetro médio [mm] | Área [mm ²] | Força, 50mm [N] | Tensão [MPa] | Média | Desvio Padrão |
|-------------------|--------------|---------------|-------|-------|---------------------|-------------------------|-----------------|--------------|-------|---------------|
| | | | | | | | | | | |
| Arg. Sobre tijolo | 0,16 | 48,7 | 49,08 | 48,81 | 48,86 | 1875,24 | 314,1593 | 0,168 | 0,15 | 0,03 |
| | 0,15 | 49,18 | 48,88 | 48,86 | 48,97 | 1883,69 | 294,5243 | 0,156 | | |
| | 0,11 | 48,35 | 48,68 | 48,92 | 48,65 | 1858,90 | 215,9845 | 0,116 | | |
| Adobe | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | 0,13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | |
| | 0,12 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | |
| Betão | 0,14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | 0,16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | |
| | 0,15 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | |
| Tijolo | 0,14 | 46,65 | 48,25 | 47,46 | 47,45 | 1768,57 | 274,89 | 0,16 | 0,15 | 0,02 |
| | 0,11 | 45,28 | 43,70 | 46,47 | 45,15 | 1601,05 | 215,98 | 0,13 | | |
| | 0,14 | 44,38 | 50,07 | 43,54 | 46,00 | 1661,66 | 274,89 | 0,17 | | |

Adsorção e desadsorção

| Tabuleiros de 1000cm ² e 1,5 cm de espessura | | | | | | | | | | | |
|---|------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------------|-----------|--------------------------------------|------------------------|
| Tempo [h] | Massa [kg] | | | | | | Média | Desvio Padrão | Diferença | Higroscopicidade [g/m ²] | Área [m ²] |
| 0 | 3,5266 | 3,5667 | | 3,5614 | | 3,5516 | 0,0218 | - | 0 | 0,10 | |
| 0,5 | 3,5307 | 3,5696 | | 3,5631 | | 3,5545 | 0,0208 | 2,90 | 29,0 | | |
| 1 | 3,5389 | 3,5703 | | 3,5636 | | 3,5576 | 0,0165 | 6,03 | 60,3 | | |
| 3 | 3,5403 | 3,5717 | | 3,5652 | | 3,5591 | 0,0166 | 7,50 | 75,0 | | |
| 6 | 3,5419 | 3,5732 | | 3,5667 | | 3,5606 | 0,0165 | 9,03 | 90,3 | | |
| 12 | 3,5434 | 3,5746 | | 3,5683 | | 3,5621 | 0,0165 | 10,53 | 105,3 | | |
| Bolachas com 9cm de diâmetro e 1,5 cm de espessura | | | | | | | | | | | |
| Tempo [h] | Massa [g] | | | | | | Média | Desvio Padrão | Diferença | Higroscopicidade [g/m ²] | Área [m ²] |
| 0 | 176,681 | 184,681 | 194,907 | 186,227 | 172,621 | 171,205 | 181,05 | 9,15 | - | 0 | 0,0056 |
| 0,5 | 176,747 | 184,664 | 194,986 | 186,298 | 172,689 | 171,229 | 181,10 | 9,16 | 0,05 | 8,7 | |
| 1 | 176,784 | 184,793 | 195,02 | 186,339 | 172,724 | 171,262 | 181,15 | 9,14 | 0,10 | 18,0 | |
| 3 | 176,87 | 184,899 | 195,171 | 186,432 | 172,822 | 171,36 | 181,26 | 9,17 | 0,21 | 36,9 | |
| 6 | 176,961 | 184,972 | 195,199 | 186,516 | 172,892 | 171,43 | 181,33 | 9,14 | 0,27 | 49,4 | |
| 12 | 177,078 | 185,085 | 195,332 | 186,639 | 173,01 | 171,464 | 181,43 | 9,15 | 0,38 | 68,5 | |
| Bolachas com 9cm de diâmetro e 2 cm de espessura | | | | | | | | | | | |
| Tempo [h] | Massa [g] | | | | | | Média | Desvio Padrão | Diferença | Higroscopicidade [g/m ²] | Área [m ²] |
| 0 | 226,487 | 222,191 | 237,834 | 214,979 | 219,657 | 234,375 | 225,92 | 8,79 | - | 0 | 0,0056 |
| 0,5 | 226,571 | 222,245 | 237,844 | 215,046 | 219,717 | 234,444 | 225,98 | 8,78 | 0,06 | 10,3 | |
| 1 | 226,626 | 222,332 | 237,889 | 215,061 | 219,943 | 234,473 | 226,05 | 8,03 | 0,13 | 24,0 | |
| 3 | 226,721 | 222,358 | 237,978 | 215,156 | 219,878 | 234,568 | 226,11 | 8,06 | 0,19 | 34,1 | |
| 6 | 226,778 | 222,451 | 238,062 | 215,224 | 219,873 | 234,646 | 226,17 | 8,06 | 0,25 | 45,3 | |
| 12 | 226,824 | 222,582 | 238,196 | 215,352 | 220,03 | 234,798 | 226,30 | 8,07 | 0,38 | 67,7 | |

Adsorção e desadsorção

| Desadsorção | | | | | | | | | | | |
|---|------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------------|-----------|--------------------------------------|------------------------|
| Tabuleiros de 1000cm ² e 1,5 cm de espessura | | | | | | | | | | | |
| Tempo [h] | Massa [kg] | | | | | | Média | Desvio Padrão | Diferença | Higroscopicidade [g/m ²] | Área [m ²] |
| 0 | 3,545 | 3,575 | 3,5699 | 3,5633 | 0,0161 | - | 0 | 0,10 | | | |
| 0,5 | 3,5434 | 3,5738 | 3,5687 | 3,5620 | 0,0163 | -1,33 | -13,3 | | | | |
| 1 | 3,5427 | 3,5728 | 3,5677 | 3,5611 | 0,0161 | -2,23 | -22,3 | | | | |
| 3 | 3,5408 | 3,5708 | 3,5657 | 3,5591 | 0,0161 | -4,20 | -42,0 | | | | |
| 6 | 3,539 | 3,5692 | 3,5639 | 3,5574 | 0,0161 | -5,93 | -59,3 | | | | |
| 12 | 3,5375 | 3,5678 | 3,5623 | 3,5559 | 0,0161 | -7,43 | -74,3 | | | | |
| Bolachas com 9cm de diâmetro e 1,5 cm de espessura | | | | | | | | | | | |
| Tempo [h] | Massa [g] | | | | | | Média | Desvio Padrão | Diferença | Higroscopicidade [g/m ²] | Área [m ²] |
| 0 | 177,198 | 185,234 | 195,505 | 186,786 | 171,554 | 173,007 | 181,55 | 9,25 | - | 0 | 0,0056 |
| 0,5 | 177,117 | 185,002 | 195,424 | 186,711 | 171,473 | 172,992 | 181,45 | 9,22 | -0,09 | -16,9 | |
| 1 | 177,089 | 184,946 | 195,375 | 186,658 | 171,338 | 172,873 | 181,38 | 9,17 | -0,17 | -30,1 | |
| 3 | 176,939 | 184,821 | 195,249 | 186,534 | 171,205 | 172,734 | 181,25 | 9,18 | -0,30 | -54,0 | |
| 6 | 176,781 | 184,773 | 195,118 | 186,419 | 170,99 | 172,596 | 181,11 | 9,19 | -0,43 | -78,2 | |
| 12 | 176,648 | 184,565 | 194,823 | 186,289 | 170,871 | 172,474 | 180,95 | 9,11 | -0,60 | -108,4 | |
| Bolachas com 9cm de diâmetro e 2 cm de espessura | | | | | | | | | | | |
| Tempo [h] | Massa [g] | | | | | | Média | Desvio Padrão | Diferença | Higroscopicidade [g/m ²] | Área [m ²] |
| 0 | 227,038 | 222,749 | 238,413 | 215,591 | 220,113 | 235,063 | 226,49 | 8,83 | - | 0 | 0,0056 |
| 0,5 | 227,009 | 222,74 | 238,316 | 215,479 | 220,046 | 234,977 | 226,43 | 8,82 | -0,07 | -12,0 | |
| 1 | 226,957 | 222,787 | 238,264 | 215,421 | 219,955 | 234,924 | 226,38 | 8,01 | -0,11 | -19,8 | |
| 3 | 226,793 | 222,577 | 238,147 | 215,289 | 219,828 | 234,798 | 226,24 | 8,05 | -0,26 | -46,0 | |
| 6 | 226,66 | 222,498 | 238,029 | 215,157 | 219,663 | 234,673 | 226,11 | 8,04 | -0,38 | -68,6 | |
| 12 | 226,482 | 222,267 | 237,864 | 215,013 | 219,487 | 234,492 | 225,93 | 8,07 | -0,56 | -100,8 | |

Capilaridade

| Impermeabilização lateral com resina epóxi | | | | | | | | |
|--|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------------------|
| Tempo [min^{0,5}] | Teor de água [g/m²] | | | | | | | |
| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | Média | Desvio Padrão |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 1,41 | 2,96 | 3,28 | 3,14 | 3,02 | 3,13 | 2,61 | 3,02 | 0,23 |
| 2,00 | 3,38 | 3,56 | 3,43 | 3,30 | 3,42 | 2,96 | 3,34 | 0,21 |
| 2,45 | 3,64 | 3,79 | 3,64 | 3,49 | 3,62 | 3,10 | 3,55 | 0,24 |
| 2,83 | 3,75 | 3,98 | 3,98 | 3,69 | 3,90 | 3,23 | 3,76 | 0,28 |
| 3,16 | 3,95 | 4,17 | 4,11 | 3,81 | 3,96 | 3,35 | 3,89 | 0,29 |
| 4,47 | 4,41 | 4,59 | 4,65 | 4,25 | 4,55 | 3,82 | 4,38 | 0,31 |
| 5,48 | 4,79 | 5,11 | 5,07 | 4,60 | 4,89 | 4,13 | 4,76 | 0,37 |
| 7,75 | 5,54 | 5,83 | 5,91 | 5,25 | 5,57 | 4,80 | 5,48 | 0,41 |
| 10,95 | 6,52 | 6,78 | 7,09 | 5,93 | 6,18 | 5,37 | 6,31 | 0,62 |
| 13,42 | 7,39 | 7,54 | 7,93 | 6,59 | 7,17 | 6,12 | 7,12 | 0,66 |
| 15,49 | 8,01 | 8,12 | 8,92 | 7,24 | 7,58 | 6,78 | 7,77 | 0,75 |
| 17,32 | 8,60 | 8,73 | 9,29 | 7,63 | 8,02 | 7,09 | 8,23 | 0,80 |
| 18,97 | 8,95 | 8,98 | 9,35 | 8,10 | 8,23 | 7,48 | 8,52 | 0,70 |
| 20,49 | 9,23 | 9,26 | 9,49 | 8,29 | 8,73 | 7,83 | 8,81 | 0,64 |
| 21,91 | 9,38 | 9,33 | 9,46 | 8,55 | 8,83 | 8,04 | 8,93 | 0,56 |
| 23,24 | 9,37 | 9,29 | 9,65 | 8,89 | 8,87 | 8,34 | 9,07 | 0,46 |
| CC | 0,55 | 0,50 | 0,57 | 0,46 | 0,49 | 0,41 | 0,50 | 0,06 |
| R² | 0,9828 | 0,9991 | 0,9869 | 0,998 | 0,9843 | 0,9816 | 0,9982 | |
| Impermeabilização lateral com película de polietileno | | | | | | | | |
| Tempo [min^{0,5}] | Teor de água [g/m²] | | | | | | | |
| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | Média | Desvio Padrão |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,0000 | 0,0000 |
| 1,41 | 3,58 | 4,09 | 3,91 | 4,17 | 3,93 | 3,88 | 3,9269 | 0,2069 |
| 2,00 | 4,18 | 4,64 | 4,48 | 4,79 | 4,61 | 4,48 | 4,5313 | 0,2066 |
| 2,45 | 4,45 | 5,06 | 4,82 | 5,02 | 4,81 | 4,67 | 4,8071 | 0,2247 |
| 2,83 | 4,83 | 5,37 | 5,17 | 5,40 | 5,22 | 5,12 | 5,1853 | 0,2048 |
| 3,16 | 5,12 | 5,77 | 5,58 | 5,74 | 5,56 | 5,42 | 5,5297 | 0,2376 |
| 4,47 | 6,13 | 6,83 | 6,58 | 6,99 | 6,40 | 6,45 | 6,5643 | 0,3100 |
| 5,48 | 6,93 | 7,58 | 7,28 | 7,74 | 7,01 | 7,03 | 7,2598 | 0,3370 |
| 7,75 | 8,52 | 9,48 | 8,98 | 9,49 | 8,53 | 8,55 | 8,9230 | 0,4690 |
| 10,95 | 10,27 | 11,24 | 10,64 | 10,87 | 10,80 | 10,49 | 10,7189 | 0,3341 |
| 13,67 | 10,83 | 11,69 | 10,93 | 11,25 | 11,54 | 11,27 | 11,2519 | 0,3350 |
| CC | 0,83 | 0,90 | 0,88 | 0,91 | 0,80 | 0,84 | 0,86 | 0,04 |
| R² | 0,9969 | 0,9982 | 0,9966 | 0,9956 | 0,9859 | 0,9944 | 0,997 | |

Capilaridade

| Sem impermeabilização lateral | | | | | |
|-------------------------------|----------------------------------|--------|--------|---------|---------------|
| Tempo [min ^{0,5}] | Teor de água [g/m ²] | | | | |
| | P1 | P2 | P3 | Média | Desvio Padrão |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 1,41 | 5,66 | 4,68 | 5,24 | 5,19 | 0,49 |
| 2,00 | 7,09 | 5,57 | 6,47 | 6,37 | 0,76 |
| 2,45 | 8,16 | 6,18 | 7,25 | 7,20 | 0,99 |
| 2,83 | 9,21 | 6,93 | 8,24 | 8,13 | 1,15 |
| 3,16 | 9,74 | 7,30 | 8,71 | 8,58 | 1,23 |
| 4,47 | 12,35 | 9,29 | 10,83 | 10,82 | 1,53 |
| 5,48 | 13,51 | 10,99 | 12,07 | 12,19 | 1,26 |
| 7,75 | 14,21 | 12,67 | 13,04 | 13,31 | 0,80 |
| 10,95 | 14,48 | 13,22 | 13,49 | 13,7313 | 0,6637 |
| CC | 2,19 | 1,51 | 1,83 | 1,84 | 0,34 |
| R ² | 0,9943 | 0,9931 | 0,9987 | 0,9966 | |

Secagem

| Impermeabilização lateral com resina epóxi | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|------|------|------|------|------|-------|------|--|
| Tempo [h] | Índice de Secagem [-] | | | | | | | Taxa de Secagem [kg/(m ² .h)] | | | | | | | | |
| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | Média | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | Média | | |
| 0 | - | - | - | - | - | - | | 9,37 | 9,29 | 9,65 | 8,89 | 8,87 | 8,34 | 9,07 | | |
| 1 | 12,63 | 13,02 | 13,54 | 12,14 | 11,97 | 11,55 | 12,48 | 8,64 | 8,66 | 8,83 | 7,95 | 8,12 | 7,56 | 8,29 | | |
| 2 | 11,92 | 12,38 | 12,73 | 11,29 | 11,27 | 10,78 | 11,73 | 8,36 | 8,41 | 8,54 | 7,70 | 7,87 | 7,28 | 8,02 | | |
| 3 | 11,50 | 11,96 | 12,28 | 10,89 | 10,88 | 10,35 | 11,31 | 8,03 | 8,09 | 8,21 | 7,40 | 7,57 | 6,96 | 7,71 | | |
| 4 | 11,08 | 11,54 | 11,83 | 10,49 | 10,50 | 9,92 | 10,89 | 7,76 | 7,83 | 7,94 | 7,15 | 7,32 | 6,69 | 7,45 | | |
| 5 | 10,69 | 11,15 | 11,41 | 10,13 | 10,13 | 9,51 | 10,50 | 7,47 | 7,55 | 7,63 | 6,89 | 7,05 | 6,40 | 7,17 | | |
| 14 | 77,90 | 81,87 | 82,60 | 74,22 | 73,68 | 67,04 | 76,22 | 4,87 | 5,00 | 4,89 | 4,54 | 4,57 | 3,85 | 4,62 | | |
| 17 | 18,33 | 19,66 | 19,25 | 17,69 | 17,40 | 14,98 | 17,89 | 3,85 | 4,04 | 3,86 | 3,63 | 3,66 | 3,03 | 3,68 | | |
| 41 | 89,84 | 95,05 | 89,44 | 85,39 | 86,59 | 70,74 | 86,17 | 1,49 | 1,42 | 1,22 | 1,30 | 1,45 | 1,03 | 1,32 | | |
| 65 | 40,27 | 38,88 | 33,17 | 35,70 | 39,32 | 28,74 | 36,01 | 0,90 | 0,81 | 0,66 | 0,76 | 0,87 | 0,62 | 0,77 | | |
| 89 | 25,63 | 23,88 | 20,98 | 22,27 | 24,99 | 18,62 | 22,73 | 0,62 | 0,56 | 0,53 | 0,53 | 0,61 | 0,45 | 0,55 | | |
| 113 | 18,62 | 17,56 | 16,23 | 16,43 | 18,35 | 14,51 | 16,95 | 0,49 | 0,45 | 0,39 | 0,42 | 0,48 | 0,38 | 0,44 | | |
| 137 | 15,31 | 14,87 | 13,61 | 13,92 | 15,18 | 13,03 | 14,32 | 0,42 | 0,40 | 0,38 | 0,38 | 0,42 | 0,36 | 0,40 | | |
| IS (137h) | 0,19 | 0,19 | 0,17 | 0,18 | 0,19 | 0,17 | 0,18 | TS | 0,31 | 0,29 | 0,32 | 0,28 | 0,29 | 0,29 | 0,30 | |
| Média | 0,18 | | | | | | | Média | 0,30 | | | | | | | |
| Desvio Padrão | 0,01 | | | | | | | Desvio Padrão | 0,01 | | | | | | | |

Secagem

| Impermeabilização lateral com película de polietileno | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|---------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| Tempo [h] | Índice de Secagem [-] | | | | | | | TS | Taxa de Secagem [kg/(m ² .h)] | | | | | | | |
| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | Média | | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | Média | |
| 0 | - | - | - | - | - | - | - | | 10,49 | 11,99 | 10,91 | 11,03 | 11,26 | 10,94 | 11,10 | |
| 1 | 15,10 | 17,67 | 15,64 | 16,36 | 16,70 | 15,75 | 16,20 | | 10,30 | 11,79 | 10,70 | 10,80 | 11,03 | 10,70 | 10,89 | |
| 2 | 14,85 | 17,40 | 15,37 | 16,06 | 16,39 | 15,44 | 15,92 | | 10,15 | 11,62 | 10,54 | 10,63 | 10,86 | 10,52 | 10,72 | |
| 3 | 14,63 | 17,14 | 15,12 | 15,80 | 16,12 | 15,17 | 15,66 | | 9,99 | 11,45 | 10,36 | 10,45 | 10,66 | 10,33 | 10,54 | |
| 4 | 14,37 | 16,87 | 14,85 | 15,51 | 15,81 | 14,86 | 15,38 | | 9,80 | 11,25 | 10,17 | 10,24 | 10,44 | 10,10 | 10,33 | |
| 5 | 14,12 | 16,60 | 14,59 | 15,21 | 15,50 | 14,56 | 15,09 | | 9,64 | 11,08 | 9,99 | 10,05 | 10,25 | 9,91 | 10,15 | |
| 6 | 13,87 | 16,33 | 14,33 | 14,93 | 15,21 | 14,27 | 14,82 | | 9,46 | 10,90 | 9,82 | 9,86 | 10,06 | 9,71 | 9,97 | |
| 15 | 101,11 | 120,08 | 103,57 | 108,49 | 107,90 | 101,55 | 11,90 | | 6,01 | 7,05 | 6,09 | 6,22 | 5,95 | 5,80 | 6,19 | |
| 39 | 144,91 | 181,28 | 144,49 | 157,97 | 140,40 | 136,54 | 6,29 | | 2,31 | 3,11 | 2,23 | 2,56 | 1,86 | 2,02 | 2,35 | |
| 63 | 56,33 | 86,84 | 55,17 | 67,07 | 47,15 | 50,95 | 2,52 | | 0,92 | 1,76 | 0,94 | 1,16 | 0,77 | 0,90 | 1,08 | |
| 87 | 25,48 | 54,86 | 26,28 | 33,47 | 22,10 | 25,26 | 1,30 | | 0,54 | 1,32 | 0,57 | 0,70 | 0,46 | 0,55 | 0,69 | |
| 111 | 16,51 | 43,57 | 17,43 | 21,50 | 15,02 | 16,93 | 0,91 | | 0,41 | 1,13 | 0,43 | 0,50 | 0,37 | 0,42 | 0,54 | |
| 135 | 13,21 | 38,14 | 13,89 | 15,81 | 12,42 | 13,49 | 0,74 | | 0,35 | 1,01 | 0,37 | 0,38 | 0,32 | 0,35 | 0,46 | |
| 159 | 11,99 | 35,54 | 12,54 | 13,14 | 11,48 | 12,12 | 0,67 | | 0,34 | 0,98 | 0,36 | 0,35 | 0,32 | 0,34 | 0,45 | |
| 183 | 11,74 | 34,74 | 12,19 | 12,36 | 11,35 | 11,80 | 0,65 | | 0,33 | 0,97 | 0,35 | 0,34 | 0,31 | 0,33 | 0,44 | |
| IS (135h) | 0,22 | 0,26 | 0,21 | 0,22 | 0,19 | 0,20 | 0,05 | TS | 0,30 | 0,33 | 0,32 | 0,32 | 0,36 | 0,34 | 0,33 | |
| Média | 0,22 | | | | | | | Média | 0,33 | | | | | | | |
| Desvio Padrão | 0,02 | | | | | | | Desvio Padrão | 0,02 | | | | | | | |

Secagem

| Sem impermeabilização lateral | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-----------------------|-------|--------|-------|---------------|--|-------|-------|-------|
| Tempo [h] | Índice de Secagem [-] | | | | TS | Taxa de Secagem [kg/(m ² .h)] | | | |
| | P1 | P2 | P3 | Média | | P1 | P2 | P3 | Média |
| 0 | - | - | - | - | | 14,40 | 12,94 | 13,25 | 13,53 |
| 1 | 21,04 | 18,59 | 19,57 | 19,73 | | 13,95 | 12,39 | 12,71 | 13,01 |
| 2 | 20,47 | 17,89 | 18,88 | 19,08 | | 13,63 | 11,99 | 12,34 | 12,66 |
| 3 | 20,00 | 16,84 | 18,29 | 18,38 | | 13,31 | 10,96 | 11,93 | 12,06 |
| 4 | 19,53 | 15,81 | 17,68 | 17,67 | | 13,00 | 10,59 | 11,53 | 11,71 |
| 5 | 19,11 | 15,20 | 17,04 | 17,12 | | 12,75 | 10,13 | 11,08 | 11,32 |
| 15 | 139,95 | 96,78 | 106,83 | 11,45 | | 6,11 | 3,06 | 3,10 | 4,09 |
| 39 | 130,00 | 63,73 | 66,12 | 3,61 | | 1,19 | 0,56 | 0,56 | 0,77 |
| 63 | 38,96 | 18,91 | 19,42 | 1,07 | | 1,00 | 0,52 | 0,51 | 0,68 |
| 87 | 32,21 | 17,55 | 17,84 | 0,94 | | 0,81 | 0,48 | 0,47 | 0,59 |
| 111 | 25,46 | 16,18 | 16,26 | 0,80 | | 0,62 | 0,44 | 0,43 | 0,50 |
| 135 | 18,71 | 14,81 | 14,66 | 0,67 | | 0,43 | 0,40 | 0,38 | 0,40 |
| 159 | 14,57 | 13,37 | 13,10 | 0,57 | | 0,39 | 0,36 | 0,34 | 0,36 |
| 183 | 13,08 | 11,90 | 11,59 | 0,51 | | 0,35 | 0,32 | 0,30 | 0,32 |
| IS (135h) | 0,17 | 0,12 | 0,12 | 0,04 | TS | 0,56 | 0,66 | 0,69 | 0,64 |
| Média | 0,14 | | | | Média | 0,64 | | | |
| Desvio Padrão | 0,03 | | | | Desvio Padrão | 0,07 | | | |

Coesão superficial

Massa inicial da fita cola (g)

0,139

| Inverno | Faixa Superior [g] | | | Matéria retida [g] | | | Média | DP |
|---------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,206 | 0,184 | 0,214 | 0,067 | 0,045 | 0,075 | 0,062 | 0,016 |
| Verão | Faixa Inferior [g] | | | Matéria retida [g] | | | Média | DP |
| | 0,227 | 0,206 | 0,226 | 0,088 | 0,067 | 0,087 | 0,081 | 0,012 |
| Verão | Faixa Superior [g] | | | Matéria retida [g] | | | Média | DP |
| | 0,176 | 0,192 | 0,214 | 0,037 | 0,053 | 0,075 | 0,055 | 0,019 |
| Verão | Faixa Inferior [g] | | | Matéria retida [g] | | | Média | DP |
| | 0,241 | 0,202 | 0,221 | 0,102 | 0,063 | 0,082 | 0,082 | 0,020 |

Velocidade de propagação dos ultrassons em argamassa aplicada sobre o tijolo

| Tijolo 1 | | | | | | | | | | | |
|----------------------|----------------|--------|------------------|--------|---------------|----------------------|----------------|--------|------------------|--------|---------------|
| Fixado no ponto A | | | | | | Fixado no ponto F | | | | | |
| Ponto | Distância [cm] | Dados | Velocidade [m/s] | Média | Desvio Padrão | Ponto | Distância [cm] | Dados | Velocidade [m/s] | Média | Desvio Padrão |
| B | 5 | 22,2 | 2252,3 | 2051,3 | 393,9 | A | 23,9 | 170,0 | 1403,2 | 1389,9 | 11,5 |
| | | 31,3 | 1597,4 | | | | | 172,4 | 1383,6 | | |
| | | 21,7 | 2304,1 | | | | | 172,5 | 1382,8 | | |
| C | 10 | 75,8 | 1319,3 | 1296,7 | 19,9 | B | 19,8 | 156,3 | 1270,0 | 1343,2 | 63,6 |
| | | 77,6 | 1288,7 | | | | | 144,3 | 1375,6 | | |
| | | 78,0 | 1282,1 | | | | | 143,4 | 1384,2 | | |
| D | 15 | 99,3 | 1510,6 | 1503,0 | 6,6 | C | 16,4 | 129,5 | 1266,5 | 1260,7 | 7,7 |
| | | 100,1 | 1498,5 | | | | | 129,8 | 1263,6 | | |
| | | 100,0 | 1500,0 | | | | | 131,0 | 1252,0 | | |
| E | 20 | 134,2 | 1490,3 | 1620,1 | 112,4 | D | 13,9 | 107,7 | 1293,3 | 1298,9 | 7,8 |
| | | 118,8 | 1683,5 | | | | | 107,5 | 1295,7 | | |
| | | 118,6 | 1686,3 | | | | | 106,5 | 1307,8 | | |
| F | 13 | 109,9 | 1182,9 | 1214,2 | 27,2 | E | 13,0 | 104,9 | 1239,3 | 1250,1 | 13,1 |
| | | 105,5 | 1232,2 | | | | | 104,3 | 1246,4 | | |
| | | 105,9 | 1227,6 | | | | | 102,8 | 1264,6 | | |
| G | 14 | 123,6 | 1126,9 | 1115,5 | 9,8 | F | 20,0 | 134,2 | 1490,3 | 1482,2 | 7,3 |
| | | 125,5 | 1109,8 | | | | | 135,5 | 1476,0 | | |
| | | 125,5 | 1109,8 | | | | | 135,1 | 1480,4 | | |
| H | 16 | 132,6 | 1236,9 | 1195,7 | 67,3 | G | 15,0 | 99,4 | 1509,1 | 1510,1 | 1,8 |
| | | 146,7 | 1118,0 | | | | | 99,2 | 1512,1 | | |
| | | 133,1 | 1232,2 | | | | | 99,4 | 1509,1 | | |
| I | 20 | 143,6 | 1382,3 | 1347,9 | 55,5 | H | 10,0 | 80,5 | 1242,2 | 1249,0 | 6,3 |
| | | 144,1 | 1377,5 | | | | | 80,0 | 1250,0 | | |
| | | 154,6 | 1283,9 | | | | | 79,7 | 1254,7 | | |
| J | 24 | 172,0 | 1386,8 | 1398,5 | 10,2 | I | 5,0 | 53,7 | 931,1 | 970,6 | 36,8 |
| | | 169,7 | 1405,6 | | | | | 51,2 | 976,6 | | |
| | | 170,0 | 1403,2 | | | | | 49,8 | 1004,0 | | |
| Média | | 1415,9 | | | | Média | | 1306,1 | | | |
| Desvio Padrão | | 297,9 | | | | Desvio Padrão | | 154,2 | | | |

Velocidade de propagação dos ultrassons em argamassa aplicada sobre o tijolo

| Tijolo 2 | | | | | | | | | | | |
|----------------------|----------------|--------|------------------|--------|---------------|----------------------|----------------|--------|------------------|--------|---------------|
| Fixado no ponto A | | | | | | Fixado no ponto F | | | | | |
| Ponto | Distância [cm] | Dados | Velocidade [m/s] | Média | Desvio Padrão | Ponto | Distância [cm] | Dados | Velocidade [m/s] | Média | Desvio Padrão |
| B | 5 | 37,6 | 1329,8 | 1347,7 | 50,3 | A | 23,9 | 171,9 | 1387,7 | 1423,1 | 63,5 |
| | | 38,2 | 1308,9 | | | | | 159,4 | 1496,5 | | |
| | | 35,6 | 1404,5 | | | | | 172,2 | 1385,2 | | |
| C | 10 | 80,6 | 1240,7 | 1262,4 | 22,4 | B | 19,8 | 148,6 | 1335,8 | 1332,3 | 12,8 |
| | | 79,3 | 1261,0 | | | | | 150,6 | 1318,0 | | |
| | | 77,8 | 1285,3 | | | | | 147,8 | 1343,0 | | |
| D | 15 | 99,8 | 1503,0 | 1505,1 | 9,2 | C | 16,4 | 124,4 | 1318,4 | 1322,0 | 9,1 |
| | | 100,2 | 1497,0 | | | | | 124,7 | 1315,3 | | |
| | | 99,0 | 1515,2 | | | | | 123,1 | 1332,3 | | |
| E | 20 | 131,6 | 1519,8 | 1528,3 | 10,2 | D | 13,9 | 114,1 | 1220,7 | 1216,1 | 4,8 |
| | | 131,1 | 1525,6 | | | | | 115,0 | 1211,2 | | |
| | | 129,9 | 1539,6 | | | | | 114,5 | 1216,5 | | |
| F | 13 | 118,0 | 1101,7 | 1070,4 | 27,3 | E | 13,0 | 111,2 | 1169,1 | 1175,4 | 6,4 |
| | | 122,9 | 1057,8 | | | | | 110,0 | 1181,8 | | |
| | | 123,6 | 1051,8 | | | | | 110,6 | 1175,4 | | |
| G | 14 | 121,3 | 1148,3 | 1142,9 | 5,2 | F | 20,0 | 137,5 | 1454,5 | 1547,3 | 80,3 |
| | | 121,9 | 1142,6 | | | | | 125,4 | 1594,9 | | |
| | | 122,4 | 1137,9 | | | | | 125,6 | 1592,4 | | |
| H | 16 | 126,6 | 1295,5 | 1290,1 | 4,8 | G | 15,0 | 104,2 | 1439,5 | 1440,0 | 2,1 |
| | | 127,5 | 1286,4 | | | | | 104,0 | 1442,3 | | |
| | | 127,3 | 1288,4 | | | | | 104,3 | 1438,2 | | |
| I | 20 | 147,6 | 1344,8 | 1386,0 | 72,1 | H | 10,0 | 71,3 | 1402,5 | 1401,2 | 6,0 |
| | | 135,1 | 1469,2 | | | | | 71,7 | 1394,7 | | |
| | | 147,7 | 1343,9 | | | | | 71,1 | 1406,5 | | |
| J | 24 | 159,3 | 1497,4 | 1494,6 | 2,5 | I | 5,0 | 38,8 | 1288,7 | 1301,1 | 13,7 |
| | | 159,7 | 1493,7 | | | | | 38,0 | 1315,8 | | |
| | | 159,8 | 1492,7 | | | | | 38,5 | 1298,7 | | |
| Média | | 1336,4 | | | | Média | | 1350,9 | | | |
| Desvio Padrão | | 157,4 | | | | Desvio Padrão | | 114,8 | | | |

Velocidade de propagação dos ultrassons em argamassa aplicada sobre os muretes

| | Distância [cm] | Pedra | Velocidade [m/s] | Média | Desvio Padrão | Betão | Velocidade [m/s] | Média | Desvio Padrão | Adobe | Velocidade [m/s] | Média | Desvio Padrão | Tijolo | Velocidade [m/s] | Média | Desvio Padrão |
|----------|----------------------|-------|------------------|-------|----------------------|-------|------------------|-------|----------------------|-------|------------------|-------|----------------------|--------|------------------|--------|---------------|
| Medida 1 | 6 | 82,7 | 725,5 | 693,7 | 53,3 | 95,3 | 629,6 | 641,6 | 9,0 | 102,0 | 588,2 | 593,3 | 4,1 | 57,9 | 1036,3 | 1061,1 | 26,5 |
| | | 81,7 | 734,4 | | | 92,3 | 650,1 | | | 101,1 | 593,5 | | | 55,1 | 1088,9 | | |
| | | 86,0 | 697,7 | | | 93,7 | 640,3 | | | 100,3 | 598,2 | | | 56,7 | 1058,2 | | |
| | | 97,2 | 617,3 | | | 92,8 | 646,6 | | | 101,1 | 593,5 | | | | | | |
| | 8 | 111,2 | 719,4 | 729,1 | 11,0 | 124,8 | 641,0 | 638,6 | 1,7 | 114,5 | 698,7 | 698,3 | 7,2 | 75,5 | 1059,6 | 1060,5 | 2,9 |
| | | 110,3 | 725,3 | | | 125,3 | 638,5 | | | 113,1 | 707,3 | | | 75,6 | 1058,2 | | |
| | | 107,4 | 744,9 | | | 125,4 | 638,0 | | | 116,0 | 689,7 | | | 75,2 | 1063,8 | | |
| | | 110,1 | 726,6 | | | 125,6 | 636,9 | | | 114,7 | 697,5 | | | | | | |
| | 10 | 137,8 | 725,7 | 729,1 | 2,2 | 155,7 | 642,3 | 641,9 | 1,3 | 143,8 | 695,4 | 696,4 | 1,9 | 77,9 | 1283,7 | 1283,7 | 0,0 |
| | | 138,8 | 720,5 | | | 156,0 | 641,0 | | | 144,0 | 694,4 | | | 77,9 | 1283,7 | | |
| | | 138,5 | 722,0 | | | 156,1 | 640,6 | | | 143,5 | 696,9 | | | 77,9 | 1283,7 | | |
| | | 138,3 | 723,1 | | | 155,4 | 643,5 | | | 143,1 | 698,8 | | | | | | |
| | 12 | 151,4 | 792,6 | 722,8 | 19,4 | 187,9 | 638,6 | 640,5 | 1,7 | 168,5 | 712,2 | 714,7 | 1,7 | 95,3 | 1259,2 | 1266,3 | 8,2 |
| | | 159,4 | 752,8 | | | 187,1 | 641,4 | | | 167,7 | 715,6 | | | 94,1 | 1275,2 | | |
| | | 159,0 | 754,7 | | | 186,8 | 642,4 | | | 167,8 | 715,1 | | | 94,9 | 1264,5 | | |
| | | 159,2 | 753,8 | | | 187,6 | 639,7 | | | 167,6 | 716,0 | | | | | | |
| | Média | 727,3 | | | Média | 640,6 | | | Média | 675,7 | | | Média | 1167,9 | | | |
| | Desvio Padrão | 36,4 | | | Desvio Padrão | 4,4 | | | Desvio Padrão | 49,8 | | | Desvio Padrão | 112,7 | | | |

Velocidade de propagação dos ultrassons em argamassa aplicada sobre os muretes

| | Distância [cm] | Pedra | Velocidade [m/s] | Média | Desvio Padrão | Betão | Velocidade [m/s] | Média | Desvio Padrão | Adobe | Velocidade [m/s] | Média | Desvio Padrão | Tijolo | Velocidade [m/s] | Média | Desvio Padrão |
|-----------------|----------------------|-------|------------------|----------------------|---------------|-------|----------------------|-------|---------------|----------------------|------------------|-------|----------------------|--------|------------------|--------|---------------|
| Medida 2 | 6 | 99,7 | 601,8 | 604,7 | 2,8 | 97,9 | 612,9 | 619,7 | 4,6 | 105,1 | 570,9 | 570,9 | 0,9 | 55,8 | 1036,3 | 1061,1 | 26,5 |
| | | 98,7 | 607,9 | | | 96,5 | 621,8 | | | 105,1 | 570,9 | | | 65,3 | 1088,9 | | |
| | | 99,5 | 603,0 | | | 96,6 | 621,1 | | | 105,3 | 569,8 | | | 57,6 | 1058,2 | | |
| | | 99,0 | 606,1 | | | 96,3 | 623,1 | | | 104,9 | 572,0 | | | | | | |
| | 8 | 105,6 | 757,6 | 761,2 | 2,4 | 120,4 | 664,5 | 664,9 | 3,2 | 125,7 | 636,4 | 634,9 | 1,2 | 67,8 | 1059,6 | 1060,5 | 2,9 |
| | | 105,0 | 761,9 | | | 121,1 | 660,6 | | | 126,3 | 633,4 | | | 67,5 | 1058,2 | | |
| | | 104,9 | 762,6 | | | 120,0 | 666,7 | | | 126,0 | 634,9 | | | 67,8 | 1063,8 | | |
| | | 104,9 | 762,6 | | | 119,8 | 667,8 | | | 126,0 | 634,9 | | | | | | |
| | 10 | 118,3 | 845,3 | 848,0 | 3,0 | 153,6 | 651,0 | 652,4 | 1,2 | 141,3 | 707,7 | 710,5 | 2,0 | 86,3 | 1283,7 | 1283,7 | 0,0 |
| | | 118,2 | 846,0 | | | 153,4 | 651,9 | | | 140,6 | 711,2 | | | 81,9 | 1283,7 | | |
| | | 117,8 | 848,9 | | | 153,0 | 653,6 | | | 140,7 | 710,7 | | | 86,1 | 1283,7 | | |
| | | 117,4 | 851,8 | | | 153,1 | 653,2 | | | 140,4 | 712,3 | | | | | | |
| | 12 | 153,0 | 784,3 | 782,9 | 1,1 | 162,7 | 737,6 | 734,2 | 6,4 | 167,4 | 716,8 | 722,8 | 4,3 | 91,8 | 1259,2 | 1266,3 | 8,2 |
| | | 153,2 | 783,3 | | | 162,6 | 738,0 | | | 166,1 | 722,5 | | | 102,3 | 1275,2 | | |
| | | 153,4 | 782,3 | | | 165,6 | 724,6 | | | 165,3 | 726,0 | | | 102,1 | 1264,5 | | |
| | | 153,5 | 781,8 | | | 162,9 | 736,6 | | | 165,3 | 726,0 | | | | | | |
| | Média | 749,2 | | Média | 667,8 | | Média | 659,8 | | Média | 1167,9 | | Média | 1167,9 | | | |
| | Desvio Padrão | 92,3 | | Desvio Padrão | 43,3 | | Desvio Padrão | 63,4 | | Desvio Padrão | 112,7 | | Desvio Padrão | 112,7 | | | |

Dureza e Resistências superficiais

| | Durómetro [grau Shore A] | | | | | Esclerómetro Pendular [grau Vickers] | | | | Resistência ao choque da esfera [mm] | | | | | | | | |
|----------------------|--------------------------|-------|-------|--------|-------------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|--------------------------------------|---------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|
| | Pedra | Betão | Adobe | Tijolo | Arg. sobre tijolo | | Pedra | Betão | Adobe | Tijolo | Inverno | | | | Verão | | | |
| | | | | | | | | | | | Pedra | Betão | Adobe | Tijolo | Pedra | Betão | Adobe | Tijolo |
| | 58 | 90 | 90 | 82 | 86 | 74 | 45 | 35 | 38 | 45 | 23,49 | 19,97 | 21,77 | 19,03 | 16,01 | 18,30 | 18,52 | 17,00 |
| | 72 | 75 | 85 | 85 | 93 | 82 | 38 | 46 | 38 | 38 | 19,56 | 19,31 | 20,70 | 17,90 | 14,44 | 16,81 | 19,89 | 17,77 |
| | 64 | 84 | 80 | 86 | 71 | 77 | 25 | 48 | 36 | 38 | 19,67 | 19,58 | 21,05 | 18,18 | 14,58 | 19,34 | 20,28 | 18,25 |
| | 63 | 80 | 88 | 88 | 78 | 82 | 28 | 43 | 38 | 36 | 19,95 | 20,84 | 21,99 | 18,15 | 17,50 | 17,80 | 16,84 | 19,69 |
| | 85 | 90 | 78 | 82 | 75 | 83 | 35 | 45 | 36 | 36 | 20,41 | 19,03 | 19,60 | 19,26 | 16,50 | 17,39 | 18,96 | 16,59 |
| | 80 | 90 | 78 | 90 | 67 | 89 | 30 | 46 | 43 | 40 | 20,77 | 20,50 | 20,49 | 19,92 | 15,20 | 16,34 | 16,71 | 16,99 |
| | 80 | 80 | 82 | 85 | 78 | 78 | 25 | 40 | 40 | 45 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 85 | 90 | 75 | 82 | 84 | 79 | 30 | 38 | 37 | 36 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 80 | 78 | 86 | 85 | 73 | 86 | 40 | 40 | 40 | 38 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 75 | 85 | 81 | 84 | 84 | 87 | 34 | 40 | 36 | 50 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 76 | 86 | 78 | 82 | 80 | 78 | 31 | 45 | 40 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 76 | 83 | 83 | 92 | 87 | 80 | 33 | 40 | 38 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Média | 75 | 84 | 82 | 85 | 80 | | 33 | 42 | 38 | 40 | 20,64 | 19,87 | 20,93 | 18,74 | 15,71 | 17,66 | 18,53 | 17,72 |
| Desvio Padrão | 9 | 5 | 5 | 3 | 6 | | 6 | 4 | 2 | 5 | 1,47 | 0,70 | 0,88 | 0,79 | 1,19 | 1,08 | 1,50 | 1,14 |

A.3. Resultados individuais obtidos na caracterização das argamassas formuladas em laboratório

Estado fresco

| Argamassa | Espalhamento [mm] | Média | Dp | Massa volúmica [kg/dm ³] |
|-----------------|-------------------|-------|------|--------------------------------------|
| P | 162 | 161,5 | 0,71 | 2 |
| | 161 | | | |
| FS | 166 | 168 | 2,83 | 2,04 |
| | 170 | | | |
| FS_PCM20 | 172 | 171,5 | 0,71 | 1,44 |
| | 171 | | | |
| CS | 120 | 119 | 1,41 | 2,04 |
| | 118 | | | |
| CS_PCM20 | 142 | 142 | 0,00 | 1,72 |
| | 142 | | | |
| CS45_FS30 | 168 | 168 | 0,00 | 2,06 |
| | 168 | | | |
| CS30_FS45 | 168 | 167,5 | 0,71 | 2,06 |
| | 167 | | | |
| CS30_FS25_PCM20 | 166 | 167 | 1,41 | 1,46 |
| | 168 | | | |
| CS30_FS15_PCM30 | 151 | 151,5 | 0,71 | 1,43 |
| | 152 | | | |
| CS30_FS45_F5 | 193 | 192,5 | 0,71 | 2 |
| | 192 | | | |

Baridade da argamassa P e constituintes

| | Baridade [kg/dm ³] | | | | | |
|--------------|--------------------------------|--------|------|------|--------|------|
| | Argamassa Pré-doseada | Argila | AF | AG | Fibras | PCM |
| | 1,55 | 1,45 | 1,50 | 1,50 | 0,07 | 1,03 |
| | 1,53 | 1,48 | 1,49 | 1,50 | 0,06 | 1,01 |
| | 1,55 | 1,46 | 1,50 | 1,50 | 0,07 | 1,01 |
| Média | 1,54 | 1,46 | 1,50 | 1,50 | 0,07 | 1,02 |
| DP | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |

Análise granulométrica

Resíduo retido [g] - Amostra de argamassa pré-doseada P

| Peneiro | Malha [mm] | 0,8787 | [%] | 1,4787 | [%] | 1,3884 | [%] | Média | Passado |
|-------------------|------------|--------|------|--------|------|--------|------|-------|----------|
| 3/8" | 9,5 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0,0 | 100 |
| 4 | 4,75 | 0,0004 | 0,0 | 0,0007 | 0,0 | 0,0022 | 0,2 | 0,1 | 99,91623 |
| 8 | 2,36 | 0,0101 | 1,1 | 0,0187 | 1,3 | 0,0177 | 1,3 | 1,2 | 98,6866 |
| 16 | 1,19 | 0,0628 | 7,1 | 0,1221 | 8,3 | 0,0869 | 6,3 | 7,2 | 91,46554 |
| 30 | 0,6 | 0,1404 | 16,0 | 0,2799 | 18,9 | 0,2147 | 15,5 | 16,8 | 74,67528 |
| 50 | 0,3 | 0,4537 | 51,6 | 0,7919 | 53,6 | 0,8471 | 61,0 | 55,4 | 19,27542 |
| 100 | 0,15 | 0,1629 | 18,5 | 0,2108 | 14,3 | 0,1595 | 11,5 | 14,8 | 4,514566 |
| 200 | 0,075 | 0,0252 | 2,9 | 0,0276 | 1,9 | 0,0314 | 2,3 | 2,3 | 2,182575 |
| Fundo | | 0,0223 | 2,5 | 0,0250 | 1,7 | 0,0271 | 2,0 | 2,1 | 0,122441 |
| Totais [g] | | 0,8778 | 99,9 | 1,4767 | 99,9 | 1,3866 | 99,9 | 99,9 | |

Resíduo retido [g] - Amostra de argila

| Peneiro | Malha [mm] | 1,1046 | [%] | 0,9592 | [%] | 1,8939 | [%] | Média | Passado |
|-------------------|------------|--------|-------|--------|------|--------|-------|-------|---------|
| 3/8" | 9,5 | 0 | 0,0 | 0,0000 | 0,0 | 0,0000 | 0,00 | 0,0 | 100 |
| 4 | 4,75 | 0,0000 | 0,0 | 0,0000 | 0,0 | 0,0000 | 0,00 | 0,0 | 100,0 |
| 8 | 2,36 | 0,0228 | 2,1 | 0,0203 | 2,1 | 0,0445 | 2,35 | 2,2 | 97,8 |
| 16 | 1,19 | 0,2396 | 21,7 | 0,2363 | 24,6 | 0,4705 | 24,84 | 23,7 | 74,1 |
| 30 | 0,6 | 0,2802 | 25,4 | 0,2236 | 23,3 | 0,5675 | 29,96 | 26,2 | 47,9 |
| 50 | 0,3 | 0,2313 | 20,9 | 0,2202 | 23,0 | 0,3498 | 18,47 | 20,8 | 27,1 |
| 100 | 0,15 | 0,1416 | 12,8 | 0,1159 | 12,1 | 0,1865 | 9,85 | 11,6 | 15,5 |
| 200 | 0,075 | 0,0976 | 8,8 | 0,0708 | 7,4 | 0,1529 | 8,07 | 8,1 | 7,4 |
| Fundo | | 0,0912 | 8,3 | 0,0709 | 7,4 | 0,1168 | 6,17 | 7,3 | 0,1 |
| Totais [g] | | 1,1043 | 100,0 | 0,9580 | 99,9 | 1,8885 | 99,7 | 99,9 | |

Resíduo retido [g] - Amostra de areia AF

| Peneiro | Malha [mm] | 1,3512 | [%] | 0,7256 | [%] | 0,9805 | [%] | Média | Passado |
|-------------------|------------|--------|------|--------|------|--------|-------|-------|---------|
| 3/8" | 9,5 | 0 | 0,0 | 0,0000 | 0,0 | 0 | 0,00 | 0,0 | 100 |
| 4 | 4,75 | 0,0008 | 0,1 | 0,0007 | 0,1 | 0,0014 | 0,14 | 0,1 | 99,9 |
| 8 | 2,36 | 0,0045 | 0,3 | 0,0022 | 0,3 | 0,0026 | 0,27 | 0,3 | 99,6 |
| 16 | 1,19 | 0,0216 | 1,6 | 0,0138 | 1,9 | 0,0134 | 1,37 | 1,6 | 98,0 |
| 30 | 0,6 | 0,1898 | 14,0 | 0,1178 | 16,2 | 0,1196 | 12,20 | 14,2 | 83,8 |
| 50 | 0,3 | 0,9412 | 69,7 | 0,4852 | 66,9 | 0,6407 | 65,34 | 67,3 | 16,5 |
| 100 | 0,15 | 0,1818 | 13,5 | 0,0995 | 13,7 | 0,1842 | 18,79 | 15,3 | 1,2 |
| 200 | 0,075 | 0,0084 | 0,6 | 0,0037 | 0,5 | 0,0096 | 0,98 | 0,7 | 0,5 |
| Fundo | | 0,0023 | 0,2 | 0,0011 | 0,2 | 0,0027 | 0,28 | 0,2 | 0,3 |
| Totais [g] | | 1,3504 | 99,9 | 0,7240 | 99,8 | 0,9742 | 99,36 | 99,7 | |

Análise granulométrica

Resíduo retido [g] - Amostra de areia AG

| Peneiro | Malha [mm] | 0,54 | [%] | 0,6686 | [%] | 0,948 | [%] | Média | Passado |
|-------------------|------------|--------|------|--------|------|--------|-------|-------|---------|
| 3/8" | 9,5 | 0 | 0,0 | 0,0000 | 0,0 | 0,0000 | 0,00 | 0,0 | 100 |
| 4 | 4,75 | 0,0012 | 0,2 | 0,0014 | 0,2 | 0,0027 | 0,28 | 0,2 | 99,8 |
| 8 | 2,36 | 0,0571 | 10,6 | 0,0817 | 12,2 | 0,1014 | 10,70 | 11,2 | 88,6 |
| 16 | 1,19 | 0,1649 | 30,5 | 0,2814 | 42,1 | 0,2829 | 29,84 | 34,2 | 54,4 |
| 30 | 0,6 | 0,2039 | 37,8 | 0,1849 | 27,7 | 0,3512 | 37,05 | 34,2 | 20,3 |
| 50 | 0,3 | 0,0895 | 16,6 | 0,0844 | 12,6 | 0,1614 | 17,03 | 15,4 | 4,9 |
| 100 | 0,15 | 0,0181 | 3,4 | 0,0272 | 4,1 | 0,0364 | 3,84 | 3,8 | 1,1 |
| 200 | 0,075 | 0,0035 | 0,6 | 0,0061 | 0,9 | 0,0094 | 0,99 | 0,9 | 0,3 |
| <i>Fundo</i> | | 0,0004 | 0,1 | 0,0009 | 0,1 | 0,0018 | 0,19 | 0,1 | 0,1 |
| Totais [g] | | 0,5386 | 99,7 | 0,6680 | 99,9 | 0,9472 | 99,9 | 99,9 | |

Resíduo retido [g] - Amostra de PCM

| Peneiro | Malha [mm] | 0,54 | [%] | 0,65 | [%] | 0,45 | [%] | Média | Passado |
|-------------------|------------|--------|------|--------|-----|--------|-------|-------|---------|
| 3/8" | 9,5 | 0 | 0,0 | 0,0000 | 0,0 | 0,0000 | 0,00 | 0,0 | 100 |
| 4 | 4,75 | 0,0000 | 0,0 | 0,0000 | 0,0 | 0,0000 | 0,00 | 0,0 | 100,0 |
| 8 | 2,36 | 0,0000 | 0,0 | 0,0000 | 0,0 | 0,0000 | 0,00 | 0,0 | 100,0 |
| 16 | 1,19 | 0,0000 | 0,0 | 0,0000 | 0,0 | 0,0000 | 0,00 | 0,0 | 100,0 |
| 30 | 0,6 | 0,0000 | 0,0 | 0,0000 | 0,0 | 0,0000 | 0,00 | 0,0 | 100,0 |
| 50 | 0,3 | 0,0230 | 4,3 | 0,0250 | 3,7 | 0,1614 | 17,03 | 8,3 | 91,7 |
| 100 | 0,15 | 0,0250 | 4,6 | 0,0320 | 4,8 | 0,2800 | 29,54 | 13,0 | 78,7 |
| 200 | 0,075 | 0,0040 | 0,7 | 0,0046 | 0,7 | 0,0094 | 0,99 | 0,8 | 77,9 |
| <i>Fundo</i> | | 0,0023 | 0,4 | 0,0029 | 0,4 | 0,0018 | 0,19 | 0,3 | 77,5 |
| Totais [g] | | 0,0543 | 10,1 | 0,0645 | 9,6 | 0,4526 | 47,7 | 22,5 | |

Retração linear por secagem

| Argamassa | Diâmetro [mm] | | Média | Diâmetro inicial [mm] | Diferença [mm] | Retração |
|------------------------|------------------------|-------|--------|-----------------------|----------------|----------|
| P | 80,56 | 80,56 | 80,56 | 84,13 | 3,57 | 4,24 |
| | 80,52 | 81,16 | 80,84 | | 3,61 | 3,91 |
| | 81,37 | 80,73 | 81,05 | | 2,76 | 3,66 |
| | | | | | Média | 3,94 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,29 |
| FS | 79,97 | 80,93 | 80,45 | 84,13 | 3,68 | 4,37 |
| | 81,63 | 80,47 | 81,05 | | 3,08 | 3,66 |
| | 80,54 | 80,89 | 80,715 | | 3,41 | 4,06 |
| | | | | | Média | 4,03 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,36 |
| FS_PCM20 | 79,87 | 80,3 | 80,085 | 84,13 | 4,04 | 4,81 |
| | 80,37 | 80,09 | 80,23 | | 3,90 | 4,64 |
| | 79,8 | 80,17 | 79,985 | | 4,15 | 4,93 |
| | | | | | Média | 4,79 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,15 |
| CS_PCM20 | 79,72 | 79,8 | 79,76 | 84,13 | 4,37 | 5,19 |
| | 79,52 | 79,54 | 79,53 | | 4,60 | 5,47 |
| | 80,03 | 79,45 | 79,74 | | 4,39 | 5,22 |
| | | | | | Média | 5,29 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,15 |
| CS45_FS30 | Não apresenta retração | | | | | |
| CS30_FS45 | Não apresenta retração | | | | | |
| CS30_FS25_PCM20 | 79,75 | 80,13 | 79,94 | 84,13 | 4,19 | 4,98 |
| | 80,05 | 79,91 | 79,98 | | 4,15 | 4,93 |
| | 80,36 | 79,81 | 80,085 | | 4,04 | 4,81 |
| | | | | | Média | 4,91 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,09 |
| CS30_FS15_PCM30 | 79,59 | 79,09 | 79,34 | 84,13 | 4,79 | 5,69 |
| | 78,15 | 79,23 | 78,69 | | 5,44 | 6,47 |
| | 79,18 | 79,94 | 79,56 | | 4,57 | 5,43 |
| | | | | | Média | 5,86 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,54 |
| CS30_FS45_F5 | Não apresenta retração | | | | | |

Massa volúmica aparente no estado endurecido

| Argamassa | Provete | Massas [g] | Dimensões base [mm] | | | | | | Compr. [mm] | Volume [dm ³] | MV [kg/dm ³] |
|-----------------|---------|------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|---------------------------|--------------------------|
| | | | Média | | | Média | | | | | |
| P | 1 | 467,21 | 40,20 | 40,64 | 40,42 | 39,11 | 40,58 | 39,85 | 164,00 | 0,26 | 1,77 |
| | 2 | 450,54 | 39,73 | 39,89 | 39,81 | 40,14 | 40,44 | 40,29 | 159,00 | 0,26 | 1,77 |
| | 3 | 456,51 | 39,98 | 40,17 | 40,08 | 40,87 | 40,18 | 40,53 | 159,00 | 0,26 | 1,77 |
| | | | | | | | | | | Média | 1,77 |
| | | | | | | | | | | Desvio Padrão | 0,00 |
| FS | 1 | 465,11 | 39,85 | 39,90 | 39,88 | 40,56 | 40,88 | 40,72 | 160,00 | 0,26 | 1,79 |
| | 2 | 462,25 | 39,64 | 39,97 | 39,81 | 40,45 | 40,91 | 40,68 | 159,00 | 0,26 | 1,80 |
| | 3 | 455,27 | 40,32 | 40,61 | 40,47 | 40,24 | 40,52 | 40,38 | 159,00 | 0,26 | 1,75 |
| | | | | | | | | | | Média | 1,78 |
| | | | | | | | | | | Desvio Padrão | 0,02 |
| FS_PCM20 | 1 | 302,04 | 39,05 | 39,08 | 39,07 | 40,14 | 39,66 | 39,90 | 160,00 | 0,25 | 1,21 |
| | 2 | 302,90 | 39,39 | 39,32 | 39,36 | 39,28 | 39,75 | 39,52 | 160,50 | 0,25 | 1,21 |
| | 3 | 272,78 | 39,09 | 39,89 | 39,49 | 38,44 | 38,89 | 38,67 | 158,50 | 0,24 | 1,13 |
| | | | | | | | | | | Média | 1,18 |
| | | | | | | | | | | Desvio Padrão | 0,05 |
| CS | 1 | 468,07 | 40,02 | 40,06 | 40,04 | 41,00 | 40,87 | 40,94 | 160,00 | 0,26 | 1,78 |
| | 2 | 460,99 | 40,00 | 40,11 | 40,06 | 40,63 | 40,41 | 40,52 | 159,50 | 0,26 | 1,78 |
| | 3 | 463,63 | 40,04 | 40,24 | 40,14 | 40,75 | 40,68 | 40,72 | 160,00 | 0,26 | 1,77 |
| | | | | | | | | | | Média | 1,78 |
| | | | | | | | | | | Desvio Padrão | 0,01 |
| CS_PCM20 | 1 | 387,13 | 39,23 | 39,52 | 39,38 | 39,87 | 39,69 | 39,78 | 160,00 | 0,25 | 1,54 |
| | 2 | 396,00 | 39,55 | 39,44 | 39,50 | 39,26 | 39,66 | 39,46 | 159,00 | 0,25 | 1,60 |
| | 3 | 378,25 | 39,44 | 39,39 | 39,42 | 38,98 | 39,09 | 39,04 | 158,00 | 0,24 | 1,56 |
| | | | | | | | | | | Média | 1,57 |
| | | | | | | | | | | Desvio Padrão | 0,03 |
| CS45_FS30 | 1 | 461,87 | 39,99 | 40,49 | 40,24 | 40,97 | 40,71 | 40,84 | 160,00 | 0,26 | 1,76 |
| | 2 | 460,41 | 39,98 | 40,20 | 40,09 | 40,51 | 40,09 | 40,30 | 159,00 | 0,26 | 1,79 |
| | 3 | 450,83 | 40,17 | 39,97 | 40,07 | 39,89 | 40,11 | 40,00 | 159,00 | 0,25 | 1,77 |
| | | | | | | | | | | Média | 1,77 |
| | | | | | | | | | | Desvio Padrão | 0,02 |
| CS30_FS45 | 1 | 465,01 | 40,24 | 40,17 | 40,21 | 40,40 | 40,33 | 40,37 | 159,50 | 0,26 | 1,80 |
| | 2 | 466,10 | 40,52 | 40,16 | 40,34 | 40,61 | 40,32 | 40,47 | 159,45 | 0,26 | 1,79 |
| | 3 | 459,29 | 39,86 | 39,81 | 39,84 | 40,27 | 40,29 | 40,28 | 160,00 | 0,26 | 1,79 |
| | | | | | | | | | | Média | 1,79 |
| | | | | | | | | | | Desvio Padrão | 0,00 |
| CS30_FS25_PCM20 | 1 | 328,92 | 40,10 | 39,75 | 39,93 | 39,26 | 40,09 | 39,68 | 158,99 | 0,25 | 1,31 |
| | 2 | 341,62 | 39,75 | 38,99 | 39,37 | 39,42 | 39,48 | 39,45 | 159,46 | 0,25 | 1,38 |
| | 3 | 322,23 | 40,20 | 40,16 | 40,18 | 38,16 | 38,76 | 38,46 | 159,89 | 0,25 | 1,30 |
| | | | | | | | | | | Média | 1,33 |
| | | | | | | | | | | Desvio Padrão | 0,04 |
| CS30_FS15_PCM30 | 1 | 310,58 | 38,15 | 39,54 | 38,85 | 39,69 | 39,06 | 39,38 | 159,73 | 0,24 | 1,27 |
| | 2 | 304,27 | 40,04 | 39,80 | 39,92 | 39,00 | 38,22 | 38,61 | 160,23 | 0,25 | 1,23 |
| | 3 | 320,75 | 39,55 | 39,14 | 39,35 | 39,34 | 38,56 | 38,95 | 159,98 | 0,25 | 1,31 |
| | | | | | | | | | | Média | 1,27 |
| | | | | | | | | | | Desvio Padrão | 0,04 |
| CS30_FS45_F5 | 1 | 434,03 | 40,44 | 39,77 | 40,11 | 39,53 | 39,06 | 39,30 | 161,43 | 0,25 | 1,71 |
| | 2 | 425,78 | 38,95 | 39,36 | 39,16 | 39,17 | 38,99 | 39,08 | 160,29 | 0,25 | 1,74 |
| | 3 | 428,11 | 39,43 | 39,56 | 39,50 | 39,31 | 38,98 | 39,15 | 160,49 | 0,25 | 1,73 |
| | | | | | | | | | | Média | 1,72 |
| | | | | | | | | | | Desvio Padrão | 0,02 |

Condutibilidade térmica

Provetes circulares com 90 mm de diâmetro e 20 mm de espessura

| Argamassa | Bolachas | λ [W/(m.K)] | | | Média | Desvio Padrão |
|-----------------|----------|---------------------|-------|-------|---------------|---------------|
| P | 1 | 0,96 | 0,95 | 0,94 | 0,95 | 0,01 |
| | 2 | 0,98 | 1,03 | 0,97 | 0,99 | 0,03 |
| | 3 | 1,10 | 1,09 | 1,11 | 1,10 | 0,01 |
| | | | | | Média | 1,01 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,07 |
| FS | 1 | 0,778 | 0,8 | 0,753 | 0,78 | 0,02 |
| | 2 | 1,01 | 1,06 | 1,06 | 1,04 | 0,03 |
| | 3 | 0,96 | 1,03 | 1,02 | 1,00 | 0,04 |
| | | | | | Média | 0,94 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,13 |
| FS_PCM20 | 1 | 0,429 | 0,454 | 0,446 | 0,44 | 0,01 |
| | 2 | 0,403 | 0,403 | 0,402 | 0,40 | 0,00 |
| | 3 | 0,491 | 0,5 | 0,486 | 0,49 | 0,01 |
| | | | | | Média | 0,45 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,04 |
| CS_PCM20 | 1 | 0,56 | 0,593 | 0,562 | 0,57 | 0,02 |
| | 2 | 0,618 | 0,627 | 0,63 | 0,63 | 0,01 |
| | 3 | 0,637 | 0,634 | 0,635 | 0,64 | 0,00 |
| | | | | | Média | 0,61 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,03 |
| CS45_FS30 | 1 | 0,66 | 0,627 | 0,736 | 0,67 | 0,06 |
| | 2 | 0,863 | 0,861 | 0,907 | 0,88 | 0,03 |
| | 3 | 0,57 | 0,603 | 0,66 | 0,61 | 0,05 |
| | | | | | Média | 0,72 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,13 |
| CS30_FS45 | 1 | 0,98 | 0,948 | 0,946 | 0,96 | 0,02 |
| | 2 | 0,948 | 0,982 | 1,01 | 0,98 | 0,03 |
| | 3 | 0,99 | 1,01 | 0,979 | 0,99 | 0,02 |
| | | | | | Média | 0,98 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,03 |
| CS30_FS25_PCM20 | 1 | 0,507 | 0,525 | 0,512 | 0,51 | 0,01 |
| | 2 | 0,523 | 0,52 | 0,527 | 0,52 | 0,00 |
| | 3 | 0,459 | 0,463 | 0,445 | 0,46 | 0,01 |
| | | | | | Média | 0,50 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,03 |
| CS30_FS15_PCM30 | 1 | 0,5 | 0,468 | 0,497 | 0,49 | 0,02 |
| | 2 | 0,521 | 0,478 | 0,499 | 0,50 | 0,02 |
| | 3 | 0,499 | 0,498 | 0,515 | 0,50 | 0,01 |
| | | | | | Média | 0,50 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,02 |
| CS30_FS45_F5 | 1 | 0,635 | 0,734 | 0,694 | 0,69 | 0,05 |
| | 2 | 0,707 | 0,752 | 0,718 | 0,73 | 0,02 |
| | 3 | 0,897 | 0,932 | 0,914 | 0,91 | 0,02 |
| | | | | | Média | 0,78 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,11 |

Condutibilidade térmica**Provetes prismáticos 40x40x160 [mm]**

| Argamassas | Provete | □ [W/(m.K)] | | | Média | Desvio Padrão | |
|------------------------|---------|-------------|------|------|---------------|---------------|--|
| P | 1 | 0,76 | 0,75 | 0,92 | 0,81 | 0,09 | |
| | 2 | 0,82 | 0,90 | 0,85 | 0,86 | 0,04 | |
| | 3 | 0,83 | 0,96 | 0,91 | 0,90 | 0,06 | |
| | | | | | Média | 0,85 | |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,07 | |
| FS | 1 | Partiu | | | | | |
| | 2 | 0,82 | 0,91 | 0,66 | 0,79 | 0,13 | |
| | 3 | 0,80 | 0,87 | 0,73 | 0,80 | 0,07 | |
| | | | | | Média | 0,80 | |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,09 | |
| FS_PCM20 | 1 | 0,36 | 0,49 | 0,48 | 0,44 | 0,07 | |
| | 2 | 0,55 | 0,40 | 0,41 | 0,45 | 0,08 | |
| | 3 | 0,41 | 0,38 | 0,43 | 0,40 | 0,02 | |
| | | | | | Média | 0,43 | |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,06 | |
| CS | 1 | 0,90 | 0,91 | 0,82 | 0,88 | 0,05 | |
| | 2 | 0,85 | 0,81 | 0,82 | 0,83 | 0,02 | |
| | 3 | 0,89 | 0,76 | 0,80 | 0,81 | 0,07 | |
| | | | | | Média | 0,84 | |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,05 | |
| CS_PCM20 | 1 | 0,61 | 0,60 | 0,63 | 0,61 | 0,02 | |
| | 2 | 0,63 | 0,69 | 0,72 | 0,68 | 0,05 | |
| | 3 | 0,61 | 0,65 | 0,69 | 0,65 | 0,04 | |
| | | | | | Média | 0,65 | |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,04 | |
| CS45_FS30 | 1 | 0,73 | 0,73 | 0,80 | 0,75 | 0,04 | |
| | 2 | 0,77 | 0,78 | 0,81 | 0,79 | 0,02 | |
| | 3 | 0,72 | 0,72 | 0,69 | 0,71 | 0,02 | |
| | | | | | Média | 0,75 | |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,04 | |
| CS30_FS45 | 1 | 0,76 | 0,79 | 0,94 | 0,83 | 0,09 | |
| | 2 | 0,78 | 0,87 | 0,85 | 0,83 | 0,05 | |
| | 3 | 0,85 | 0,92 | 0,85 | 0,87 | 0,04 | |
| | | | | | Média | 0,85 | |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,06 | |
| CS30_FS25_PCM20 | 1 | 0,38 | 0,38 | 0,44 | 0,40 | 0,04 | |
| | 2 | 0,39 | 0,56 | 0,45 | 0,47 | 0,09 | |
| | 3 | 0,42 | 0,40 | 0,52 | 0,45 | 0,06 | |
| | | | | | Média | 0,44 | |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,06 | |
| CS30_FS15_PCM30 | 1 | 0,51 | 0,58 | 0,46 | 0,52 | 0,06 | |
| | 2 | 0,53 | 0,61 | 0,54 | 0,56 | 0,04 | |
| | 3 | 0,52 | 0,47 | 0,40 | 0,46 | 0,06 | |
| | | | | | Média | 0,51 | |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,06 | |
| CS30_FS45_F5 | 1 | 0,66 | 0,76 | 0,65 | 0,69 | 0,06 | |
| | 2 | 0,69 | 0,76 | 0,64 | 0,70 | 0,06 | |
| | 3 | 0,82 | 0,80 | 0,62 | 0,75 | 0,11 | |
| | | | | | Média | 0,71 | |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,08 | |

Condutibilidade térmica

Provelte de argamassa com 1,5 cm de espessura sobre tijolo

| Argamassa | λ [W/m.K] | | | | | |
|------------------------|-------------------|------|------|------|---------------|------|
| P | 0,95 | 0,87 | 0,92 | 0,87 | 0,91 | 0,90 |
| | | | | | Média | 0,90 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,03 |
| FS | 0,94 | 0,94 | 0,88 | 0,92 | 0,86 | 0,89 |
| | | | | | Média | 0,91 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,03 |
| FS_PCM20 | 0,51 | 0,52 | 0,46 | 0,50 | 0,45 | 0,48 |
| | | | | | Média | 0,49 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,03 |
| CS30_FS45 | 0,83 | 0,64 | 0,84 | 0,79 | 0,88 | 0,67 |
| | | | | | Média | 0,77 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,10 |
| CS30_FS25_PCM20 | 0,33 | 0,42 | 0,41 | 0,44 | 0,41 | 0,43 |
| | 0,55 | 0,53 | 0,58 | 0,54 | 0,55 | 0,62 |
| | | | | | Média | 0,48 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,09 |
| CS30_FS15_PCM30 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,36 | 0,44 | 0,35 |
| | | | | | Média | 0,38 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,03 |
| CS30_FS45_F5 | 0,50 | 0,47 | 0,23 | 0,44 | 0,57 | 0,54 |
| | | | | | Média | 0,46 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,12 |

Provelte de argamassa com 2 cm de espessura sobre betão

| Argamassa | λ [W/m.K] | | | | | |
|------------------------|-------------------|------|------|------|---------------|------|
| P | 0,87 | 0,90 | 0,92 | 0,83 | 0,80 | 0,85 |
| | | | | | Média | 0,86 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,04 |
| FS | 0,98 | 0,82 | 0,90 | 0,85 | 0,86 | 0,80 |
| | | | | | Média | 0,87 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,06 |
| FS_PCM20 | 0,58 | 0,57 | 0,50 | 0,45 | 0,55 | 0,50 |
| | | | | | Média | 0,52 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,05 |
| CS30_FS45 | 0,77 | 0,82 | 0,76 | 0,79 | 0,84 | 0,72 |
| | | | | | Média | 0,78 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,04 |
| CS30_FS25_PCM20 | 0,45 | 0,43 | 0,49 | 0,42 | 0,52 | 0,45 |
| | | | | | Média | 0,46 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,04 |
| CS30_FS15_PCM30 | 0,64 | 0,53 | 0,49 | 0,44 | 0,49 | 0,54 |
| | | | | | Média | 0,52 |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,07 |

Módulo de elasticidade dos provetes de argamassa simples

| Módulo de elasticidade dinâmico [N/mm ²] | | | | | | | | | | | | | |
|--|---------|------------|----------------|-------|--------|---|---------|---------|---------|---|---------|---------------|---------|
| Argamassa | Provete | Massas [g] | Dimensões [mm] | | | Módulo de elasticidade [N/mm ²] | | | | Módulo de elasticidade corrigido [N/mm ²] | | | |
| P | 1 | 467,21 | 40,42 | 39,85 | 164,00 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 2 | 450,54 | 39,81 | 40,29 | 159,00 | 3953,00 | 3958,00 | 3961,00 | 3950,00 | 4348,81 | 4354,31 | 4357,61 | 4345,51 |
| | 3 | 456,51 | 40,08 | 40,53 | 159,00 | 4016,00 | 4024,00 | 4040,00 | 4000,00 | 4306,41 | 4314,98 | 4332,14 | 4289,25 |
| | | | | | | | | | | | | Média | 4331,13 |
| | | | | | | | | | | | | Desvio Padrão | 25,03 |
| FS | 1 | 465,11 | 39,88 | 40,72 | 160,00 | - | - | - | - | | | | |
| | 2 | 462,25 | 39,81 | 40,68 | 159,00 | 3720,00 | 3725,00 | 3687,00 | 3718,00 | 3951,05 | 3956,36 | 3916,00 | 3948,93 |
| | 3 | 455,27 | 40,47 | 40,38 | 159,00 | 3607,00 | 3614,00 | 3527,00 | 3609,00 | 3854,75 | 3862,23 | 3769,26 | 3856,89 |
| | | | | | | | | | | | | Média | 3889,43 |
| | | | | | | | | | | | | Desvio Padrão | 65,43 |
| FS_PCM20 | 1 | 302,04 | 39,07 | 39,90 | 160,00 | 777,00 | 849,00 | 851,00 | 783,00 | 1320,36 | 1442,71 | 1446,11 | 1330,56 |
| | 2 | 302,90 | 39,36 | 39,52 | 160,50 | 733,00 | 747,00 | 743,00 | 750,00 | 1248,80 | 1272,65 | 1265,83 | 1277,76 |
| | 3 | 272,78 | 39,49 | 38,67 | 158,50 | 758,00 | 803,00 | 734,00 | 747,00 | 1442,31 | 1527,93 | 1396,64 | 1421,37 |
| | | | | | | | | | | | | Média | 1366,09 |
| | | | | | | | | | | | | Desvio Padrão | 91,43 |
| CS | 1 | 468,07 | 40,04 | 40,94 | 160,00 | 3426,00 | 3257,00 | 3123,00 | 3219,00 | 3572,54 | 3396,32 | 3256,58 | 3356,69 |
| | 2 | 460,99 | 40,06 | 40,52 | 159,50 | 1217,00 | 1191,00 | 1061,00 | 1083,00 | 1297,18 | 1269,47 | 1130,90 | 1154,35 |
| | 3 | 463,63 | 40,14 | 40,72 | 160,00 | 3460,00 | 3458,00 | 3264,00 | 3367,00 | 3653,15 | 3651,04 | 3446,21 | 3554,96 |
| | | | | | | | | | | | | Média | 3485,94 |
| | | | | | | | | | | | | Desvio Padrão | 144,62 |
| CS_PCM20 | 1 | 387,13 | 39,38 | 39,78 | 160,00 | 2277,00 | 2286,00 | 2164,00 | 2245,00 | 3004,09 | 3015,96 | 2855,01 | 2961,87 |
| | 2 | 396,00 | 39,50 | 39,46 | 159,00 | 2137,00 | 2181,00 | 2120,00 | 2141,00 | 2752,82 | 2809,50 | 2730,92 | 2757,98 |
| | 3 | 378,25 | 39,42 | 39,04 | 158,00 | 2385,00 | 2395,00 | 2386,00 | 2392,00 | 3237,63 | 3251,20 | 3238,98 | 3247,13 |
| | | | | | | | | | | | | Média | 2988,59 |
| | | | | | | | | | | | | Desvio Padrão | 210,48 |

Módulo de elasticidade dos provetes de argamassa simples

Módulo de elasticidade dinâmico [N/mm²]

| Argamassa | Provete | Massas [g] | Dimensões [mm] | | | Módulo de elasticidade [N/mm ²] | | | | Módulo de elasticidade corrigido [N/mm ²] | | | |
|-----------------|---------|------------|----------------|-------|--------|---|---------|---------|---------|---|---------|---------------|---------|
| CS45_FS30 | 1 | 461,87 | 40,24 | 40,84 | 160,00 | 2102,00 | 2129,00 | 2132,00 | 2114,00 | 2215,46 | 2243,91 | 2247,07 | 2228,10 |
| | 2 | 460,41 | 40,09 | 40,30 | 159,00 | 1452,00 | 1546,00 | 1540,00 | 1491,00 | 1551,85 | 1652,31 | 1645,90 | 1593,53 |
| | 3 | 450,83 | 40,07 | 40,00 | 159,00 | 2218,00 | 2198,00 | 2206,00 | 2231,00 | 2440,25 | 2418,24 | 2427,04 | 2454,55 |
| | | | | | | | | | | | | Média | 2093,18 |
| | | | | | | | | | | | | Desvio Padrão | 367,41 |
| CS30_FS45 | 1 | 465,01 | 40,21 | 40,37 | 159,50 | 3572,00 | 3574,00 | 3558,00 | 3572,00 | 3774,81 | 3776,92 | 3760,01 | 3774,81 |
| | 2 | 466,10 | 40,34 | 40,47 | 159,45 | 3697,00 | 3721,00 | 3729,00 | 3700,00 | 3873,90 | 3899,05 | 3907,43 | 3877,04 |
| | 3 | 459,29 | 39,84 | 40,28 | 160,00 | 3815,00 | 3820,00 | 3831,00 | 3787,00 | 4141,38 | 4146,81 | 4158,75 | 4110,99 |
| | | | | | | | | | | | | Média | 3933,49 |
| | | | | | | | | | | | | Desvio Padrão | 160,83 |
| CS30_FS25_PCM20 | 1 | 328,92 | 39,93 | 39,68 | 158,99 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 2 | 341,62 | 39,37 | 39,45 | 159,46 | 1279,00 | 1284,00 | 1298,00 | 1262,00 | 1921,94 | 1929,45 | 1950,49 | 1896,39 |
| | 3 | 322,23 | 40,18 | 38,46 | 159,89 | 1170,00 | 1189,00 | 1224,00 | 1191,00 | 1878,41 | 1908,91 | 1965,10 | 1912,12 |
| | | | | | | | | | | | | Média | 1920,35 |
| | | | | | | | | | | | | Desvio Padrão | 28,10 |
| CS30_FS15_PCM30 | 1 | 310,58 | 38,85 | 39,38 | 159,73 | 211,00 | 295,00 | 237,00 | 249,00 | 354,74 | 495,96 | 398,45 | 418,63 |
| | 2 | 304,27 | 39,92 | 38,61 | 160,23 | 200,00 | 207,00 | 218,00 | 214,00 | 341,67 | 353,62 | 372,42 | 365,58 |
| | 3 | 320,75 | 39,35 | 38,95 | 159,98 | 205,00 | 201,00 | 212,00 | 208,00 | 333,60 | 327,09 | 344,99 | 338,48 |
| | | | | | | | | | | | | Média | 370,44 |
| | | | | | | | | | | | | Desvio Padrão | 47,82 |
| CS30_FS45_F5 | 1 | 434,03 | 40,11 | 39,30 | 161,43 | 3202,00 | 3215,00 | 3200,00 | 3190,00 | 3778,54 | 3793,88 | 3776,18 | 3764,38 |
| | 2 | 425,78 | 39,16 | 39,08 | 160,29 | 3139,00 | 3208,00 | 3170,00 | 3156,00 | 3861,40 | 3946,28 | 3899,53 | 3882,31 |
| | 3 | 428,11 | 39,50 | 39,15 | 160,49 | 3155,00 | 3168,00 | 3201,00 | 3139,00 | 3825,14 | 3840,90 | 3880,91 | 3805,74 |
| | | | | | | | | | | | | Média | 3837,93 |
| | | | | | | | | | | | | Desvio Padrão | 57,05 |

Resistência à tração por flexão e à compressão

| | Resistência à tração por flexão | | | | Resistência à compressão | | | | |
|------------------------|---------------------------------|---------------|-----------|-------------------------|--------------------------|--------|---------------|-------------------------|------|
| | Provete | Ensaio | Força [N] | Rt [N/mm ²] | Provete | Ensaio | Força [N] | Rc [N/mm ²] | |
| P | 1 | 1350 | 101,81 | 0,24 | 1 | 2135 | 923,70 | 2,16 | |
| | 2 | 1351 | 98,91 | 0,23 | 2 | 2136 | 848,52 | 1,99 | |
| | 3 | 1352 | 101,99 | 0,24 | 3 | 2137 | 873,40 | 2,05 | |
| | | Média | | 0,24 | | | Média | | 2,07 |
| | | Desvio Padrão | | 0,00 | | | Desvio Padrão | | 0,09 |
| FS | 1 | - | - | - | 1 | 2132 | 863 | 2,02 | |
| | 2 | 1353 | 82,31 | 0,19 | 2 | 2133 | 938,55 | 2,20 | |
| | 3 | 1354 | 86,78 | 0,20 | 3 | 2134 | 951,2 | 2,23 | |
| | | Média | | 0,20 | | | Média | | 2,15 |
| | | Desvio Padrão | | 0,01 | | | Desvio Padrão | | 0,11 |
| FS_PCM20 | 1 | 1376 | 43,2 | 0,10 | 1 | 2109 | 389,7 | 0,91 | |
| | 2 | 1377 | 35,98 | 0,08 | 2 | 2110 | 591,85 | 1,39 | |
| | 3 | 1378 | 43,2 | 0,10 | 3 | 2111 | 360,94 | 0,85 | |
| | | Média | | 0,10 | | | Média | | 1,05 |
| | | Desvio Padrão | | 0,01 | | | Desvio Padrão | | 0,29 |
| CS | 1 | 1355 | 85,1 | 0,20 | 1 | 2126 | 971 | 2,28 | |
| | 2 | 1356 | 41,22 | 0,10 | 2 | 2127 | 811,9 | 1,90 | |
| | 3 | 1357 | 80,29 | 0,19 | 3 | 2128 | 991,9 | 2,32 | |
| | | Média | | 0,19 | | | Média | | 2,17 |
| | | Desvio Padrão | | 0,01 | | | Desvio Padrão | | 0,23 |
| CS_PCM20 | 1 | 1358 | 46,8 | 0,11 | 1 | 2129 | 836,4 | 1,96 | |
| | 2 | 1359 | 53,27 | 0,12 | 2 | 2130 | 791,5 | 1,86 | |
| | 3 | 1360 | 52,57 | 0,12 | 3 | 2131 | 685,5 | 1,61 | |
| | | Média | | 0,12 | | | Média | | 1,81 |
| | | Desvio Padrão | | 0,01 | | | Desvio Padrão | | 0,18 |
| CS45_FS30 | 1 | 1361 | 61,65 | 0,14 | 1 | 2124 | 670,43 | 1,57 | |
| | 2 | 1362 | 78,16 | 0,18 | 2 | - | - | - | |
| | 3 | 1363 | 82,84 | 0,19 | 3 | 2125 | 583,75 | 1,37 | |
| | | Média | | 0,17 | | | Média | | 1,47 |
| | | Desvio Padrão | | 0,03 | | | Desvio Padrão | | 0,14 |
| CS30_FS45 | 1 | 1364 | 87,47 | 0,21 | 1 | 2121 | 946,66 | 2,22 | |
| | 2 | 1365 | 97,86 | 0,23 | 2 | 2122 | 929,6 | 2,18 | |
| | 3 | 1566 | 94,07 | 0,22 | 3 | 2123 | 812,2 | 1,90 | |
| | | Média | | 0,22 | | | Média | | 2,10 |
| | | Desvio Padrão | | 0,01 | | | Desvio Padrão | | 0,17 |
| CS30_FS25_PCM20 | 1 | 1367 | 44,32 | 0,10 | 1 | 2118 | 479,76 | 1,12 | |
| | 2 | 1368 | 45,54 | 0,11 | 2 | 2119 | 546,3 | 1,28 | |
| | 3 | 1369 | 35,66 | 0,08 | 3 | 2120 | 493,9 | 1,16 | |
| | | Média | | 0,10 | | | Média | | 1,19 |
| | | Desvio Padrão | | 0,01 | | | Desvio Padrão | | 0,08 |

Resistência à tração por flexão e à compressão

| | Resistência à tração por flexão | | | | Resistência à compressão | | | |
|------------------------|---------------------------------|--------|-----------|-------------------------|--------------------------|--------|-----------|-------------------------|
| | Provete | Ensaio | Força [N] | Rt [N/mm ²] | Provete | Ensaio | Força [N] | Rc [N/mm ²] |
| CS30_FS15_PCM30 | 1 | 1370 | 20,91 | 0,05 | 1 | 2115 | 747,6 | 1,75 |
| | 2 | 1371 | 30,75 | 0,07 | 2 | 2116 | 591,87 | 1,39 |
| | 3 | 1372 | 57,4 | 0,13 | 3 | 2117 | 675,5 | 1,58 |
| | Média | | | 0,09 | Média | | | 1,57 |
| | Desvio Padrão | | | 0,04 | Desvio Padrão | | | 0,18 |
| CS30_FS45_F5 | 1 | 1373 | 75,19 | 0,18 | 1 | 2112 | 641,64 | 1,50 |
| | 2 | 1374 | 87,08 | 0,20 | 2 | 2113 | 573,15 | 1,34 |
| | 3 | 1375 | 86,05 | 0,20 | 3 | 2114 | 868,58 | 2,04 |
| | Média | | | 0,19 | Média | | | 1,63 |
| | Desvio Padrão | | | 0,02 | Desvio Padrão | | | 0,36 |

Abrasão

| | Diferença [g] | Média | Desvio Padrão |
|------------------------|---------------|-------|---------------|
| P | 1,501 | 2,8 | 1,2 |
| | 3,981 | | |
| | 2,847 | | |
| FS | 1,13 | 1,4 | 0,6 |
| | 1,02 | | |
| | 2,114 | | |
| FS_PCM20 | 1,088 | 1,2 | 0,1 |
| | 1,155 | | |
| | 1,319 | | |
| CS30_FS45 | 2,052 | 2,6 | 0,5 |
| | 2,917 | | |
| | 2,884 | | |
| CS30_FS25_PCM20 | 1,882 | 1,8 | 0,2 |
| | 1,922 | | |
| | 1,493 | | |
| CS30_FS15_PCM30 | 0,43 | 0,2 | 0,2 |
| | 0,175 | | |
| | 0,108 | | |
| CS30_FS45_F5 | 4,687 | 5,2 | 0,5 |
| | 5,534 | | |
| | 5,375 | | |

Aderência ao suporte

Aderência Tijolo

| Argamassa | Tensão [MPa] | Diâmetro [mm] | | | Diâmetro médio [mm] | Área [mm ²] | Força, 50mm [N] | Tensão [MPa] | Média | Desvio Padrão |
|-----------------|--------------|---------------|-------|-------|---------------------|-------------------------|-----------------|--------------|-------|---------------|
| | | | | | | | | | | |
| P | 0,1 | 48,35 | 49,29 | 48,28 | 48,64 | 1858,13 | 196,35 | 0,106 | 0,04 | 0,06 |
| | 0,1 | - | - | - | - | - | - | 0,000 | | |
| | 0,08 | - | - | - | - | - | - | 0,000 | | |
| FS | 0,07 | 48,12 | 47,87 | 47,51 | 47,83 | 1797,01 | 137,44 | 0,076 | 0,03 | 0,04 |
| | 0,08 | - | - | - | - | - | - | 0,000 | | |
| | 0,08 | - | - | - | - | - | - | 0,000 | | |
| FS_PCM20 | 0 | - | - | - | - | - | - | 0,000 | 0,00 | 0,00 |
| | 0,04 | - | - | - | - | - | - | 0,000 | | |
| | 0,04 | - | - | - | - | - | - | 0,000 | | |
| CS30_FS45 | 0 | - | - | - | - | - | - | 0,000 | 0,00 | 0,00 |
| | 0 | - | - | - | - | - | - | 0,000 | | |
| | 0 | - | - | - | - | - | - | 0,000 | | |
| CS30_FS25_PCM20 | 0,1 | - | - | - | - | - | - | 0,000 | 0,01 | 0,03 |
| | 0,04 | 48,74 | 46,71 | 48,56 | 48,00 | 1809,81 | 78,53982 | 0,043 | | |
| | 0,1 | - | - | - | - | - | - | 0,000 | | |
| CS30_FS15_PCM30 | 0 | 46,63 | 43,6 | 43,03 | 44,42 | 1549,70 | 0 | 0,000 | 0,03 | 0,05 |
| | 0,06 | 47,19 | 46,54 | 46,18 | 46,64 | 1708,22 | 117,8097 | 0,069 | | |
| | 0 | - | - | - | - | - | - | - | | |
| CS30_FS45_F5 | 0,1 | - | - | - | - | - | - | 0,000 | 0,00 | 0,00 |
| | 0,1 | - | - | - | - | - | - | 0,000 | | |
| | 0,1 | - | - | - | - | - | - | 0,000 | | |

Aderência Betão

| Argamassa | Tensão [MPa] | Diâmetro [mm] | | | Diâmetro médio [mm] | Área [mm ²] | Força, 50mm [N] | Tensão [MPa] | Média | Desvio Padrão |
|-----------------|--------------|---------------|-------|-------|---------------------|-------------------------|-----------------|--------------|-------|---------------|
| | | | | | | | | | | |
| P | 0,13 | 48,12 | 47,87 | 47,51 | 47,83 | 1797,01 | 255,25 | 0,130 | 0,04 | 0,08 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | | |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | | |
| FS | 0,1 | 47,54 | 47,9 | 48,18 | 47,87 | 1800,02 | 196,35 | 0,100 | 0,10 | 0,01 |
| | 0,11 | 48,57 | 47,9 | 48,87 | 48,45 | 1843,39 | 215,98 | 0,110 | | |
| | 0,09 | 47,66 | 47,89 | 48,07 | 47,87 | 1800,02 | 176,71 | 0,090 | | |
| CS30_FS45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,03 | 0,05 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | | |
| | 0,09 | 45,53 | 44,08 | 46,24 | 45,28 | 1610,52 | 176,71 | 0,090 | | |
| CS30_FS25_PCM20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,02 | 0,03 |
| | 0,06 | 48,55 | 48,35 | 48,79 | 48,56 | 1852,28 | 117,81 | 0,060 | | |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | | |

Adsorção e desadsorção

| | Adsorção (50%-80%) | | | | | | | |
|-----------------|--------------------|-----------|--------|--------|--------|---------------|-----------|--------------------------------------|
| | Tempo [h] | Massa [g] | Média | | | Desvio Padrão | Diferença | Higroscopicidade [g/m ²] |
| P | 0,00 | 237,88 | 243,97 | 245,86 | 242,57 | 4,17 | - | 0,00 |
| | 0,50 | 237,99 | 244,07 | 246,53 | 242,86 | 4,40 | 0,29 | 56,14 |
| | 1,00 | 238,02 | 244,11 | 246,57 | 242,90 | 4,40 | 0,33 | 63,68 |
| | 3,00 | 238,18 | 244,14 | 246,67 | 242,99 | 4,36 | 0,42 | 82,14 |
| | 6,00 | 238,21 | 244,30 | 246,74 | 243,08 | 4,39 | 0,51 | 99,36 |
| | 12,00 | 238,37 | 244,46 | 246,83 | 243,22 | 4,37 | 0,65 | 125,87 |
| FS | 0,00 | 246,67 | 253,14 | 248,93 | 249,58 | 3,28 | - | 0,00 |
| | 0,50 | 246,78 | 253,21 | 249,04 | 249,68 | 3,26 | 0,10 | 18,62 |
| | 1,00 | 246,80 | 253,24 | 249,08 | 249,70 | 3,26 | 0,12 | 23,63 |
| | 3,00 | 246,91 | 253,39 | 249,20 | 249,83 | 3,29 | 0,25 | 49,35 |
| | 6,00 | 247,03 | 253,42 | 249,29 | 249,91 | 3,24 | 0,33 | 64,71 |
| | 12,00 | 247,18 | 253,71 | 249,48 | 250,12 | 3,31 | 0,54 | 105,73 |
| FS_PCM20 | 0,00 | 185,31 | 181,83 | 178,13 | 181,76 | 3,59 | - | 0,00 |
| | 0,50 | 185,41 | 181,93 | 178,23 | 181,86 | 3,59 | 0,10 | 19,59 |
| | 1,00 | 185,45 | 181,97 | 178,27 | 181,90 | 3,59 | 0,14 | 27,35 |
| | 3,00 | 185,58 | 182,12 | 178,38 | 182,03 | 3,60 | 0,27 | 53,32 |
| | 6,00 | 185,68 | 182,22 | 178,47 | 182,12 | 3,61 | 0,36 | 71,59 |
| | 12,00 | 185,86 | 182,38 | 178,62 | 182,29 | 3,62 | 0,53 | 104,20 |
| CS_PCM20 | 0,00 | 215,36 | 213,48 | 216,43 | 215,09 | 1,49 | - | 0,00 |
| | 0,50 | 215,46 | 213,58 | 216,50 | 215,18 | 1,48 | 0,09 | 17,32 |
| | 1,00 | 215,51 | 213,61 | 216,52 | 215,21 | 1,48 | 0,12 | 24,40 |
| | 3,00 | 215,60 | 213,72 | 216,62 | 215,31 | 1,47 | 0,22 | 44,19 |
| | 6,00 | 215,68 | 213,81 | 216,68 | 215,39 | 1,46 | 0,30 | 59,70 |
| | 12,00 | 215,84 | 214,00 | 216,84 | 215,56 | 1,44 | 0,47 | 93,46 |
| CS45_FS30 | 0,00 | 252,93 | 247,78 | 252,99 | 251,23 | 2,99 | - | 0,00 |
| | 0,50 | 253,08 | 247,85 | 253,08 | 251,34 | 3,02 | 0,10 | 18,83 |
| | 1,00 | 253,10 | 247,89 | 253,11 | 251,37 | 3,02 | 0,13 | 24,23 |
| | 3,00 | 253,18 | 247,96 | 253,17 | 251,44 | 3,02 | 0,21 | 36,94 |
| | 6,00 | 253,25 | 248,01 | 253,26 | 251,51 | 3,03 | 0,27 | 49,11 |
| | 12,00 | 253,45 | 248,15 | 253,43 | 251,68 | 3,05 | 0,44 | 79,93 |
| CS30_FS45 | 0,00 | 253,06 | 246,42 | 248,78 | 249,42 | 3,37 | - | 0,00 |
| | 0,50 | 253,16 | 246,52 | 248,88 | 249,52 | 3,37 | 0,10 | 18,41 |
| | 1,00 | 253,19 | 246,53 | 248,91 | 249,55 | 3,37 | 0,13 | 23,03 |
| | 3,00 | 253,29 | 246,60 | 249,01 | 249,63 | 3,39 | 0,21 | 38,62 |
| | 6,00 | 253,36 | 246,69 | 249,08 | 249,71 | 3,38 | 0,29 | 52,29 |
| | 12,00 | 253,55 | 246,85 | 249,27 | 249,89 | 3,39 | 0,47 | 84,73 |
| CS30_FS25_PCM20 | 0,00 | 189,04 | 188,15 | 191,43 | 189,54 | 1,70 | - | 0,00 |
| | 0,50 | 189,17 | 188,28 | 191,53 | 189,66 | 1,68 | 0,12 | 24,40 |
| | 1,00 | 189,21 | 188,32 | 191,57 | 189,70 | 1,68 | 0,16 | 32,03 |
| | 3,00 | 189,34 | 188,44 | 191,65 | 189,81 | 1,66 | 0,27 | 54,64 |
| | 6,00 | 189,46 | 188,55 | 191,76 | 189,92 | 1,65 | 0,38 | 75,99 |
| | 12,00 | 189,64 | 188,71 | 191,91 | 190,09 | 1,65 | 0,55 | 109,28 |
| CS30_FS15_PCM30 | 0,00 | 190,26 | 189,62 | 192,74 | 190,87 | 1,64 | - | 0,00 |
| | 0,50 | 190,40 | 189,64 | 192,84 | 190,96 | 1,67 | 0,08 | 16,98 |
| | 1,00 | 190,43 | 189,64 | 192,87 | 190,98 | 1,69 | 0,11 | 22,06 |
| | 3,00 | 190,55 | 189,71 | 193,00 | 191,09 | 1,71 | 0,21 | 42,90 |
| | 6,00 | 190,66 | 189,79 | 193,12 | 191,19 | 1,73 | 0,31 | 63,74 |
| | 12,00 | 190,84 | 189,98 | 193,30 | 191,37 | 1,72 | 0,50 | 101,30 |
| CS30_FS45_F5 | 0,00 | 238,70 | 240,35 | 256,21 | 245,09 | 9,67 | - | 0,00 |
| | 0,50 | 238,72 | 240,47 | 256,31 | 245,17 | 9,69 | 0,08 | 14,57 |
| | 1,00 | 238,81 | 240,48 | 256,32 | 245,20 | 9,66 | 0,12 | 21,23 |
| | 3,00 | 238,91 | 240,57 | 256,39 | 245,29 | 9,65 | 0,21 | 36,94 |
| | 6,00 | 239,00 | 240,67 | 256,48 | 245,38 | 9,65 | 0,30 | 53,49 |
| | 12,00 | 239,19 | 240,84 | 256,66 | 245,57 | 9,65 | 0,48 | 86,59 |

Adsorção e desadsorção

Desadsorção (80%-50%)

| | Tempo [h] | Massa [g] | Média | | | Desvio Padrão | Diferença | Higroscopicidade [g/m ²] |
|-----------------|-----------|-----------|--------|--------|--------|---------------|-----------|--------------------------------------|
| P | 0,00 | 238,58 | 244,69 | 247,12 | 243,46 | 4,40 | - | 0,00 |
| | 0,50 | 238,51 | 244,62 | 247,09 | 243,40 | 4,42 | -0,06 | -11,70 |
| | 1,00 | 238,44 | 244,55 | 246,99 | 243,33 | 4,41 | -0,14 | -26,77 |
| | 3,00 | 238,30 | 244,39 | 246,86 | 243,18 | 4,41 | -0,28 | -55,04 |
| | 6,00 | 238,17 | 244,22 | 246,72 | 243,04 | 4,39 | -0,43 | -83,44 |
| | 12,00 | 238,02 | 244,06 | 246,63 | 242,90 | 4,42 | -0,56 | -109,95 |
| FS | 0,00 | 247,53 | 253,85 | 249,72 | 250,37 | 3,21 | - | 0,00 |
| | 0,50 | 247,36 | 253,79 | 249,65 | 250,27 | 3,26 | -0,10 | -19,66 |
| | 1,00 | 247,30 | 253,72 | 249,58 | 250,20 | 3,26 | -0,17 | -32,42 |
| | 3,00 | 247,13 | 253,56 | 249,42 | 250,04 | 3,26 | -0,33 | -64,71 |
| | 6,00 | 247,00 | 253,42 | 249,28 | 249,90 | 3,26 | -0,47 | -91,80 |
| | 12,00 | 246,85 | 253,12 | 249,09 | 249,69 | 3,18 | -0,68 | -132,81 |
| FS_PCM20 | 0,00 | 185,87 | 182,52 | 178,79 | 182,39 | 3,54 | - | 0,00 |
| | 0,50 | 185,78 | 182,45 | 178,73 | 182,32 | 3,53 | -0,07 | -14,60 |
| | 1,00 | 185,73 | 182,39 | 178,67 | 182,26 | 3,53 | -0,13 | -26,17 |
| | 3,00 | 185,50 | 182,21 | 178,49 | 182,07 | 3,51 | -0,32 | -63,84 |
| | 6,00 | 185,32 | 182,06 | 178,36 | 181,92 | 3,48 | -0,48 | -94,34 |
| | 12,00 | 185,14 | 181,90 | 178,21 | 181,75 | 3,47 | -0,64 | -126,95 |
| CS_PCM20 | 0,00 | 216,08 | 214,25 | 217,11 | 215,81 | 1,44 | - | 0,00 |
| | 0,50 | 216,03 | 214,20 | 217,05 | 215,76 | 1,44 | -0,05 | -10,36 |
| | 1,00 | 215,98 | 214,08 | 217,01 | 215,69 | 1,49 | -0,12 | -24,47 |
| | 3,00 | 215,84 | 213,90 | 216,85 | 215,53 | 1,50 | -0,28 | -56,56 |
| | 6,00 | 215,71 | 213,78 | 216,71 | 215,40 | 1,49 | -0,42 | -83,30 |
| | 12,00 | 215,55 | 213,58 | 216,55 | 215,23 | 1,51 | -0,58 | -117,06 |
| CS45_FS30 | 0,00 | 253,70 | 248,51 | 253,67 | 251,96 | 2,99 | - | 0,00 |
| | 0,50 | 253,64 | 248,37 | 253,61 | 251,87 | 3,03 | -0,09 | -15,41 |
| | 1,00 | 253,53 | 248,34 | 253,53 | 251,80 | 3,00 | -0,16 | -28,24 |
| | 3,00 | 253,42 | 248,24 | 253,43 | 251,70 | 3,00 | -0,26 | -47,43 |
| | 6,00 | 252,27 | 248,05 | 253,32 | 251,21 | 2,79 | -0,75 | -134,20 |
| | 12,00 | 252,08 | 247,90 | 253,15 | 251,04 | 2,77 | -0,92 | -165,02 |
| CS30_FS45 | 0,00 | 251,74 | 247,02 | 249,44 | 250,12 | 3,39 | - | 0,00 |
| | 0,50 | 253,78 | 247,08 | 249,50 | 250,02 | 3,40 | -0,10 | -18,29 |
| | 1,00 | 253,69 | 246,97 | 249,40 | 250,02 | 3,40 | -0,10 | -18,29 |
| | 3,00 | 253,52 | 246,81 | 249,24 | 249,86 | 3,40 | -0,26 | -47,19 |
| | 6,00 | 253,40 | 246,69 | 249,13 | 249,74 | 3,40 | -0,38 | -68,84 |
| | 12,00 | 253,22 | 246,52 | 248,94 | 249,56 | 3,39 | -0,56 | -101,28 |
| CS30_FS25_PCM20 | 0,00 | 189,76 | 188,85 | 192,11 | 190,24 | 1,68 | - | 0,00 |
| | 0,50 | 189,71 | 188,78 | 192,05 | 190,18 | 1,69 | -0,06 | -11,47 |
| | 1,00 | 189,60 | 188,71 | 192,00 | 190,10 | 1,70 | -0,14 | -27,25 |
| | 3,00 | 189,42 | 188,50 | 191,85 | 189,93 | 1,73 | -0,31 | -62,46 |
| | 6,00 | 189,28 | 188,35 | 191,74 | 189,79 | 1,75 | -0,45 | -89,65 |
| | 12,00 | 189,09 | 188,19 | 191,59 | 189,62 | 1,76 | -0,62 | -122,94 |
| CS30_FS15_PCM30 | 0,00 | 191,02 | 190,17 | 193,58 | 191,59 | 1,77 | - | 0,00 |
| | 0,50 | 190,95 | 190,09 | 193,44 | 191,50 | 1,74 | -0,09 | -19,01 |
| | 1,00 | 190,88 | 190,03 | 193,39 | 191,43 | 1,75 | -0,16 | -31,53 |
| | 3,00 | 190,72 | 189,85 | 193,23 | 191,27 | 1,76 | -0,32 | -65,50 |
| | 6,00 | 190,58 | 189,71 | 193,10 | 191,13 | 1,76 | -0,46 | -93,99 |
| | 12,00 | 190,39 | 189,52 | 192,92 | 190,94 | 1,77 | -0,65 | -131,54 |
| CS30_FS45_F5 | 0,00 | 239,41 | 241,07 | 256,92 | 245,80 | 9,66 | - | 0,00 |
| | 0,50 | 239,36 | 241,00 | 256,83 | 245,73 | 9,65 | -0,07 | -12,77 |
| | 1,00 | 239,30 | 240,94 | 256,77 | 245,67 | 9,65 | -0,13 | -24,17 |
| | 3,00 | 239,13 | 240,78 | 256,58 | 245,50 | 9,63 | -0,30 | -54,81 |
| | 6,00 | 238,99 | 240,64 | 256,45 | 245,36 | 9,64 | -0,44 | -79,03 |
| | 12,00 | 238,80 | 240,46 | 256,27 | 245,18 | 9,64 | -0,62 | -112,13 |

Capilaridade

| Coeficiente de capilaridade [kg/(m ² .min ^{0,5})] | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|-------|---------------|----------|------|------|-------|---------------|-----------|-------|-------|-------|---------------|
| Tempo [min ^{0,5}] | P | | | | | FS | | | | | FS_PCM20 | | | | |
| | P1 | P2 | P3 | Média | Desvio Padrão | P1 | P2 | P3 | Média | Desvio Padrão | P1 | P2 | P3 | Média | Desvio Padrão |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 1,41 | 3,53 | 3,41 | 3,75 | 3,56 | 0,17 | 3,47 | 3,94 | 3,70 | 3,70 | 0,24 | 13,12 | 10,23 | 7,76 | 10,37 | 2,69 |
| 2,00 | 3,98 | 3,59 | 4,13 | 3,90 | 0,28 | 3,75 | 4,26 | 3,83 | 3,94 | 0,28 | 13,16 | 11,00 | 8,69 | 10,95 | 2,24 |
| 2,45 | 3,94 | 3,81 | 4,33 | 4,03 | 0,27 | 3,93 | 4,36 | 3,98 | 4,09 | 0,23 | 13,23 | 11,38 | 9,41 | 11,34 | 1,91 |
| 2,83 | 4,21 | 3,91 | 4,42 | 4,18 | 0,26 | 3,94 | 4,59 | 4,26 | 4,26 | 0,32 | 13,24 | 11,64 | 9,96 | 11,62 | 1,64 |
| 3,16 | 4,21 | 4,07 | 4,64 | 4,31 | 0,30 | 4,10 | 4,55 | 4,17 | 4,27 | 0,24 | 13,34 | 11,89 | 10,44 | 11,89 | 1,45 |
| 4,47 | 4,49 | 4,27 | 4,90 | 4,55 | 0,32 | 4,37 | 5,16 | 4,65 | 4,73 | 0,40 | 13,42 | 11,99 | 11,35 | 12,25 | 1,06 |
| 5,48 | 4,81 | 4,59 | 5,28 | 4,89 | 0,35 | 4,69 | 5,36 | 4,92 | 4,99 | 0,34 | 13,46 | 12,20 | 11,39 | 12,35 | 1,04 |
| 7,75 | 5,24 | 5,20 | 5,98 | 5,48 | 0,43 | 5,38 | 6,11 | 5,76 | 5,75 | 0,37 | 13,47 | 12,29 | 11,52 | 12,43 | 0,98 |
| 10,95 | 6,24 | 5,93 | 6,66 | 6,27 | 0,36 | 6,11 | 6,95 | 6,40 | 6,49 | 0,43 | 13,62 | 12,37 | 11,57 | 12,52 | 1,03 |
| 13,42 | 6,58 | 6,57 | 7,38 | 6,85 | 0,47 | 6,67 | 7,74 | 7,30 | 7,24 | 0,54 | 13,75 | 12,70 | 11,64 | 12,70 | 1,05 |
| 15,49 | 7,19 | 6,92 | 7,76 | 7,29 | 0,43 | 7,23 | 8,24 | 7,75 | 7,74 | 0,50 | | | | | |
| 17,32 | 7,30 | 7,32 | 8,02 | 7,55 | 0,41 | 7,67 | 8,61 | 8,05 | 8,11 | 0,47 | | | | | |
| 18,97 | 7,53 | 7,49 | 8,03 | 7,68 | 0,30 | 7,96 | 8,71 | 8,33 | 8,33 | 0,38 | | | | | |
| 20,49 | 7,70 | 7,53 | 8,23 | 7,82 | 0,37 | 8,11 | 8,82 | 8,53 | 8,49 | 0,36 | | | | | |
| 21,91 | 7,77 | 7,57 | 8,25 | 7,86 | 0,35 | 8,20 | 8,91 | 8,70 | 8,61 | 0,36 | | | | | |
| 23,24 | | | | | | | | | | | | | | | |
| CC | 0,38 | 0,38 | 0,48 | 0,41 | 0,06 | 0,34 | 0,36 | 0,32 | 0,31 | 0,02 | 0,12 | 0,93 | 1,54 | 0,86 | 0,71 |
| Tempo [min ^{0,5}] | CS | | | | | CS_PCM20 | | | | | CS45_FS30 | | | | |
| | P1 | P2 | P3 | Média | Desvio Padrão | P1 | P2 | P3 | Média | Desvio Padrão | P1 | P2 | P3 | Média | Desvio Padrão |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 1,41 | 4,29 | 3,95 | 4,02 | 4,09 | 0,18 | 3,70 | 3,20 | 4,90 | 3,94 | 0,87 | 3,59 | 3,69 | 3,72 | 3,67 | 0,07 |
| 2,00 | 4,92 | 4,30 | 4,55 | 4,59 | 0,31 | 4,18 | 3,47 | 5,13 | 4,26 | 0,83 | 3,87 | 4,00 | 4,30 | 4,06 | 0,22 |
| 2,45 | 5,39 | 4,73 | 4,74 | 4,95 | 0,38 | 4,27 | 3,76 | 5,06 | 4,36 | 0,65 | 4,15 | 4,16 | 4,40 | 4,24 | 0,14 |
| 2,83 | 5,68 | 4,94 | 4,92 | 5,18 | 0,44 | 4,37 | 3,91 | 5,47 | 4,58 | 0,80 | 4,30 | 4,41 | 4,50 | 4,40 | 0,10 |
| 3,16 | 5,86 | 5,07 | 5,21 | 5,38 | 0,42 | 4,46 | 3,93 | 5,53 | 4,64 | 0,82 | 4,36 | 4,58 | 4,77 | 4,57 | 0,21 |
| 4,47 | 6,26 | 5,31 | 5,54 | 5,70 | 0,50 | 4,85 | 4,16 | 5,69 | 4,90 | 0,77 | 4,88 | 4,76 | 5,08 | 4,91 | 0,16 |
| 5,48 | 6,94 | 5,61 | 5,91 | 6,15 | 0,70 | 5,15 | 4,54 | 6,09 | 5,26 | 0,78 | 5,20 | 5,19 | 5,10 | 5,16 | 0,05 |
| 7,75 | 7,12 | 6,28 | 6,37 | 6,59 | 0,46 | 5,62 | 4,87 | 6,36 | 5,61 | 0,75 | 5,89 | 5,82 | 6,13 | 5,95 | 0,16 |
| 10,95 | 7,29 | 7,21 | 7,18 | 7,23 | 0,05 | 6,33 | 5,67 | 7,03 | 6,34 | 0,68 | 6,95 | 6,95 | 7,12 | 7,00 | 0,10 |
| 13,42 | 7,67 | 7,40 | 7,33 | 7,47 | 0,18 | 6,82 | 6,01 | 7,88 | 6,90 | 0,94 | 7,58 | 7,42 | 7,85 | 7,62 | 0,22 |
| 15,49 | 7,38 | 7,48 | 7,57 | 7,48 | 0,09 | 7,25 | 6,45 | 8,06 | 7,25 | 0,80 | 7,86 | 7,47 | 7,83 | 7,72 | 0,22 |
| 17,32 | 7,39 | 7,58 | 7,33 | 7,44 | 0,13 | 7,59 | 6,67 | 8,39 | 7,55 | 0,86 | 7,97 | 7,59 | 8,09 | 7,88 | 0,26 |
| 18,97 | | | | | | 7,71 | 7,03 | 8,40 | 7,71 | 0,68 | | | | | |
| 20,49 | | | | | | 7,85 | 7,25 | 8,59 | 7,90 | 0,67 | | | | | |
| 21,91 | | | | | | 7,97 | 7,46 | 8,31 | 7,91 | 0,43 | | | | | |
| 23,24 | | | | | | 7,99 | 7,58 | 8,45 | 8,01 | 0,44 | | | | | |
| CC | 0,92 | 0,67 | 0,64 | 0,74 | 0,15 | 0,41 | 0,44 | 0,36 | 0,41 | 0,04 | 0,46 | 0,50 | 0,55 | 0,50 | 0,04 |

Capilaridade

| Coeficiente de capilaridade [kg/(m ² .min ^{0,5})] | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------|------|------|-------|---------------|-----------------|-------|------|-------|---------------|-----------------|-------|------|-------|---------------|------|--|
| Tempo [min ^{0,5}] | CS30_FS45 | | | | | CS30_FS25_PCM20 | | | | | CS30_FS15_PCM30 | | | | | | |
| | P1 | P2 | P3 | Média | Desvio Padrão | P1 | P2 | P3 | Média | Desvio Padrão | P1 | P2 | P3 | Média | Desvio Padrão | | |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| 1,41 | 3,04 | 3,26 | 3,34 | 3,21 | 0,16 | 7,45 | 7,05 | 6,70 | 7,07 | 0,38 | 7,26 | 7,38 | 3,52 | 6,05 | 2,20 | | |
| 2,00 | 3,32 | 3,45 | 3,43 | 3,40 | 0,07 | 8,03 | 7,75 | 7,26 | 7,68 | 0,39 | 7,75 | 8,00 | 3,77 | 6,51 | 2,38 | | |
| 2,45 | 3,45 | 3,78 | 3,73 | 3,65 | 0,18 | 8,36 | 8,17 | 7,71 | 8,08 | 0,33 | 8,20 | 8,40 | 3,86 | 6,82 | 2,57 | | |
| 2,83 | 3,57 | 3,87 | 3,89 | 3,78 | 0,18 | 8,63 | 8,47 | 7,95 | 8,35 | 0,36 | 8,53 | 8,76 | 3,88 | 7,06 | 2,75 | | |
| 3,16 | 3,67 | 3,97 | 4,02 | 3,89 | 0,19 | 8,60 | 8,66 | 8,02 | 8,42 | 0,35 | 8,73 | 8,89 | 3,89 | 7,17 | 2,84 | | |
| 4,47 | 3,82 | 4,38 | 4,42 | 4,21 | 0,33 | 9,35 | 9,49 | 8,84 | 9,22 | 0,34 | 9,09 | 9,65 | 4,24 | 7,66 | 2,98 | | |
| 5,48 | 4,08 | 4,65 | 4,68 | 4,47 | 0,34 | 9,50 | 9,75 | 9,30 | 9,52 | 0,22 | 9,49 | 10,14 | 4,72 | 8,12 | 2,96 | | |
| 7,75 | 4,62 | 5,31 | 5,23 | 5,06 | 0,38 | 9,72 | 10,10 | 9,64 | 9,82 | 0,25 | 10,45 | 10,53 | 4,95 | 8,64 | 3,20 | | |
| 10,95 | 5,27 | 6,09 | 6,26 | 5,87 | 0,53 | 9,84 | 10,25 | 9,81 | 9,97 | 0,25 | 10,99 | 10,96 | 5,55 | 9,17 | 3,14 | | |
| 13,42 | 5,66 | 6,56 | 6,73 | 6,32 | 0,57 | 9,98 | 10,27 | 9,90 | 10,05 | 0,19 | 11,00 | 11,26 | 5,95 | 9,40 | 2,99 | | |
| 15,49 | 6,06 | 6,89 | 7,10 | 6,68 | 0,55 | | | | | | 11,35 | 11,28 | 6,32 | 9,65 | 2,88 | | |
| 17,32 | 6,19 | 7,12 | 7,23 | 6,85 | 0,57 | | | | | | 11,24 | 11,41 | 6,69 | 9,78 | 2,68 | | |
| 18,97 | 6,29 | 7,14 | 7,27 | 6,90 | 0,53 | | | | | | 11,30 | 11,47 | 7,02 | 9,93 | 2,52 | | |
| 20,49 | 6,42 | 7,10 | 7,17 | 6,90 | 0,42 | | | | | | 11,56 | 11,58 | 7,29 | 10,14 | 2,47 | | |
| 21,91 | 6,43 | 7,05 | 7,27 | 6,91 | 0,43 | | | | | | | | | | | | |
| 23,24 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CC | 0,35 | 0,43 | 0,42 | 0,40 | 0,04 | 0,69 | 0,92 | 0,79 | 0,91 | 0,12 | 0,86 | 0,89 | 0,21 | 0,65 | 0,39 | | |
| | CS30_FS45_F5 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Tempo [min ^{0,5}] | P1 | P2 | P3 | Média | Desvio Padrão | | | | | | | | | | | | |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | | | | | | | | | | | |
| 1,41 | 3,75 | 3,73 | 3,41 | 3,63 | 0,19 | | | | | | | | | | | | |
| 2,00 | 4,00 | 3,96 | 3,66 | 3,87 | 0,19 | | | | | | | | | | | | |
| 2,45 | 4,21 | 4,13 | 3,83 | 4,06 | 0,20 | | | | | | | | | | | | |
| 2,83 | 4,26 | 4,30 | 3,96 | 4,17 | 0,19 | | | | | | | | | | | | |
| 3,16 | 4,43 | 4,40 | 4,17 | 4,33 | 0,14 | | | | | | | | | | | | |
| 4,47 | 4,71 | 4,85 | 4,43 | 4,66 | 0,22 | | | | | | | | | | | | |
| 5,48 | 4,98 | 5,02 | 4,72 | 4,91 | 0,16 | | | | | | | | | | | | |
| 7,75 | 5,45 | 5,69 | 5,26 | 5,47 | 0,21 | | | | | | | | | | | | |
| 10,95 | 6,41 | 6,54 | 6,18 | 6,38 | 0,18 | | | | | | | | | | | | |
| 13,42 | 6,83 | 7,10 | 6,77 | 6,90 | 0,17 | | | | | | | | | | | | |
| 15,49 | 7,34 | 7,44 | 7,07 | 7,28 | 0,19 | | | | | | | | | | | | |
| 17,32 | 7,35 | 7,67 | 7,17 | 7,40 | 0,25 | | | | | | | | | | | | |
| 18,97 | 7,39 | 7,69 | 7,34 | 7,47 | 0,19 | | | | | | | | | | | | |
| 20,49 | 7,40 | 7,78 | 7,44 | 7,54 | 0,21 | | | | | | | | | | | | |
| 21,91 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23,24 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CC | 0,38 | 0,39 | 0,42 | 0,40 | 0,02 | | | | | | | | | | | | |

Secagem

Índice de Secagem [-]

| P | | | | | FS | | | | | FS_PCM20 | | | | |
|---------------|--------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|--------|
| Tempo [h] | P1 | P2 | P3 | Média | Tempo [h] | P1 | P2 | P3 | Média | Tempo [h] | P1 | P2 | P3 | Média |
| 0,00 | - | - | - | - | 0,00 | - | - | - | - | 0,0 | - | - | - | - |
| 1,00 | 10,32 | 10,90 | 11,79 | 11,00 | 1,00 | 10,40 | 11,44 | 11,16 | 11,00 | 1,0 | 30,20 | 25,44 | 25,11 | 26,92 |
| 2,00 | 9,98 | 10,49 | 11,37 | 10,61 | 2,00 | 10,03 | 11,10 | 10,78 | 10,63 | 2,0 | 29,48 | 24,76 | 24,49 | 26,25 |
| 3,00 | 9,54 | 9,95 | 10,79 | 10,09 | 3,00 | 9,55 | 10,66 | 10,26 | 10,16 | 3,0 | 28,72 | 24,04 | 23,76 | 25,51 |
| 4,00 | 9,09 | 9,41 | 10,21 | 9,57 | 4,00 | 9,06 | 9,81 | 9,74 | 9,54 | 4,0 | 27,99 | 23,34 | 23,02 | 24,78 |
| 26,00 | 148,38 | 143,93 | 158,58 | 150,30 | 26,00 | 142,81 | 157,46 | 150,70 | 150,32 | 5,0 | 27,38 | 22,75 | 22,41 | 24,18 |
| 49,00 | 73,67 | 62,81 | 77,35 | 71,28 | 49,00 | 68,69 | 81,91 | 67,41 | 72,67 | 6,0 | 26,75 | 22,16 | 21,81 | 23,58 |
| 72,67 | 37,34 | 31,32 | 48,59 | 39,08 | 72,67 | 37,45 | 39,37 | 33,95 | 36,92 | 7,0 | 26,07 | 21,53 | 21,17 | 22,92 |
| 96,42 | 26,29 | 21,86 | 39,08 | 29,08 | 96,42 | 26,92 | 26,53 | 24,25 | 25,90 | 8,0 | 25,51 | 21,01 | 20,66 | 22,39 |
| 116,92 | 17,59 | 15,97 | 30,24 | 21,27 | 116,92 | 19,56 | 18,73 | 18,01 | 18,77 | 9,0 | 24,69 | 20,23 | 19,87 | 21,60 |
| 144,42 | 20,64 | 20,12 | 38,60 | 26,45 | 144,42 | 24,06 | 22,96 | 23,02 | 23,34 | 10,0 | 23,85 | 19,44 | 19,06 | 20,78 |
| 165,92 | 15,15 | 15,50 | 29,63 | 20,09 | 165,92 | 18,19 | 17,34 | 17,78 | 17,77 | 26,0 | 301,51 | 235,52 | 227,92 | 254,98 |
| 189,92 | 16,62 | 16,76 | 21,89 | 18,42 | 189,92 | 19,78 | 18,82 | 19,32 | 19,31 | 49,0 | 223,01 | 167,15 | 162,88 | 184,35 |
| 213,92 | 16,28 | 16,20 | 10,61 | 14,37 | 213,92 | 19,24 | 18,22 | 18,84 | 18,76 | 72,7 | 87,86 | 73,52 | 77,17 | 79,52 |
| IS (137h) | 0,24 | 0,21 | 0,25 | 0,23 | IS (137h) | 0,23 | 0,23 | 0,22 | 0,23 | 96,4 | 37,10 | 36,11 | 37,29 | 36,83 |
| Média | | 0,23 | | | Média | | 0,23 | | | 116,9 | 17,63 | 20,79 | 20,27 | 19,56 |
| Desvio Padrão | | 0,02 | | | Desvio Padrão | | 0,01 | | | 144,4 | 20,15 | 24,81 | 23,80 | 22,92 |
| | | | | | | | | | | 165,9 | 15,68 | 19,18 | 18,42 | 17,76 |
| | | | | | | | | | | 189,9 | 16,92 | 20,62 | 19,75 | 19,09 |
| | | | | | | | | | | 213,9 | 16,33 | 19,79 | 18,85 | 18,32 |
| | | | | | | | | | | IS (137h) | 0,22 | 0,21 | 0,21 | 0,21 |
| | | | | | | | | | | Média | | 0,21 | | |
| | | | | | | | | | | Desvio Padrão | | 0,00 | | |
| CS | | | | | CS_PCM20 | | | | | CS45_FS30 | | | | |
| Tempo [h] | P1 | P2 | P3 | Média | Tempo [h] | P1 | P2 | P3 | Média | Tempo [h] | P1 | P2 | P3 | Média |
| 0,00 | - | - | - | - | 0,00 | - | - | - | - | 0,00 | - | - | - | - |
| 1,00 | 10,56 | 9,67 | 10,01 | 10,08 | 1,00 | 12,79 | 12,16 | 13,82 | 12,92 | 1,00 | 10,58 | 10,51 | 10,25 | 10,45 |
| 2,00 | 10,16 | 9,25 | 9,56 | 9,66 | 2,00 | 12,09 | 11,56 | 13,29 | 12,31 | 2,00 | 10,17 | 9,98 | 9,75 | 9,97 |
| 3,00 | 9,79 | 8,88 | 9,14 | 9,27 | 3,00 | 11,40 | 10,97 | 12,75 | 11,71 | 3,00 | 9,76 | 9,44 | 9,22 | 9,47 |
| 4,00 | 9,37 | 8,47 | 8,69 | 8,85 | 26,00 | 202,47 | 197,53 | 227,42 | 209,14 | 4,00 | 9,46 | 9,03 | 8,81 | 9,10 |
| 5,00 | 8,70 | 7,83 | 7,96 | 8,17 | 49,00 | 119,12 | 121,91 | 132,45 | 124,49 | 5,00 | 9,01 | 8,45 | 8,23 | 8,57 |
| 6,00 | 8,07 | 7,23 | 7,26 | 7,52 | 72,67 | 73,98 | 81,91 | 82,83 | 79,58 | 6,00 | 8,55 | 7,86 | 7,64 | 8,02 |
| 26,00 | 114,52 | 103,37 | 101,33 | 106,41 | 96,42 | 45,00 | 53,88 | 52,52 | 50,47 | 26,00 | 121,98 | 107,92 | 105,17 | 111,69 |
| 49,00 | 59,54 | 56,40 | 52,70 | 56,21 | 116,92 | 26,31 | 32,69 | 31,06 | 30,02 | 49,00 | 63,92 | 53,43 | 53,12 | 56,82 |
| 72,67 | 31,28 | 32,48 | 30,06 | 31,27 | 144,42 | 25,79 | 30,11 | 28,51 | 28,14 | 72,67 | 33,96 | 29,81 | 30,67 | 31,48 |
| 96,42 | 21,04 | 23,26 | 21,71 | 22,00 | 165,92 | 16,82 | 17,68 | 16,91 | 17,14 | 96,42 | 23,31 | 21,27 | 21,77 | 22,12 |
| 116,92 | 14,93 | 16,88 | 16,14 | 15,98 | 189,92 | 18,41 | 20,07 | 18,95 | 19,15 | 116,92 | 16,71 | 15,59 | 15,63 | 15,98 |
| 144,42 | 18,58 | 21,03 | 20,56 | 20,06 | 213,92 | 18,09 | 20,43 | 19,07 | 19,20 | 144,42 | 20,66 | 19,76 | 19,35 | 19,92 |
| 165,92 | 14,27 | 16,10 | 15,88 | 15,42 | IS (137h) | 0,28 | 0,31 | 0,29 | 0,30 | 165,92 | 15,75 | 15,35 | 14,75 | 15,28 |
| 189,92 | 15,35 | 17,41 | 17,17 | 16,64 | Média | | 0,30 | | | 189,92 | 17,04 | 16,52 | 15,87 | 16,47 |
| 213,92 | 14,76 | 16,87 | 16,64 | 16,09 | Desvio Padrão | | 0,01 | | | 213,92 | 16,48 | 15,91 | 15,30 | 15,90 |
| IS (137h) | 0,20 | 0,21 | 0,20 | 0,20 | | | | | | IS (137h) | 0,22 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| Média | | 0,20 | | | | | | | | Média | | 0,20 | | |
| Desvio Padrão | | 0,01 | | | | | | | | Desvio Padrão | | 0,01 | | |

Secagem

Índice de Secagem [-]

| CS30_FS45 | | | | | CS30_FS25_PCM20 | | | | | CS30_FS15_PCM30 | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-----------------|--------|--------|--------|--------|-----------------|--------|--------|--------|--------|
| Tempo [h] | P1 | P2 | P3 | Média | Tempo [h] | P1 | P2 | P3 | Média | Tempo [h] | P1 | P2 | P3 | Média |
| 0,00 | - | - | - | - | 0,00 | - | - | - | - | 0,00 | - | - | - | - |
| 1,00 | 8,07 | 9,49 | 9,08 | 8,88 | 1,00 | 19,25 | 18,90 | 28,44 | 22,19 | 1,00 | 22,60 | 22,60 | 13,73 | 19,64 |
| 2,00 | 7,67 | 9,02 | 8,58 | 8,42 | 2,00 | 18,44 | 18,03 | 27,56 | 21,35 | 2,00 | 21,95 | 21,94 | 13,12 | 19,01 |
| 3,00 | 7,14 | 8,57 | 8,11 | 7,94 | 3,00 | 17,67 | 17,23 | 26,77 | 20,56 | 3,00 | 21,43 | 21,39 | 12,61 | 18,48 |
| 4,00 | 6,82 | 8,20 | 7,71 | 7,58 | 4,00 | 16,95 | 16,45 | 26,02 | 19,81 | 4,00 | 20,85 | 20,78 | 12,05 | 17,89 |
| 5,00 | 6,47 | 7,77 | 7,27 | 7,17 | 5,00 | 16,28 | 15,74 | 25,34 | 19,12 | 5,00 | 20,14 | 20,03 | 11,36 | 17,17 |
| 21,00 | 69,72 | 69,96 | 72,30 | 70,66 | 6,00 | 15,67 | 15,10 | 24,71 | 18,49 | 21,00 | 241,92 | 235,81 | 138,06 | 205,26 |
| 44,67 | 42,29 | 23,85 | 33,17 | 33,11 | 21,00 | 152,89 | 147,04 | 284,33 | 194,75 | 44,67 | 183,37 | 176,07 | 114,59 | 158,01 |
| 68,42 | 21,64 | 14,86 | 14,72 | 17,07 | 44,67 | 84,35 | 67,95 | 283,58 | 145,29 | 68,42 | 92,44 | 62,54 | 62,15 | 72,38 |
| 88,92 | 12,39 | 8,21 | 8,20 | 9,60 | 68,42 | 35,49 | 18,17 | 233,31 | 95,66 | 88,92 | 44,62 | 19,93 | 28,72 | 31,09 |
| 116,42 | 11,83 | 8,67 | 8,79 | 9,76 | 88,92 | 12,89 | 10,69 | 183,57 | 69,05 | 116,42 | 27,97 | 30,25 | 18,97 | 25,73 |
| 137,92 | 7,35 | 6,18 | 6,32 | 6,62 | 116,42 | 8,13 | 9,37 | 237,02 | 84,84 | 137,92 | 9,18 | 9,80 | 7,90 | 8,96 |
| 161,92 | 8,04 | 6,49 | 6,59 | 7,04 | 137,92 | 4,26 | 4,75 | 183,18 | 64,06 | 161,92 | 9,82 | 10,07 | 8,73 | 9,54 |
| 185,92 | 7,88 | 6,10 | 6,17 | 6,72 | 161,92 | 4,28 | 4,76 | 203,87 | 70,97 | 185,92 | 9,73 | 9,88 | 8,66 | 9,42 |
| IS (137h) | 0,18 | 0,13 | 0,14 | 0,15 | 185,92 | 3,76 | 4,20 | 203,31 | 70,42 | IS (137h) | 0,22 | 0,20 | 0,22 | 0,22 |
| Média | 0,15 | | | | IS (137h) | 0,15 | 0,13 | 0,39 | 0,25 | Média | 0,22 | | | |
| Desvio Padrão | 0,03 | | | | Média | 0,23 | | | | Desvio Padrão | 0,01 | | | |
| | | | | | Desvio Padrão | 0,14 | | | | | | | | |

Índice de Secagem [-]

| CS30_FS45_F5 | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|
| Tempo [h] | P1 | P2 | P3 | Média |
| 0,00 | - | - | - | - |
| 1,00 | 10,37 | 11,00 | 10,48 | 10,62 |
| 2,00 | 9,85 | 10,56 | 10,06 | 10,16 |
| 3,00 | 9,41 | 10,18 | 9,69 | 9,76 |
| 4,00 | 8,93 | 9,75 | 9,28 | 9,32 |
| 5,00 | 8,34 | 9,22 | 8,78 | 8,78 |
| 21,00 | 87,16 | 98,31 | 94,59 | 93,35 |
| 44,67 | 46,22 | 53,59 | 54,26 | 51,36 |
| 68,42 | 19,44 | 22,03 | 24,33 | 21,93 |
| 88,92 | 10,62 | 11,96 | 13,55 | 12,04 |
| 116,42 | 10,91 | 12,17 | 13,20 | 12,09 |
| 137,92 | 7,58 | 8,29 | 8,52 | 8,13 |
| 161,92 | 8,04 | 8,88 | 9,24 | 8,72 |
| 185,92 | 7,62 | 8,56 | 8,96 | 8,38 |
| IS (137h) | 0,16 | 0,17 | 0,17 | 0,17 |
| Média | 0,17 | | | |
| Desvio Padrão | 0,01 | | | |

Secagem

Taxa de Secagem [kg/(m².h)]

| CS30_FS45 | | | | | CS30_FS25_PCM20 | | | | | CS30_FS15_PCM30 | | | | |
|---------------------|------|------|------|-------|-----------------|------|------|-------|-------|-----------------|-------|-------|------|-------|
| Tempo [h] | P1 | P2 | P3 | Média | Tempo [h] | P1 | P2 | P3 | Média | Tempo [h] | P1 | P2 | P3 | Média |
| 0,00 | 5,65 | 6,60 | 6,47 | 6,24 | 0,00 | 9,38 | 9,67 | 13,11 | 10,72 | 0,00 | 10,71 | 10,88 | 6,62 | 9,40 |
| 1,00 | 5,57 | 6,30 | 6,14 | 6,00 | 1,00 | 8,98 | 9,21 | 12,68 | 10,29 | 1,00 | 10,38 | 10,53 | 6,32 | 9,08 |
| 2,00 | 5,10 | 5,97 | 5,78 | 5,61 | 2,00 | 8,61 | 8,81 | 12,32 | 9,91 | 2,00 | 10,10 | 10,26 | 6,05 | 8,80 |
| 3,00 | 4,84 | 5,69 | 5,48 | 5,34 | 3,00 | 8,24 | 8,41 | 11,96 | 9,54 | 3,00 | 9,89 | 10,02 | 5,83 | 8,58 |
| 4,00 | 4,65 | 5,45 | 5,23 | 5,11 | 4,00 | 7,92 | 8,03 | 11,64 | 9,19 | 4,00 | 9,57 | 9,68 | 5,52 | 8,25 |
| 5,00 | 4,36 | 5,11 | 4,87 | 4,78 | 5,00 | 7,61 | 7,69 | 11,34 | 8,88 | 5,00 | 9,22 | 9,30 | 5,19 | 7,90 |
| 21,00 | 1,70 | 0,83 | 1,40 | 1,31 | 6,00 | 7,33 | 7,40 | 11,06 | 8,60 | 21,00 | 4,89 | 4,67 | 2,94 | 4,16 |
| 44,67 | 0,79 | 0,54 | 0,54 | 0,62 | 21,00 | 2,39 | 2,40 | 6,13 | 3,64 | 44,67 | 2,34 | 2,39 | 1,62 | 2,12 |
| 68,42 | 0,48 | 0,31 | 0,32 | 0,37 | 44,67 | 1,01 | 0,47 | 4,74 | 2,07 | 68,42 | 1,29 | 0,11 | 0,85 | 0,75 |
| 88,92 | 0,36 | 0,23 | 0,24 | 0,28 | 68,42 | 0,41 | 0,29 | 4,17 | 1,62 | 88,92 | 0,74 | 0,81 | 0,48 | 0,68 |
| 116,42 | 0,24 | 0,20 | 0,21 | 0,21 | 88,92 | 0,19 | 0,23 | 3,95 | 1,46 | 116,42 | 0,21 | 0,23 | 0,18 | 0,20 |
| 137,92 | 0,24 | 0,19 | 0,20 | 0,21 | 116,42 | 0,10 | 0,11 | 3,87 | 1,36 | 137,92 | 0,19 | 0,20 | 0,17 | 0,19 |
| 161,92 | 0,23 | 0,17 | 0,18 | 0,19 | 137,92 | 0,09 | 0,11 | 3,86 | 1,35 | 161,92 | 0,19 | 0,20 | 0,17 | 0,19 |
| 185,92 | 0,23 | 0,17 | 0,18 | 0,19 | 161,92 | 0,08 | 0,09 | 3,84 | 1,34 | 185,92 | 0,19 | 0,19 | 0,17 | 0,18 |
| TS (137h) | 0,19 | 0,27 | 0,23 | 0,23 | 185,92 | 0,07 | 0,09 | 3,84 | 1,33 | TS (137h) | 0,28 | 0,30 | 0,17 | 0,25 |
| Média | | | 0,23 | | TS (137h) | 0,33 | 0,34 | 0,33 | 0,33 | Média | | | 0,25 | |
| Desvio Padrão | | | 0,04 | | Média | | | 0,33 | | Desvio Padrão | | | 0,07 | |
| | | | | | Desvio Padrão | | | 0,01 | | | | | | |
| CS30_FS45_F5 | | | | | | | | | | | | | | |
| Tempo [h] | P1 | P2 | P3 | Média | | | | | | | | | | |
| 0,00 | 6,95 | 7,23 | 6,96 | 7,05 | | | | | | | | | | |
| 1,00 | 6,59 | 6,93 | 6,67 | 6,73 | | | | | | | | | | |
| 2,00 | 6,27 | 6,66 | 6,41 | 6,45 | | | | | | | | | | |
| 3,00 | 6,02 | 6,43 | 6,19 | 6,21 | | | | | | | | | | |
| 4,00 | 5,65 | 6,10 | 5,87 | 5,87 | | | | | | | | | | |
| 5,00 | 5,24 | 5,75 | 5,54 | 5,51 | | | | | | | | | | |
| 21,00 | 1,87 | 2,15 | 2,14 | 2,05 | | | | | | | | | | |
| 44,67 | 0,68 | 0,76 | 0,84 | 0,76 | | | | | | | | | | |
| 68,42 | 0,39 | 0,43 | 0,49 | 0,44 | | | | | | | | | | |
| 88,92 | 0,29 | 0,32 | 0,37 | 0,32 | | | | | | | | | | |
| 116,42 | 0,23 | 0,25 | 0,26 | 0,25 | | | | | | | | | | |
| 137,92 | 0,23 | 0,25 | 0,26 | 0,24 | | | | | | | | | | |
| 161,92 | 0,21 | 0,23 | 0,24 | 0,23 | | | | | | | | | | |
| 185,92 | 0,21 | 0,23 | 0,24 | 0,23 | | | | | | | | | | |
| TS (137h) | 0,24 | 0,24 | 0,23 | | | | | | | | | | | |
| Média | | | 0,23 | | | | | | | | | | | |
| Desvio Padrão | | | 0,01 | | | | | | | | | | | |

Coesão superficial

| P | | FS | | FS_PCM20 | | CS30_FS45 | | CS30_FS25_PCM20 | | CS30_FS15_PCM30 | | CS30_FS45_F5 | | | |
|--------------|------------------|--------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------------|------------------|------------------------|------------------|---------------------|------------------|-------|-------|
| Massa [g] | Diferença [g] | Massa [g] | Diferença [g] | Massa [g] | Diferença [g] | Massa [g] | Diferença [g] | Massa [g] | Diferença [g] | Massa [g] | Diferença [g] | Massa [g] | Diferença [g] | | |
| 0,214 | 0,075 | 0,220 | 0,081 | 0,259 | 0,120 | 0,212 | 0,073 | 0,251 | 0,112 | 0,246 | 0,107 | 0,242 | 0,103 | 0,246 | 0,107 |
| 0,141 | 0,002 | 0,224 | 0,085 | 0,194 | 0,055 | 0,226 | 0,087 | 0,255 | 0,116 | 0,204 | 0,065 | 0,197 | 0,058 | 0,222 | 0,083 |
| 0,199 | 0,060 | 0,257 | 0,118 | 0,203 | 0,064 | 0,232 | 0,093 | 0,222 | 0,083 | 0,224 | 0,085 | 0,194 | 0,055 | 0,359 | 0,220 |
| Média | 0,046 | Média | 0,095 | Média | 0,08 | Média | 0,084 | Média | 0,09 | Média | 0,07 | Média | 0,137 | | |
| DP | 0,039 | DP | 0,020 | DP | 0,04 | DP | 0,010 | DP | 0,02 | DP | 0,03 | DP | 0,073 | | |

Dureza superficial

| | P | FS | FS_PCM20 | CS30_FS45 | CS30_FS25_PCM20 | CS30_FS15_PCM20 | CS30_FS45_F5 | |
|----------------------|----|----|----------|-----------|-----------------|-----------------|--------------|----|
| | 89 | 80 | 75 | 80 | 73 | 59 | 75 | 84 |
| | 84 | 84 | 73 | 79 | 85 | 69 | 77 | 54 |
| | 75 | 87 | 76 | 70 | 52 | 71 | 65 | 58 |
| | 80 | 73 | 83 | 75 | 44 | 64 | 65 | 82 |
| | 80 | 89 | 82 | 74 | 58 | 51 | 70 | 45 |
| | 90 | 82 | 79 | 78 | 66 | 73 | 86 | 63 |
| | 72 | 69 | 68 | 77 | 58 | 68 | 69 | 65 |
| | 70 | 74 | 78 | 68 | 44 | 75 | 71 | 78 |
| | 77 | 79 | 76 | 73 | 55 | 80 | 68 | 60 |
| | 88 | 86 | 75 | 78 | 65 | 75 | 58 | 67 |
| | 76 | 70 | 77 | 81 | 69 | 66 | 70 | 83 |
| | 78 | 82 | 79 | 81 | 80 | 80 | 74 | 73 |
| Média | 80 | 80 | 77 | 76 | 66 | | 71 | 68 |
| Desvio Padrão | 7 | 7 | 4 | 4 | 11 | | 7 | 13 |