

**Avaliação do desempenho mecânico de argamassas
térmicas em protótipos de parede**

Rita Freire Lazera

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores:

Prof.^a Inês dos Santos Flores Barbosa Colen

Prof.^a Maria da Glória de Almeida Gomes

Júri

Presidente: Prof. João Pedro Ramôa Ribeiro Correia

Orientador: Prof.^a Inês dos Santos Flores Barbosa Colen

Vogal: Prof.^a Rita Maria Vilela Nogueira

Outubro 2016

Agradecimentos

A realização da presente dissertação foi feita com a ajuda de algumas pessoas que me incentivaram e apoiaram em todo o percurso, até à conclusão deste trabalho. Assim, passo a agradecer às seguintes pessoas.

Às Professoras Inês Flores-Colen e Maria da Glória Gomes, minhas orientadoras científicas, pela ajuda e incentivo demonstrado ao longo deste projecto, não só pela disponibilidade e interesse, como também pelo rigor na análise de resultados e na revisão do texto e pela partilha do conhecimento sobre o tema, incutindo assim um maior rigor científico no trabalho.

À minha colega e amiga Ana Rita Santos, que desenvolveu a sua dissertação em paralelo comigo. Agradeço o apoio, a dedicação, a ajuda e a amizade que me foi dada, tornando este percurso muito melhor.

Ao Eng^o António Soares, bolsheiro de investigação no IST, por todo o apoio, dedicação e partilha de conhecimentos, nomeadamente na realização dos ensaios experimentais, prestado ao longo de todo o trabalho.

Aos Sr. Leonel Silva e Sr. João Lopes, técnicos do Laboratório de Construção do IST, por todo o apoio, ajuda e dedicação que, com o seu conhecimento, simpatia e esforço, me ajudaram durante o período de ensaios.

Às empresas Weber, Secil, Diasen, Amorim e Gyptec pelo fornecimento de materiais.

À FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia), dado que este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto de investigação FCT PTDC/ECM/11826/2010 NANORENDER – *Performance of sílica nanoaerogel – based renders*.

Por último, e principalmente, aos meus pais por todo o apoio, compreensão, incentivo e carinho demonstrado, ao longo de todo o meu percurso académico, sem os quais seria muito mais complicado. Agradeço também ao meu irmão pelo apoio e amizade que não existe igual.

Deixo também um agradecimento aos restantes amigos e familiares que me ajudaram directa ou indirectamente.

Resumo

A preocupação com o impacto ambiental e as condições de conforto térmico e eficiência energética dos edifícios é cada vez maior. A necessidade de utilizar novas tecnologias para cumprir com as exigências térmicas tem sido impulsionada pela regulamentação térmica e energética de edifícios. Neste sentido, o uso de revestimentos com melhoria do desempenho térmico nas fachadas tem aumentado, onde se incluem os revestimentos em argamassa térmicas com agregados isolantes.

No presente estudo, e para melhor compreender o comportamento mecânico destas argamassas térmicas, foram produzidos nove tipos de argamassas, com diferentes composições, variando o tipo de agregados (cortiça expandida, argila expandida, e aerogel de sílica), sendo três industriais e seis doseadas em laboratório, com adições/adjuvantes.

Foram realizados ensaios de resistência à compressão, à tracção por flexão, módulo de elasticidade dinâmico, aderência ao suporte, velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, resistência superficial *Martinet Baronnie* e índice esclerométrico. Por último, efectuou-se um estudo comparativo entre os resultados das diferentes propriedades.

Após a análise dos resultados, foi possível concluir que o desempenho mecânico é inferior nas argamassas térmicas quando comparadas com a argamassa de controlo. Conclui-se também que o modo de aplicação das argamassas altera o seu desempenho. As argamassas aplicadas nos protótipos de parede apresentaram maiores resistências superficiais mas menores aderências.

Palavras-Chave

Argamassas térmicas; Agregados isolantes térmicos; Comportamento mecânico; Cortiça expandida; Argila expandida; Aerogel; Protótipos de parede

Abstract

The concern to obtain buildings with reduced environmental impact and good thermal comfort is increasing. The need to use new technologies to meet the thermal requirements has been driven by thermal and energy standards for buildings. In this sense, the use of claddings with improved thermal performance in facades has increased, which including renders with insulating aggregates.

In the present study in order to better understand the mechanical behaviour of these mortars, nine types of mortars were produced, with different compositions, varying the type of aggregates (expanded cork, expanded clay, and silica aerogel), being three industrial and six traditional, with additions/admixtures.

Compressive strength, tensile strength, dynamic modulus of elasticity, adherence to the support, ultrasonic wave pulse velocity, surface resistance *Martinet Baronnie* and rebound hammer index tests were carried out. Finally, a comparative study was developed between the results of different properties.

After the analysis of the results, it was concluded that the mechanical performance of the thermal mortars is less than the control mortar. Also concluded that the application of the mortar changes the performance. The mortar applied in wall prototypes presented greater surface resistances but smaller adhesions.

Key-words

Thermal mortars; thermal insulating aggregates; mechanical behaviour; expanded cork; expanded clay; aerogel; wall prototypes

Índice

| | |
|--|--------------|
| Agradecimentos | I |
| Resumo | III |
| Abstract | V |
| Índice de figuras | XI |
| Índice de tabelas | XVI |
| Abreviaturas | XVIII |
| Simbologia | XIX |
| Alfabeto latino | XIX |
| Alfabeto grego | XIX |
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1 Considerações gerais | 1 |
| 1.2 Objectivos e metodologia | 2 |
| 1.3 Estrutura e organização | 2 |
| 2. Desempenho mecânico de argamassas térmicas | 5 |
| 2.1 Considerações gerais | 5 |
| 2.2 Desempenho mecânico de argamassas | 5 |
| 2.3.1 Resistência interna..... | 6 |
| 2.3.2 Capacidade de deformação | 7 |
| 2.3.3 Aderência ao suporte | 8 |
| 2.3.4 Resistência superficial | 9 |
| 2.4 Aplicação da argamassa em revestimento de alvenaria | 10 |
| 2.4.1 Preparação dos suportes | 11 |
| 2.4.2 Produção da argamassa | 12 |
| 2.4.3 Aplicação do reboco..... | 12 |
| 2.5 Caracterização das argamassas térmicas | 13 |
| 2.5.1 Constituintes das argamassas | 14 |
| 2.5.2 Agregados isolantes térmicos | 16 |
| 2.6 Análise do comportamento mecânico de argamassas térmicas no mercado . | 19 |
| 2.6.1 Argamassas térmicas doseadas em laboratório | 19 |
| 2.6.2 Argamassas térmicas industriais..... | 22 |
| 2.7 Síntese do capítulo | 23 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3 | Caracterização do trabalho experimental..... | 25 |
| 3.1 | Considerações gerais | 25 |
| 3.2 | Descrição geral do plano de ensaios..... | 25 |
| 3.3 | Caracterização das argamassas | 26 |
| 3.3.1 | Argamassas doseadas em laboratório | 26 |
| 3.3.2 | Argamassas industriais | 27 |
| 3.4 | Produção das argamassas | 28 |
| 3.4.1 | Produção das argamassas doseadas em laboratório..... | 28 |
| 3.4.2 | Produção de argamassas industriais..... | 29 |
| 3.5 | Processo de execução dos protótipos de parede..... | 29 |
| 3.6 | Aplicação das argamassas | 31 |
| 3.6.1 | Nos protótipos de parede | 31 |
| 3.6.2 | Nos tijolos | 32 |
| 3.6.3 | Nos provetes prismáticos | 33 |
| 3.7 | Ensaio no estado fresco | 34 |
| 3.7.1 | Massa volúmica | 34 |
| 3.7.2 | Consistência por espalhamento | 35 |
| 3.8 | Ensaio no estado endurecido..... | 36 |
| 3.8.1 | Massa volúmica aparente | 36 |
| 3.8.2 | Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas | 36 |
| 3.8.3 | Ensaio de arrancamento por tracção (<i>Pull-off</i>) | 39 |
| 3.8.4 | Esclerómetro pendular | 42 |
| 3.8.5 | Ensaio de resistência superficial <i>Martinet Baronnie</i> | 43 |
| 3.8.6 | Módulo de elasticidade dinâmico | 44 |
| 3.8.7 | Resistência à tração por flexão | 44 |
| 3.8.8 | Resistência à compressão | 45 |
| 3.9 | Síntese do capítulo..... | 47 |
| 4 | Apresentação e discussão dos resultados..... | 49 |
| 4.1 | Considerações gerais | 49 |
| 4.2 | Aplicação das argamassa nos protótipos de parede..... | 49 |
| 4.3 | Caracterização das argamassas no estado fresco | 51 |
| 4.3.1 | Massa volúmica aparente | 51 |
| 4.3.2 | Consistência por espalhamento | 52 |
| 4.4 | Caracterização das argamassas no estado endurecido..... | 54 |
| 4.4.1 | Massa volúmica aparente | 54 |
| 4.4.2 | Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas | 56 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 4.4.3 | Ensaio de arrancamento por tracção (<i>Pull-off</i>) | 60 |
| 4.4.4 | Esclerómetro pendular | 63 |
| 4.4.5 | Ensaio de resistência superficial <i>Martinet Baronnie</i> | 65 |
| 4.4.6 | Módulo de elasticidade dinâmico | 66 |
| 4.4.7 | Resistência à tracção por flexão | 67 |
| 4.4.8 | Resistência à compressão | 69 |
| 4.5 | Correlação entre os resultados das técnicas de ensaio..... | 70 |
| 4.6 | Análise crítica/síntese dos resultados..... | 72 |
| 4.7 | Conclusões do capítulo | 75 |
| 5 | Conclusões e desenvolvimentos futuros..... | 77 |
| 5.1 | Considerações finais..... | 77 |
| 5.2 | Conclusões gerais..... | 77 |
| 5.3 | Propostas para desenvolvimento futuros | 80 |
| | Referências bibliográficas | 81 |
| | Anexos..... | A |
| | Anexo A.3.1 – Características mecânicas das argamassas industriais | C |
| | Anexo A.3.2 – Esquema da disposição dos ensaios nos protótipos de parede.C | C |
| | Anexo A.4.1 – Massa volúmica aparente no estado fresco, resultados individuais..... | D |
| | Anexo A.4.2 – Consistência por espalhamento, resultados individuais | E |
| | Anexo A.4.3 – Massa volúmica aparente no estado endurecido, resultados individuais..... | G |
| | Anexo A.4.4 – Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, resultados individuais (método directo)..... | H |
| | Anexo A.4.5 – Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, resultados individuais (método indirecto – cálculo das médias)..... | H |
| | Anexo A.4.6 – Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, resultados individuais no tijolo (método indirecto – método das dromocrónicas (declive))K | K |
| | Anexo A.4.7 – Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, resultados individuais na parede (método indirecto – método das dromocrónicas (declive))..... | M |

| | |
|---|----------|
| Anexo A.4.8 – Tensão de aderência ao suporte | O |
| Anexo A.4.9 – Índice esclerométrico | Q |
| Anexo A.4.10 – Resistência <i>Martinet Baronnie</i>..... | Q |
| Anexo A.4.11 – Módulo de elasticidade dinâmico | R |
| Anexo A.4.12 – Resistência à tração por flexão | S |
| Anexo A.4.13 – Resistência à compressão | T |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Cimento <i>Portland</i> [W1]..... | 14 |
| Figura 2.2 Granulado de cortiça expandida | 17 |
| Figura 2.3 Aerogel de sílica..... | 18 |
| Figura 2.4 Representação esquemática do processo de preparação dos aerogéis de sílica (Júlio et al. (2013))..... | 19 |
| Figura 2.5 Tensão de compressão e flexão de AIC (Gao, et al 2014)..... | 22 |
| Figura 3.1 Suporte protótipos de parede..... | 26 |
| Figura 3.2 Molde metálicos dos provetes prismáticos | 26 |
| Figura 3.3 Suporte tijolo com cofragem | 26 |
| Figura 3.4 Balança | 29 |
| Figura 3.5 Misturadora mecânica..... | 29 |
| Figura 3.6 Introdução da mistura no recipiente..... | 29 |
| Figura 3.7 Mistura da massa com misturadora mecânica | 29 |
| Figura 3.8 Parede com as aberturas..... | 30 |
| Figura 3.9 Pormenor de uma das aberturas | 30 |
| Figura 3.10 Isolante entre a moldura e a parede | 30 |
| Figura 3.11 Selagem das molduras | 31 |
| Figura 3.12 Pormenor do poliestireno expandido nas laterais e folha de espuma de polietileno na base com passagem de termopar | 31 |
| Figura 3.13 Parede após a colocação dos tijolos nas molduras..... | 31 |
| Figura 3.14 Aplicação dos termopares na face exterior do tijolo | 31 |
| Figura 3.15 Limpeza do suporte..... | 32 |
| Figura 3.16 Humidificação do suporte..... | 32 |
| Figura 3.17 Aplicação da primeira camada..... | 32 |
| Figura 3.18 Superfície rugosa e interface para segunda camada | 32 |
| Figura 3.19 Aplicação da segunda camada..... | 32 |
| Figura 3.20 Acabamento final (liso)..... | 32 |
| Figura 3.21 Humidificação do suporte de tijolo | 33 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.22 Aplicação da argamassa no tijolo | 33 |
| Figura 3.23 Aperto da argamassa com remoção do excesso..... | 33 |
| Figura 3.24 Colocação de óleo mineral descofrante nos moldes | 33 |
| Figura 3.25 Compactação com o pilão..... | 33 |
| Figura 3.26 Alisamento da superfície dos moldes | 33 |
| Figura 3.27 Colocação da argamassa no copo metálico | 34 |
| Figura 3.28 Compactamento da argamassa..... | 34 |
| Figura 3.29 Pesagem do recipiente com a argamassa..... | 34 |
| Figura 3.30 Colocação da argamassa no molde no ensaio de espalhamento | 35 |
| Figura 3.31 Compactação da argamassa no ensaio de espalhamento..... | 35 |
| Figura 3.32 Resultado do alisamento da argamassa no ensaio de espalhamento | 35 |
| Figura 3.33 Após remoção do molde no ensaio de espalhamento..... | 35 |
| Figura 3.34 Equipamento do ensaio de espalhamento..... | 35 |
| Figura 3.35 Medição no ensaio de espalhamento | 35 |
| Figura 3.36 Equipamento <i>PUNDIT LAB</i> | 37 |
| Figura 3.37 Esquema de transmissão directa (EN 12504-4 (CEN, 2004))..... | 37 |
| Figura 3.38 Esquema de transmissão indirecta (EN 12504-4 (CEN, 2004)) | 37 |
| Figura 3.39 Calibração do equipamento | 37 |
| Figura 3.40 Material de contacto (Vaselina)..... | 37 |
| Figura 3.41 Medição do provete prismático | 37 |
| Figura 3.42 Esquema apresentado na norma EN 12504-4 (CEN, 2004) (legenda: T – transdutor transmissor; R – transdutor receptor) | 38 |
| Figura 3.43 Marcação dos percursos num protótipo de parede | 38 |
| Figura 3.44 Marcações do percurso num tijolo | 38 |
| Figura 3.45 Exemplo de medição do método indirecto na parede | 39 |
| Figura 3.46 Exemplo de medição do método indirecto no tijolo | 39 |
| Figura 3.47 Esquema da sequência do ensaio | 39 |
| Figura 3.48 Equipamento de ensaio de <i>Pull-Off</i> | 40 |
| Figura 3.49 Marcações para o ensaio de <i>Pull-Off</i> num protótipo de parede | 40 |
| Figura 3.50 Marcações para o ensaio de <i>Pull-Off</i> num tijolo | 40 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.51 Realização dos cortes na parede para ensaio <i>Pull-Off</i> | 40 |
| Figura 3.52 Realização dos cortes no tijolo para ensaio <i>Pull-Off</i> | 40 |
| Figura 3.53 Pormenor dos cortes até ao tijolo. | 40 |
| Figura 3.54 Pedra de <i>carborundum</i> | 41 |
| Figura 3.55 Alisamento do local de colagem das pastilhas metálicas | 41 |
| Figura 3.56 Pastilhas coladas na argamassa aplicada em tijolo | 41 |
| Figura 3.57 Pastilhas coladas na argamassa aplicada em parede..... | 41 |
| Figura 3.58 Aplicação da força através do aparelho de arrancamento a argamassa aplicada em tijolo | 41 |
| Figura 3.59 Aplicação da força através do aparelho de arrancamento a argamassa aplicada em Parede | 41 |
| Figura 3.60 Esclerómetro | 42 |
| Figura 3.61 Ensaio de esclerómetro no tijolo | 42 |
| Figura 3.62 Ensaio de esclerómetro na parede | 42 |
| Figura 3.63 Esquema do ensaio de <i>Martinet Baronnies</i> | 43 |
| Figura 3.64 Equipamento <i>Martinet Baronnies</i> | 43 |
| Figura 3.65 Ensaio de <i>Martinet Baronnies</i> na parede | 43 |
| Figura 3.66 Ensaio de <i>Martinet Baronnies</i> no tijolo | 43 |
| Figura 3.67 Medição do diâmetro da massa produzida pelo equipamento de <i>Martinet Baronnies</i> | 43 |
| Figura 3.68 Equipamento de leitura de frequências | 44 |
| Figura 3.69 Leitura de frequência de ressonância do modo de vibração à flexão | 44 |
| Figura 3.70 Leitura de frequência de ressonância do modo de vibração à torção | 44 |
| Figura 3.71 Calibração à flexão do equipamento de leitura de frequências..... | 44 |
| Figura 3.72 Calibração à torção do equipamento de leitura de frequências | 44 |
| Figura 3.73 Esquema do ensaio à tração por flexão (EN 1015-11 (CEN, 1999))..... | 45 |
| Figura 3.74 Colocação do provete na máquina de flexão..... | 45 |
| Figura 3.75 Rotura do provete à flexão | 45 |
| Figura 3.76 Provetes a ensaiar à compressão provenientes dos provetes normalizados | 46 |
| Figura 3.77 Provede a ensaiar à compressão proveniente de amostras da argamassa aplicada em parede | 46 |
| Figura 3.78 Ensaio à compressão de meio provete prismático | 46 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.79 Ensaio à compressão de amostra de parede | 47 |
| Figura 4.1 Resultado final da aplicação da argamassa A ^{con} | 49 |
| Figura 4.2 Resultado final da aplicação da argamassa B ^{GC} | 49 |
| Figura 4.3 Resultado final da aplicação da argamassa C ^{AE} | 49 |
| Figura 4.4 Resultado final da aplicação da argamassa D ^{Aero/AE} | 50 |
| Figura 4.5 Resultado final da aplicação da argamassa E ^{GC/AE} | 50 |
| Figura 4.6 Resultado final da aplicação da argamassa F ^{AE/GC} | 50 |
| Figura 4.7 Resultado final da aplicação da argamassa G ^{EPS} | 50 |
| Figura 4.8 Resultado final da aplicação da argamassa H ^{GC/T} | 50 |
| Figura 4.9 Resultado final da aplicação da argamassa I ^{GC} | 50 |
| Figura 4.10 Massa volúmica aparente das argamassas produzidas aos 28 dias, no estado endurecido | 54 |
| Figura 4.11 Valores da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas (método directo) | 56 |
| Figura 4.12 Valores da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas (método indirecto) em argamassas aplicadas em tijolo | 57 |
| Figura 4.13 Valores da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas (método indirecto) em argamassas aplicadas em protótipos de parede | 59 |
| Figura 4.14 Comparação das velocidades de propagação das ondas ultra-sónicas das argamassas aplicadas em tijolo e protótipos de parede. | 60 |
| Figura 4.15 Destacamento da argamassa D ^{Aero/AE} após cortes. | 61 |
| Figura 4.16 Ensaio <i>Pull-Off</i> na argamassa B ^{GC} nos protótipos de parede | 61 |
| Figura 4.17 Ensaio <i>Pull-Off</i> na argamassa H ^{GC/T} nos protótipos de parede | 61 |
| Figura 4.18 Resultado final do ensaio de arrancamento da argamassa B ^{GC} aplicada em tijolo | 62 |
| Figura 4.19 Resultado final do ensaio de arrancamento da argamassa G ^{EPS} aplicada em tijolo | 62 |
| Figura 4.20 Resultado final do ensaio de arrancamento da argamassa H ^{GC/T} aplicada em tijolo | 62 |
| Figura 4.21 Comparação das tensões de rotura nas argamassas aplicadas me tijolo com as aplicadas em protótipos de parede | 63 |
| Figura 4.22 Valores do índice esclerométrico nas argamassas aplicadas em protótipos de parede e tijolo. | 64 |
| Figura 4.23 Diâmetros de mossa do impacto do equipamento de Martinet Baronnie nas argamassas aplicadas em tijolo e nos protótipos de parede..... | 66 |
| Figura 4.24 Valores do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas térmicas | 67 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.25 Resistência á tracção por flexão das argamassas térmicas..... | 68 |
| Figura 4.26 Resistência à compressão dos provetes prismáticos e das amostras retiradas dos protótipos de parede | 70 |
| Figura 4. 27 Correlação dos resultados dos ensaios de Velocidade de propagação das ondas ultrasónicas com Massa Volúmica Aparente | 71 |
| Figura 4. 28 Correlação dos resultados dos ensaios de Velocidade de propagação das ondas ultrasónicas com Massa Volúmica Aparente | 71 |
| Figura 4.29 Correlação dos resultados dos ensaios de resistência superficial de Martinet Baronnie com Resistência à compressão | 72 |

Índice de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 Requisitos de resistência à compressão e à tracção por flexão segundo normalização e especificações técnicas | 7 |
| Tabela 2.2 Requisitos do valor do módulo de elasticidade dinâmico segundo especificações técnicas (Flores-Colen, 2009) | 8 |
| Tabela 2.3 Requisitos de aderência segundo normalização e especificações técnicas | 9 |
| Tabela 2.4 Avaliação da qualidade de argamassas com base em ensaios, utilizando esclerómetro pendular | 10 |
| Tabela 2.5 Requisitos para argamassas térmicas, no estado endurecido (EN 998-1, CEN 2010)..... | 14 |
| Tabela 2.6 Características da Argex® [W3]..... | 18 |
| Tabela 2.7 Características mecânicas das argamassas estudadas por Vale (2014) | 20 |
| Tabela 2.8 Características mecânicas das argamassas estudadas por Barroca (2013) | 20 |
| Tabela 2.9 Características mecânicas das argamassas estudadas por Silva (2014) | 21 |
| Tabela 2.10 Características mecânicas das argamassas estudadas por Gao et al (2014) | 22 |
| Tabela 2.11 Resumo das características mecânicas das argamassas industriais estudadas noutros trabalhos..... | 23 |
| Tabela 3.1 Ensaio realizados nos diferentes suportes, em estado endurecido..... | 26 |
| Tabela 3.2 Constituintes das argamassas doseadas em laboratório produzidas em laboratório | 27 |
| Tabela 3.3 Baridade média dos agregados térmicos (Afonso (2015)) | 27 |
| Tabela 3.4 Constituintes das argamassas industriais declaradas pelos fabricantes..... | 28 |
| Tabela 3.5 Número de ensaios por argamassa | 47 |
| Tabela 4.1 Massa volúmica aparente das argamassas produzidas, no estado fresco..... | 51 |
| Tabela 4.2 Consistência por espalhamento da argamassa produzidas com valores para o espalhamento consoante a massa volúmica no estado fresco pela EN 1015-2 (CEN, 1998)..... | 53 |
| Tabela 4.3 Massa volúmica aparente no estado endurecido..... | 54 |
| Tabela 4.4 valores da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas (método directo)..... | 56 |
| Tabela 4.5 Valores de velocidade aparente das ondas ultra-sónicas (método indirecto), através do cálculo das médias e do método das dromocrónicas na argamassa aplicada em tijolo | 57 |
| Tabela 4.6 Valores de velocidade aparente das ondas ultra-sónicas (método indirecto), através do cálculo das médias e do método das dromocrónicas na argamassa aplicada em protótipos de parede | 58 |
| Tabela 4.7 Resultados da tensão de aderência das argamassas aplicadas nos protótipos de parede e nos tijolos | 60 |

| | |
|--|----|
| Tabela 4.8 Índice esclerométrico das argamassas aplicadas nos protótipos de parede e em tijolo | 63 |
| Tabela 4.9 Diâmetros médios de Martinet Baronnie nas argamassas aplicadas nos protótipos de parede e em tijolo | 65 |
| Tabela 4.10 Módulo de elasticidade das argamassas produzidas | 67 |
| Tabela 4.11 Resultados da resistência à tração por flexão das argamassas produzidas | 68 |
| Tabela 4.12 Resultados da resistência à compressão das argamassas produzidas em provete e aplicadas em tijolo..... | 69 |
| Tabela 4.13 Comparação entre ensaios e tipos de relação..... | 70 |
| Tabela 4.14 Características mecânicas das argamassas produzidas (resumo). | 74 |

Abreviaturas

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CEN – *Comité Européen de Normalisation*

DE – *Directiva Europeia*

EN – *European Standard*

EPS - *Expanded Polystyrene*

ETIC - *External Thermal Insulating system*

IPQ – *Instituto Português da Qualidade*

ISO – *International Organization for Standardization*

LNEC – *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*

RCCTE – *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*

REH – *Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação*

Simbologia

Alfabeto latino

E_d – módulo de elasticidade dinâmico

m – massa

M_v – massa volúmica

R_c – resistência à compressão

R_t – resistência à tracção por flexão

V – volume

$V_{média}$ – velocidade média de propagação das ondas ultra-sónicas

f_u - tensão de aderência

Alfabeto grego

λ – condutibilidade térmica

\varnothing_{mossa} – diâmetro da moosa produzida pelo impacto da esfera de aço do equipamento de *Martinet Baronne*

1. Introdução

1.1 Considerações gerais

Actualmente, a energia gasta em climatização de edifícios é responsável por cerca de 40% do consumo final de energia dos países da União Europeia (DE, 2010), sendo 70% do consumo proveniente de fontes de energia fóssil. A inovação tecnológica de energia é muito importante para encontrar metas de mitigação do clima enquanto também apoia objectivos económicos e de segurança energética (IEA, 2015).

A poupança energética surge associada às necessidades de controlo ambiental, gestão de recursos e controlo dos custos energéticos. Paralelamente, as exigências de conforto dos utilizadores do edificado continuam em crescimento legítimo e previsível (Gonçalves *et al.*, 2012).

A reduzida eficiência energética de alguns edifícios é um dos problemas que infelizmente ainda persiste, porém actualmente existe uma maior atenção para a especificidade do sector da construção e para a necessidade de intervenção em diversos domínios (Mendes, 2012).

O RCCTE (2006) (Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios) e o REH (2013) (Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação) estabelecem requisitos de qualidade para os novos edifícios de habitação, nomeadamente ao nível das características da envolvente, limitando as perdas térmicas e controlando os ganhos solares excessivos (REH, 2013). Por razões regulamentares e pelas exigências actuais de conforto térmico, é necessário isolar a envolvente, como tal, têm surgido novos materiais e soluções construtivas de modo a melhorar o desempenho térmico dos edifícios (Veiga, 2010).

O desempenho real das argamassas de revestimento é influenciado por vários factores em serviço, muitos deles relacionados com a sua aplicação. Em particular, o suporte de aplicação do revestimento é um factor relevante no desempenho em serviço. A compatibilidade do suporte com a argamassa e a preparação prévia do mesmo são elementos fundamentais para o bom funcionamento do sistema argamassa/suporte (Arromba, 2011).

Um sistema de fácil aplicação em obra torna-se essencial, não basta que a tecnologia e a inovação sejam subjacentes aos materiais utilizados, mas também aos processos e tecnologias de aplicação que devem acompanhar a evolução dos produtos. A qualidade da mão-de-obra é o aspecto mais difícil de dominar, e que poderá comprometer o desempenho final do produto. Constata-se que, em Portugal, a qualidade média da mão-de-obra na construção não é elevada, pelo que, a durabilidade de um produto, solução ou sistema novo no mercado é sempre condicionada pela sua maior ou menor aproximação aos processos de aplicação conhecidos. Eis aqui, um dos focos distintivos das soluções de revestimento e isolamento térmico com argamassa térmica de reboco (Gonçalves *et al.*, 2012).

Assim, é imperativo verificar as propriedades mecânicas das argamassas após a sua aplicação em alvenaria.

Este trabalho visou estudar o comportamento mecânico de argamassas térmicas doseadas em laboratório e outras industriais já existentes no mercado, bem como argamassas que incorporam materiais inovadores como o aerogel, tendo como objectivo a compreensão do desempenho mecânico destas argamassas aplicadas em protótipos de parede.

1.2 Objectivos e metodologia

Esta dissertação pretende aprofundar o conhecimento sobre o comportamento mecânico, em serviço, das argamassas térmicas (doseadas em laboratório e industriais), aplicadas em protótipos de parede de tijolo, e perceber a influência de alguns factores de aplicação (verticalidade, tipo de argamassa, temperatura de cura não controlada) no seu desempenho. Para tal, esse estudo baseia-se na utilização de técnicas de ensaio *in-situ* e na interpretação e comparação dos resultados fornecidos pelas mesmas, em campanhas em laboratório e *in-situ*.

Entre estes ensaios destacam-se os ensaios de velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, ensaios de arrancamento por tracção (*pull-off*), índice esclerométrico e ensaio de resistência superficial *Martinet Baronnie*. Adicionalmente, é analisado o desempenho mecânico em provetes e em argamassas aplicadas em tijolos para melhor caracterizar as argamassas e estabelecer uma correlação entre os resultados, comparar a respectiva variabilidade e estudar a influência de diferentes aplicabilidades na análise do desempenho. Neste contexto, os principais objectivos desta dissertação consistem em:

- perceber a influência da incorporação de agregados isolantes (cortiça, argila expandida, aerogel de sílica) na constituição de argamassas térmicas;
- caracterizar mecanicamente as argamassas térmicas nos vários tipos de modelos e aferir quais as características que são mais afetadas/alteradas;
- comparar o desempenho mecânico de argamassas doseadas em laboratório com argamassas industriais, que são consideradas térmicas ou de desempenho térmico melhorado;
- avaliar eventuais aplicações ou restrições destas argamassas.

1.3 Estrutura e organização

Esta dissertação é composta por 5 capítulos: introdução; comportamento mecânico de argamassas térmicas; caracterização do trabalho experimental; apresentação e discussão dos resultados; e, por fim, conclusões e desenvolvimentos futuros.

No primeiro capítulo, é realizado um enquadramento e introdução ao tema, com enfoque nos desafios referentes ao problema da falta de isolamentos nos edifícios e ao desempenho térmico das argamassas

de revestimento, assim como a relevância da dissertação, objectivos a alcançar, e por último, apresenta uma síntese da estrutura e organização do trabalho.

No segundo capítulo, é efetuada uma exposição breve das características do desempenho mecânico das argamassas de revestimento, explicando as exigências funcionais das mesmas. Em seguida, são descritas as principais características mecânicas que influenciam o comportamento mecânico de argamassas bem como, os revestimentos de desempenho térmico melhorado existentes e os principais agregados isolantes utilizados na formulação de argamassas de desempenho térmico melhorado. É também descrita a importância do suporte e da aplicação da argamassa neste. Por último, é realizada uma recolha bibliográfica dos estudos que envolvem argamassas térmicas, doseadas em laboratório e industriais.

No terceiro capítulo, é descrito o trabalho experimental e os ensaios realizados em laboratório, desde a caracterização dos materiais constituintes das argamassas, doseadas em laboratório e industriais, até aos ensaios realizados no estado fresco e no estado endurecido. Aqui também é descrita a realização dos protótipos de parede e método de aplicação das argamassas. Por fim, são descritos os ensaios mecânicos realizados para todos os modelos de ensaio.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados obtidos na campanha experimental, seguidos da respetiva análise e discussão. No final, estudam-se correlações entre os resultados obtidos para as diferentes características mecânicas.

No quinto capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido de acordo com os objetivos traçados. Também neste capítulo, e tendo em conta os objetivos propostos e os resultados atingidos, são apresentadas algumas propostas para desenvolvimentos futuros, de acordo com algumas questões que se consideram relevantes aprofundar. No final do trabalho, são apresentadas as normas e regulamentos utilizados seguidos das referências bibliográficas utilizadas como base de progresso do presente estudo.

Em anexo, apresentam-se os resultados individuais de cada ensaio no estado fresco (consistência por espalhamento e massa volúmica aparente) e no estado endurecido (massa volúmica aparente, velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, aderência ao suporte, ensaio de esclerómetro pendular, ensaio de resistência superficial de *Martinet Baronnie*, módulo de elasticidade dinâmico e resistência à compressão e à tracção por flexão).

2. Desempenho mecânico de argamassas térmicas

2.1 Considerações gerais

Neste capítulo pretende-se recolher informação sobre o desempenho mecânico e a aplicação das argamassas de revestimento de paredes de alvenaria. Também se compila a informação sobre as argamassas térmicas com incorporação de agregados isolantes, com características térmicas melhoradas, e informação dos agregados utilizados, com ênfase para o aerogel de sílica, cortiça expandida e argila expandida

Em Portugal, o isolamento térmico é utilizado na construção de edifícios desde a década de 1950 e é hoje um componente essencial para o bom desempenho energético dos edifícios, conforto higrotérmico interior e durabilidade da envolvente. No início da década de 1990, com a entrada em vigor do primeiro RCCTE (1990) (Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios) impuseram-se pela primeira vez requisitos ao projeto de novos edifícios e de grandes remodelações por forma a salvaguardar a satisfação das condições de conforto térmico nesses edifícios sem necessidades excessivas de energia, quer no inverno, quer no verão (Veiga, 2010). Este regulamento sofreu actualizações em 2006 (RCCTE, 2006) e foi substituído em 2013 pelo REH (2013) (Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação).

O uso de argamassas de revestimento de paredes com fins de isolamento térmico tem tido maior crescimento de aplicação com a incorporação de cada vez mais agregados isolantes e, muitas vezes, sustentáveis, e constitui um desafio no mercado,

2.2 Desempenho mecânico de argamassas

Segundo a norma ISO 6241 (1984), o desempenho de um produto (entendido como o edifício no seu todo ou parte constituinte) encontra-se relacionado com o uso.

De acordo Maciel *et al.* (1998) a resistência mecânica é a propriedade dos revestimentos suportarem as acções mecânicas de diferentes naturezas, devidas à abrasão superficial, ao impacto e à contracção termo-higroscópica. Esta propriedade depende da natureza dos agregados e ligantes e das condições de aplicação.

Assim, para desempenharem correctamente as funções que lhes são exigidas, as argamassas de revestimento de paredes devem satisfazer determinadas regras de qualidade, das quais se destacam, as relacionadas com os aspectos da trabalhabilidade, aderência ao suporte, resistência aos choques, compatibilidade com o suporte e resistência à fendilhação. O grau de exigência relativo a cada uma dessas regras de qualidade será eventualmente maior no caso dos revestimentos exteriores, comparativamente aos revestimentos interiores, embora em ambos os casos as preocupações sejam essencialmente as mesmas (Silva, 2014).

As características de desempenho mecânicas de rebocos exteriores a verificar em serviço, incluem: resistência interna; capacidade de deformação; aderência ao suporte; resistência superficial e compatibilidade entre o reboco/suporte (Flores-Colen, 2009).

Nos capítulos seguintes, enumera-se as características que serão estudadas nesta dissertação.

2.3.1 Resistência interna

A resistência interna do reboco diz respeito à sua propriedade de possuir um estado de endurecimento interno capaz de suportar esforços mecânicos e as tensões que lhe estão associadas (Gomes, 1995). A resistência da argamassa é função tanto da intensidade das tensões que nela são introduzidas como das características resistentes da própria argamassa (Flores-Colen *et al.*, 2012). Para que a argamassa seja resistente à fendilhação, deve ter uma elevada resistência à tracção e um módulo de elasticidade baixo, resistindo assim melhor às tensões instaladas (Veiga, 2001).

Também, quanto maior for a compacidade da argamassa de revestimento, maior a sua resistência aos esforços e tensões a que está sujeita e quanto menor for o teor de água incorporado, mais compacta é a argamassa e maiores também serão a massa volúmica aparente, a resistência mecânica interna e o módulo de elasticidade (Carneiro *et al.*, 1995).

A resistência mecânica interna da argamassa de revestimento é determinada em laboratório através da análise da resistência à compressão e à tracção por flexão, utilizando-se provetes moldados previamente, ou através de amostras recolhidas *in situ* (Flores-Colen *et al.*, 2012). A resistência à compressão é o valor da rotura de uma argamassa determinado através da aplicação de uma força de compressão em dois pontos opostos aos 28 dias de cura (EN 1015-11 (CEN, 1999)), ao passo que a resistência à tracção por flexão é a tensão de rotura de uma argamassa determinada pela aplicação de uma força de flexão em três pontos, traduzindo os esforços de tensão que levam a fissuração da argamassa aos 28 dias de cura (EN 1015-11 (CEN, 1999)).

As argamassas de base cimentícia apresentam valores correntes de resistência à compressão (R_c) entre 2 e 10 MPa, dependendo do tipo de argamassa (Galvão, 2009), conforme requisitos existentes em normas e especificações técnicas, representados na Tabela 2.1. Quanto à resistência à tracção por flexão, não existem requisitos quantitativos, recomendando-se geralmente que seja média (LNEC, 2005). Flores-Colen (2009) através de pesquisa de mercado verificou valores correntes entre 1,5 e 3,5 MPa para argamassas de base cimentícia.

A massa volúmica aparente, no estado endurecido, também entra em conta com a resistência interna de uma argamassa. Este parâmetro corresponde à relação entre a massa do material seco e o seu volume aos 28 dias de cura (Flores-Colen *et al.*, 2012).

Tabela 2.1 Requisitos de resistência à compressão e à tracção por flexão segundo normalização e especificações técnicas

| Requisitos | | Referência |
|----------------|--|-------------------------------|
| R _c | <ul style="list-style-type: none"> • 0,4 < R_c < 2,5 MPa, (classe CS I) • 1,5 < R_c < 5 MPa, (classe CS II) para argamassas de renovação e de isolamento térmico • 3,5 < R_c < 7,5 MPa, (classe CS III) para argamassas leves • R_c ≥ 6 MPa, (classe CS IV) para argamassas de usos geral e de monocamadas | EN 998-1 (CEN, 2010) |
| R _t | R _t média = 2,5 MPa | Relatório 427/05 (LNEC, 2005) |

Legenda: R_c - resistência à compressão; R_t - resistência à tracção por flexão

2.3.2 Capacidade de deformação

Em termos mecânicos, de acordo com Maciel *et al.* (1998), a argamassa só tem o requisito de absorver as deformações de pequena amplitude que ocorram em função da acção da humidade ou da temperatura e não as de grande amplitude, provenientes de outros factores que são a nível estrutural. Esta capacidade de absorver deformações depende:

- do módulo de elasticidade da argamassa - quanto maior for o módulo de elasticidade menor a capacidade de absorver deformações;
- da espessura das camadas - espessuras maiores contribuem para melhorar essa propriedade; no entanto, deve-se tomar cuidado para não se ter espessuras excessivas que poderão comprometer a aderência;
- da técnica de execução / aplicação - a compacidade após a aplicação da argamassa e, também, a compacidade durante o acabamento superficial, iniciado no momento correcto, vão contribuir para o não aparecimento de fissuras.

O módulo de elasticidade pode ser determinado através de ensaios estáticos e dinâmicos dependendo da velocidade de aplicação das solicitações e do modo de medição da respostas. O módulo de elasticidade dinâmico corresponde a deformações instantâneas muito pequenas, e pode ser determinado recorrendo à velocidade de propagação dos ultra-sons ou à frequência ressonante da argamassa (Flores-Colen *et al.*, 2012), sendo este último o utilizado neste trabalho.

As argamassas de revestimento cimentícios apresentam valores correntes de módulo de elasticidade dinâmico (Ed) entre 3500 a 10000 MPa (Flores-Colen, 2009). A limitação do módulo de elasticidade dinâmico, encontra-se relacionada com a limitação da fendilhação (LNEC, 2005). Os valores mais altos recomendam-se em situações de revestimentos mais solicitados por choques ou vibrações enquanto que os valores mais baixos são adequados para situações de suportes mais fracos (Galvão, 2009). Na Tabela 2.2 estão resumidos os valores do módulo de elasticidade dinâmico, segundo especificações e documentações técnicas existentes.

Tabela 2.2 Requisitos do valor do módulo de elasticidade dinâmico segundo especificações técnicas (Flores-Colen, 2009)

| Requisitos | Referência |
|--|--|
| $E_d \leq 10000$ MPa | Relatório 427/05 (LNEC, 2005) |
| $E_d \leq 10000$ MPa para argamassas correntes $E_d \geq 5000$ MPa para argamassas expostos a choques $E_d \geq 7500$ MPa para argamassas em local próximo da via pública ou de circulações de pessoas $E_d \leq 10000$ MPa para revestimentos de suportes muito absorventes $E_d \leq 7000$ MPa para suportes de resistência mecânica mais fraca $E_d \geq 12000$ MPa para revestimentos de paredes expostas a vibrações | Classificação MERUC para argamassas pré-doseadas CSTB (1993) |

Legenda: E_d – módulo de elasticidade dinâmico

2.3.3 Aderência ao suporte

O bom desempenho das argamassas encontra-se associado à sua compatibilidade com os elementos de construção em que vai ser aplicada. É então importante que as suas características mecânicas, entre outra, se ajustem às dos elementos a que se ligam (Pinto *et al.*, 2013).

A aderência ao suporte é a propriedade que possibilita ao reboco resistir às tensões normais e tangenciais actuantes na interface com o suporte, mesmo depois do processo de endurecimento. Uma boa aderência ao suporte é fundamental para o cumprimento das funções de impermeabilização e protecção das paredes. A aderência é influenciada, essencialmente, por aspectos relacionados quer com a argamassa de reboco quer com o suporte, e, por sua vez, influencia bastante a resistência à fendilhação, na medida em que condiciona a distribuição de tensões na argamassa. Quanto mais rica em ligante e com maior teor de finos for a argamassa, maior será a sua aderência. No entanto, uma quantidade em excesso de ligante poderá conduzir a uma maior fendilhação por retracção, que por si só poderá causar falta de aderência (Carasek, 1997; Veiga, 2001; Gaspar *et al.*, 2007).

A aderência depende da penetração dos finos da argamassa no suporte, logo a porosidade e a sucção capilar do suporte também exerça influência na aderência. Assim, a aderência será melhor em suportes absorventes, pois permite melhorar a ligação mecânica. No entanto, é preciso ter em atenção que uma capacidade de absorção exagerada por parte do suporte tenderá a dessecar rapidamente o revestimento, impedindo a hidratação dos seus constituintes e favorecendo a formação de uma interface pulverulenta. Esta situação é possível de ser evitada com a humedificação prévia do suporte, sem que no entanto seja excessiva, pois tal acontecimento pode impedir que se estabeleça a aderência mecânica (Veiga, 2001).

Geralmente avalia-se a aderência do reboco através de ensaios de arrancamento por tracção (*Pull-off*) em estado seco e húmido (Flores-Colen *et al.*, 2012). Os rebocos cimentícios apresentam, em geral, uma tensão de aderência (f_{ti}) superior a 0,3 MPa ou com rotura coesiva, conforme requisitos existentes em normas ou especificações técnicas (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 Requisitos de aderência segundo normalização e especificações técnicas

| Requisitos | Referência |
|--|-------------------------------------|
| $f_{ti} \geq 0,3$ MPa ou rotura coesiva | Relatório 427/05 (LNEC, 2005) |
| $f_{ti} \geq VD$ (valor declarado pelo fabricante e tipologia de rotura) | EN 998-1 (CEN, 2010) |
| $f_{ti} \geq 0,3$ MPa, sem que nenhum valor individual seja inferior a 0,2 MPa | DTU 26.1 (CSTB, 1994) |
| $f_{ti} \geq 0,2$ MPa ou rotura coesiva, para argamassas térmicas | (Veiga, M. R. <i>et al.</i> , 2012) |

No entanto, quando se trata de argamassas térmicas, LNEC indica como exigência adicional que a tensão de aderência tem que ser maior ou igual a 0,2 MPa ou rotura coesiva (Veiga *et al.*, 2012).

2.3.4 Resistência superficial

As acções de impacto ou de atrito conduzem à degradação precoce do reboco, em determinadas condições de serviço. Logo, os rebocos em fachadas devem resistir sem deterioração significativa a estas acções que resultam da ocupação e circulação normais, tais como as que decorrem da mobilidade dos utentes e das operações correntes de limpeza ou de manutenção (Flores-Colen *et al.*, 2012).

A resistência superficial será tanto maior quanto mais coeso for o reboco. Em princípio, os revestimentos de argamassas possuem uma resistência ao choque capaz de suportar acções decorrentes do uso normal. Exceptuando situações de risco, apenas quando os revestimentos são aplicados em camadas muito finas, como alguns revestimentos em monocamadas, ou sobre suportes muito deformáveis, ou ainda utilizados como revestimentos decorativos, sem outra camada de acabamento, há razões particulares para avaliar a resistência superficial (Flores-Colen *et al.*, 2009).

A avaliação desta propriedade é feita através de vários ensaios, incluindo ensaios de resistência ao impacto de corpo duro, riscagem e abrasão. Destaca-se a técnica de ensaio *in situ Martinet Baronnie* para avaliação superficial de reboco aplicados em paredes. Com esta técnica, a resistência superficial pode ser avaliada através de ensaios de corpo duro, cortante (quadriculagem) e não cortante (choque de esfera), tendo em conta uma energia mínima (E) de impacto a que o revestimento resiste, face aos estragos causados (Flores-Colen *et al.*, 2009). Nesta dissertação só se realiza o ensaio de impacto não cortante, onde se mede o diâmetro da moça (mm).

No estudo de Flores-Colen *et al.* (2010), verificou-se que, para avaliação do desempenho de rebocos exteriores de base cimentícia com massa volúmica aparente inferior a 1550 ± 150 kg/m³, o diâmetro da moça provocada pelo equipamento de *Martinnet Baronnie* teve valores entre 13 e 20 mm.

Também existe o ensaio esclerométrico que avalia a dureza superficial e possibilita o mapeamento de zonas com pior desempenho mecânico e, indirectamente, pode ser uma medida qualitativa da resistência à compressão da argamassa. Na Tabela 2.4 são apresentados os valores obtidos em estudos anteriores utilizando esclerómetros do tipo P e PT. Estes estudos avaliam a qualidade de vários tipos de argamassa.

Apesar de alguns autores classificarem o ensaio com esclerómetro como um método dispersivo (Magalhães *et al.*, 2003), não existe na bibliografia consultada muita informação sobre a variabilidade desta técnica. Após uma análise dos estudos já efectuados relativamente à utilização de esclerómetro em argamassas, chegou-se à conclusão que os valores de coeficiente de variação variam entre os 2 e os 20%. Pode-se realçar alguns destes resultados sendo que: Mendonça (2007) obteve 18% (laboratório); Arromba (2011) obteve entre 6 e 20% (laboratório); Flores-Colen (2009) obteve 19% (*in situ*); Galvão (2009) obteve 3 e 20 % (*in situ*); Gonçalves (2010) obteve entre 2 e 9%; e Santos (2012a) obteve entre os 2 e os 6% (*in situ*).

Tabela 2.4 Avaliação da qualidade de argamassas com base em ensaios, utilizando esclerómetro pendular

| Referência | Aplicabilidade | Valor do ressalto | Indicador de qualidade |
|--|--|---------------------------|--|
| Gomes (1995) | Rebocos exteriores doseadas em laboratório de base cimentícia | $IE^P < 80$ | Revestimentos deteriorados ou descolados |
| | | $80 \leq IE^P < 90$ | Revestimento em estado duvidoso |
| | | $IE^P \geq 90$ | Revestimento em bom estado |
| RILEM:MS-D.7 referida por Silva (2004) | Juntas com argamassas de base cimentícia | $IE^P < 15$ | Argamassa muito fraca |
| | | $15 \leq IE^P < 25$ | Argamassa fraca |
| | | $25 \leq IE^P < 35$ | Argamassa moderada |
| | | $35 \leq IE^P < 45$ | Argamassa normal |
| | | $45 \leq IE^P < 55$ | Argamassa dura |
| | | $IE^P \geq 55$ | Argamassa muito dura |
| Fores-Colen (2009) | Rebocos exteriores pré-doseados de base cimentícia | $64 \leq IE^{PT}$ | Desempenho mecânico adequado |
| | Rebocos exteriores doseadas em laboratório e pré-doseados mais compactos, de base cimentícia | $IE^{PT} \geq 75$ | Desempenho mecânico adequado |
| Galvão (2009) | Argamassas pré-doseadas cimentícias (<i>in-situ</i>) | $IE^{PT} \geq 50$ | Desempenho mecânico adequado |
| | Argamassas doseadas em laboratório de cimento (<i>in-situ</i>) | $64 \leq IE^{PT} \leq 75$ | Desempenho mecânico adequado |
| Gonçalves (2010) | Argamassas doseadas em laboratório (laboratório) | $54 \leq IE^{PT} \leq 70$ | Desempenho mecânico adequado |
| | Argamassas pré-doseadas (laboratório) | $59 \leq IE^{PT} \leq 66$ | Desempenho mecânico adequado |

Legenda: IE^P - Índice esclerométrico obtido com o esclerómetro pendular do tipo P; IE^{PT} - Índice esclerométrico obtido com o esclerómetro pendular do tipo PT.

No caso do presente estudo, esta avaliação será feita pois as argamassas estão aplicadas em protótipos de parede e é necessário verificar a sua resistência em serviço, devido ao facto dos agregados serem leves e frágeis.

2.4 Aplicação da argamassa em revestimento de alvenaria

O conhecimento dos materiais, a avaliação das propriedades dos suportes e principalmente a capacidade de avaliar a interacção estabelecida entre a argamassa e o suporte, são princípios básicos para se construir revestimentos eficientes e duráveis. Contudo, tais premissas nem sempre despertam o interesse e a preocupação dos construtores, talvez pelo facto de grande parte das obras não apresentarem nos seus orçamentos, o verdadeiro custo dos revestimentos e muito menos o custo das reparações, recuperações e repercussões de um revestimento mal executado (Pereira *et al.*, 2005). O desempenho futuro do reboco depende, em grande parte, da sua correcta aplicação (Galvão, 2009).

2.4.1 Preparação dos suportes

Segundo Almeida (2010), de uma maneira geral, os suportes convencionais de uma argamassa de reboco são o betão armado e a alvenaria de tijolos ou blocos, quer cerâmicos quer de argamassa por exemplo. Esses suportes devem respeitar uma série de características que contribuam para um óptimo desempenho funcional e estético do reboco tais como:

- Compatibilidade - interação química e mecânica entre o suporte e o revestimento a fim de existir uma perfeita aderência entre ambos;
- Estabilidade - evitar que o suporte se deforme; deformações excessivas do suporte, devido a deslocamentos diferenciados da estrutura ou retracções devido a secagem, no caso de construção nova, devem ser tidos em conta, de maneira a minimizar o aparecimento de fissuração no revestimento;
- Limpeza - para garantir uma eficaz aderência entre o suporte e o revestimento, o suporte deverá estar isento de poeiras, produtos de desmoldagem, gorduras ou outro tipo de materiais que impeçam a perfeita aderência; para o efeito deverá, sempre que necessário, proceder-se à sua limpeza;
- Planura - os desníveis devem ser mínimos e nunca os disfarçando à custa de uma espessura excessiva de argamassa de revestimento;
- Rugosidade - deve ser suficiente para que se desenvolva uma boa aderência entre o suporte e o revestimento. No caso de aplicações manuais de argamassas de revestimento é comum o recurso ao chapisco, a fim de se criar uma superfície rugosa com boa capacidade de aderência ao suporte e possibilitar que posteriormente se proceda a execução do reboco;
- Porosidade - é importante o suporte apresentar alguma porosidade que possibilite a aderência da argamassa pelo que, muitas vezes, se recorre ao chapisco para compensar a falta de porosidade do suporte;
- Absorção de água - não deve ser exagerada, para evitar a secagem demasiado rápida da argamassa e conseqüente esfarelamento da mesma;
- Humidade - o suporte deve apresentar-se húmido; caso esteja seco deve proceder-se à sua molhagem. A quantidade de água a utilizar dependerá do tipo de suporte, da argamassa a usar e das condições climáticas locais.

As boas condições de um suporte devem propiciar uma aderência tal que tenha influência nas funções mecânicas e estéticas da argamassa de reboco. Para suportes novos, a aplicação do reboco só deve ocorrer pelo menos um mês após a sua execução, garantindo-se desta forma que a retracção do suporte já ocorreu.

Assim, antes da aplicação do reboco, o suporte deve ser humedecido, para evitar que absorva parte da água de amassadura da argamassa. No entanto, este não deve ter água a mais, para que não aconteça a situação contrária (Galvão, 2009).

2.4.2 Produção da argamassa

A argamassa deve ser produzida com o máximo cuidado de modo a obter uma mistura homogénea de todas as matérias-primas (Pinto *et al.*, 2013). Tradicionalmente, a mistura é realizada em obra, de forma manual ou em betoneira, embora hoje em dia praticamente só se utilize o fabrico mecânico. Independentemente do processo de produção, os equipamentos utilizados devem estar limpos, de modo a evitar contaminações da argamassa (Galvão, 2009).

Em laboratório, é realizada a amassadura mecânica das argamassas com a misturadora. A amassadura mecânica garante uma melhor homogeneidade da massa em cada amassadura e ao longo do tempo e reduz a possibilidade de haver perdas de matéria-prima. O local de instalação da misturadora deve-se encontrar protegido (Pinto *et al.*, 2013). A produção das argamassas realizam-se de acordo com a norma EN 1015-2 (CEN,1998).

2.4.3 Aplicação do reboco

Para que o reboco possa atingir o desempenho adequado, a aplicação da argamassa deve obedecer a alguns cuidados especiais. A aplicação deve realizar-se em condições atmosféricas favoráveis, de modo a salvaguardar as reacções de hidratação e carbonatação, evitando temperaturas demasiado baixas (abaixo de 5°C) ou demasiado altas (acima de 30°C), assim como situações de humidade elevada. A superfície deve ser preparada de acordo com o descrito, devendo estar abrigada do vento forte e da incidência directa dos raios solares, evitando a dessecação prematura da argamassa (Galvão, 2009).

A aplicação da argamassa de reboco pode ser feita por processos manuais ou por projecção mecânica. Veiga (1998) refere que é difícil dosear uma argamassa de reboco para que o revestimento resultante seja, em simultâneo, pouco susceptível à fendilhação, pouco permeável à água, bastante permeável ao vapor de água, bem aderente ao suporte, entre outros requisitos. Esta dificuldade é ultrapassada, tradicionalmente, através da aplicação de várias camadas de reboco, com funções complementares. A utilização de várias camadas permite, por exemplo, que as fendas que surgem nas várias camadas estejam desfasadas o que torna o revestimento mais resistente.

Os rebocos exteriores são normalmente aplicados em três camadas: salpisco (ou crespido), camada de base (ou de regularização) e camada de acabamento.

O salpisco deve ser executado após preparação do suporte e pulverização do mesmo. Esta camada deve ser pouco espessa, pretendendo apenas garantir uma boa aderência entre o suporte e a camada de base. Assim, deve ser projectada vigorosamente contra o suporte uma argamassa fluida, rica em cimento e que proporcione alguma rugosidade, através da incorporação de grãos de uma granulometria superior (Galvão, 2009).

A camada base deverá assegurar a regularização superficial e verticalidade dos parâmetros e aderir perfeitamente ao salpisco. Esta camada deverá ser lançada vigorosamente contra o salpisco e apertada à talocha, não deverá apresentar uma superfície demasiadamente lisa (Pinto *et al.*, 2013), ficando com um acabamento rugoso.

A camada de acabamento deverá possuir uma boa resistência ao choque. A sua execução será condicionada pelo acabamento pretendido (Pinto *et al.*, 2013). Terminado o reboco, este deve ser humedecido regularmente, para garantir uma cura adequada. Deverá decorrer um intervalo de, pelo menos, 28 dias antes da aplicação de qualquer acabamento final, por pintura por exemplo (Galvão, 2009).

No caso em estudo, visto serem argamassas térmicas, não se realiza a camada de salpisco, para que esta não influencie os resultados físicos das argamassas. Os fabricantes das argamassas térmicas pré-doseadas, aconselham a aplicação destas em duas camadas quando a espessura final é superior a dois centímetros.

Os rebocos devem respeitar as exigências de regularidade e de perfeição da superfície, não devem apresentar defeitos ou irregularidades de superfícies perceptíveis, tais como reentrâncias ou saliências localizadas, fendas, empolamentos, deslocamentos ou pulverulência. A textura da superfície deve ser regular e uniforme (Flores-Colen *et al.*, 2012).

2.5 Caracterização das argamassas térmicas

As argamassas térmicas têm como principal característica a capacidade de apresentarem condutibilidades térmicas reduzidas. A condutibilidade térmica é uma propriedade térmica característica de um material. Esta é igual ao fluxo de calor que atravessa, por unidade de tempo, uma camada de espessura e área unitárias, desse material por unidade de diferença de temperatura entre as suas duas faces, e é geralmente representado simbolicamente pela letra λ (Moret Rodrigues *et al.*, 2009). São admitidas as hipóteses de homogeneidade e isotropia do material relativamente à condutibilidade térmica. Em geral, a condutibilidade térmica dos materiais de construção varia consoante o tipo de material, peso específico, porosidade, fase em que se encontra, temperatura, teor de humidade, propriedades e estrutura interna do material. Assim, a condutibilidade térmica caracteriza a maior ou menor facilidade de transferência de calor, ou seja, de condução de calor por parte dos materiais (Low *et al.*, 2010; Abdou *et al.*, 2013; Saleh, 2006).

As argamassas térmicas são constituídas por agregados isolantes e devem ter espessuras de aplicação superiores a 40 mm (Veiga *et al.*, 2012). Segundo a EN 998-1 (CEN, 2010), caracterizam-se por ter um coeficiente de condutibilidade térmica (λ) inferior a 0,1 e 0,2 (W/(m.K)), classificadas de T1 e T2, respectivamente, como é possível verificar na Tabela 2.5. De acordo com a referida norma, as argamassas térmicas (T) também devem apresentar resistências à compressão entre os 0,4-5 MPa (classes CS I a CS II), apresentar coeficientes de permeabilidade ao vapor de água (μ) inferiores a 0,15 e absorção de água por capilaridade da classe W 1 ($C \leq 0,40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$).

Tabela 2.5 Requisitos para argamassas térmicas, no estado endurecido (EN 998-1, CEN 2010)

| | Propriedades | Classificação | Valores |
|-------------------------|---|---|---|
| Argamassas térmicas (T) | Resistência à compressão | CS I a CS II | 0,4 a 5 MPa |
| | Absorção de água por capilaridade | W1 | $C \leq 0,40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ |
| | Coefficiente de permeabilidade ao vapor de água | - | $\mu \leq 15$ |
| | Condutibilidade térmica | T1 | $\leq 0,1 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ |
| T2 | | $\leq 0,2 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$ | |

Em relação à massa volúmica aparente, de acordo com a norma EN 998-1 (CEN, 2010), as argamassas leves têm uma massa volúmica inferior a 1300 kg/m^3 . Visto as argamassas térmicas serem argamassas com agregados leves, segundo Veiga *et al.* (2012), estas devem ter massas volúmicas inferiores a 600 kg/m^3 .

2.5.1 Constituintes das argamassas

2.5.1.1 Ligantes

Os ligantes são corpos sólidos que se apresentam finamente moídos e quando misturados com água formam pastas mais ou menos plásticas que ganham presa, ou seja, endurecem. O seu poder aglutinante deve ser capaz de promover a ligação da argamassa aos suportes onde é aplicada, para além de contribuir para a estabilidade dos rebocos, quando em contacto com o meio ambiente e durante o processo de secagem. Destacam-se três grupos diferentes de ligantes utilizados correntemente na construção civil: cal, gesso ou cimento (Sousa, 2010; Cruz, 2008).

Nesta dissertação serão utilizados dois tipos de ligantes: o cimento; e a cal.

- **Cimento**

O cimento mais corrente é o cimento *portland* (Figura 2.1). O cimento *portland* artificial cinzento é obtido a partir de uma mistura devidamente proporcionada de calcário (carbonato de cálcio), argila (silicatos de alumínio e ferro) e, eventualmente, outros constituintes ricos em sílica (areia), alumina (bauxite) ou ferro (granalha) (Varela, 2005). É produzido a temperaturas normalmente da ordem dos $1300\text{-}1500^\circ\text{C}$. Para além deste tipo de cimento, são produzidos muitos outros tipos, nomeadamente cimento branco e cimentos pozolânicos (Faria, 2012).



Figura 2.1 Cimento *Portland* [W1]

O cimento branco distingue-se do cimento cinzento, essencialmente ao nível da cor. A selecção de matérias-primas de qualidade, o calcário branco e o caulino é determinante para a brancura final do produto. As matérias-primas têm de possuir baixos teores em óxidos ferrosos, responsáveis pela pigmentação cinzenta. Os cimentos brancos face aos cinzentos são habitualmente mais finos e apresentam resistências à compressão superiores, para as mesmas classes. O tempo de início de presa é geralmente inferior aos registados nos cimentos cinzentos (Varela *et al.*, 2005).

Embora este ligante necessite de mais energia para a sua produção do que a cal, devido às elevadas temperaturas e moagem necessárias, tem vindo a ser feito um esforço significativo por parte da indústria cimentícia no sentido da utilização de combustíveis alternativos, com vista à diminuição do impacto energético associado à produção do cimento (Faria, 2012).

- **Cal**

A cal pode ser aérea ou hidráulica. De acordo com a nova versão da norma NP EN 459- 1 (IPQ, 2011), das cais de construção, as cais aéreas classificam-se como cálcicas (CL) ou dolomíticas (DL). Já as cais com propriedades hidráulicas podem classificar-se como cais hidráulicas naturais (NHL), cais hidráulicas (HL) ou cais formuladas (FL). Cada uma destas famílias tem de respeitar determinados parâmetros, nomeadamente ao nível do teor em hidróxido de cálcio livre, sulfatos e adições permitidas (Faria, 2012).

A cal hidráulica tem características mecânica médias, adequadas para a maioria dos suportes. Esta é obtida por cozedura de calcários margosos (com teores de argila entre 5 e 20%) e pode ser natural ou artificial. Em Portugal, as cais hidráulicas disponíveis são naturais (NHL3,5 e NHL5), que resultam da cozedura, entre 1200 e 1500°C, de rochas calcárias argilosas (contendo 10 a 20% de argila), seguida da extinção da cal viva e da redução a pó. Estas cais tem a propriedade de endurecer em água e são tanto mais hidráulicas quanto maior for a quantidade de argila contida na matéria-prima, tendo um endurecimento mais lento do que o cimento, oferecendo uma maior plasticidade (Flores-Colen *et al.*, 2012; Faria *et al.*, 2012).

2.5.1.2 Agregados

Os agregados são materiais granulares que não intervêm na reacção de endurecimento da argamassa (Flores-Colen *et al.*, 2012). Os agregados das argamassas são geralmente areias. As mais correntes são siliciosas mas podem ser utilizadas areias de outras constituições mineralógicas (calcárias, graníticas, basálticas) e também resultantes de subprodutos de exploração e preparação da rocha (Faria, 2012), sendo que em Portugal os agregados utilizados em argamassas são geralmente areias naturais, extraídas do leito dos rios, ou de areiros, com granulometrias muito variáveis, entre algumas dezenas de micrómetros até dimensões de 5 mm (Veiga, 2001).

Os agregados isolantes serão descritos no subcapítulo 2.5.2.

2.5.1.3 Adjuvantes e adições

Adjuvante é a substância utilizada no fabrico de argamassas numa percentagem inferior a 5% da massa do ligante, adicionado durante a amassadura com o intuito de alterar propriedades no estado fresco, no estado endurecido ou na passagem de um estado para o outro (Coutinho, 1973).

Os adjuvantes são produtos orgânicos ou inorgânicos que podem ser adicionados, geralmente em pequenas quantidades, com o objectivo de modificar propriedades intrínsecas (químicas) das argamassas. Entre os adjuvantes aplicáveis a argamassas de reboco, destacam-se os retentores de água (reduz a perda de água através da redução da exsudação); e os introdutores de ar (substâncias, normalmente orgânicas, capazes de modificar a tensão superficial da água, sendo formados por moléculas com uma parte hidrófuga e uma parte hidrófila).

As adições são materiais orgânicos finamente moídos, que são adicionados com o objectivo de melhorar as propriedades físicas das argamassas, especificamente a resistência mecânica, ductilidade, módulo de elasticidade e comportamento aos sulfatos e reacções sílica/agregados, entre outros (Galvão, 2009).

2.5.2 Agregados isolantes térmicos

O isolamento térmico é um material ou combinação de materiais, que, quando correctamente aplicado, diminui o fluxo de calor através dos elementos.

Em Portugal, os materiais isolantes térmicos, usados na construção, são utilizados em coberturas, paredes simples e duplas e pavimentos sobre espaços interiores não aquecidos (Labrincha *et al.*, 2006). Em busca de novas soluções com melhor desempenho térmico, têm surgido novos materiais que incorporados nas argamassas, em substituição parcial ou total do agregado, conferem-lhes melhorias das propriedades térmicas.

Labrincha (2006) defende que os materiais isolantes são caracterizados por apresentarem densidades inferiores a 150 kg/m^3 e uma condutibilidade térmica abaixo dos $0.05 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$. Segundo o RCCTE (2006), isolante térmico é o material de condutibilidade térmica inferior a $0.065 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, ou cuja resistência térmica superior a $0.30 \text{ (m}^2 \cdot ^\circ\text{C)/W}$ (Anexo I – Espaços com requisitos de conforto térmico).

De seguida serão apresentadas as características dos principais materiais utilizados como agregados em argamassas térmicas.

2.5.2.1 Granulado de cortiça expandida

A cortiça é o parênquima suberoso originado pelo meristema subero-felodérmico do sobreiro (*Quercus suber* L.), constituindo o revestimento do seu tronco e ramos. Macroscopicamente, é um material leve, elástico e praticamente impermeável a líquidos e gases, isolante térmico e eléctrico e absorvedor acústico e vibrático, sendo também inócuo e praticamente imputrescível, apresentando a capacidade

de ser comprimido sem expansão lateral. Microscopicamente, a cortiça é constituída por camadas de células de aspecto alveolar, cujas membranas celulares possuem um certo grau de impermeabilização e estão cheias de um gás semelhante ao ar, que ocupa cerca de 90% do volume (Gil, 1998).

A União Europeia é o maior produtor de cortiça (mais de 80%), designadamente nos países mediterrâneos ocidentais, dos quais se destaca Portugal (superior a 50%). A cortiça possui uma massa volúmica média de cerca de 200 kg/m^3 , e uma baixa condutibilidade térmica. A cortiça é também um material que dissipa a energia de deformação (Gil, 2012).

O primeiro descortiçamento produz uma cortiça chamada virgem com uma superfície exterior muito irregular, sendo usada para produção de granulado de cortiça expandida (Figura 2.2). Descortiçamentos sucessivos dão origem a cortiça com uma superfície exterior mais uniforme (Gil, 1998).



Figura 2.2 Granulado de cortiça expandida

Os granulados são obtidos através da acção de moinhos de estrela ou de dentes (destroçadores), moinhos de martelos e moinhos de facas. É também efectuada uma secagem por circulação forçada de ar quente, para conferir ao granulado o grau de humidade desejado. Os granulados são utilizados como produto final com função de isolamento térmico, sendo também utilizados na preparação de argamassas, para aligeirar o peso em determinados elementos de construção (Gil, 2012).

De acordo com Gil (2012) a massa volúmica do granulado de cortiça expandida encontra-se entre 70 a 80 kg/m^3 , o coeficiente de condutibilidade térmica é igual a $0,048 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ e a granulometria varia entre 0/3, 0/15, 0/10 e 3/15 mm.

2.5.2.2 Argila expandida

A argila expandida é o produto obtido por aquecimento de alguns tipos de argila à temperatura em torno dos $1200 \text{ }^\circ\text{C}$. Próximo desta temperatura, uma parte dos constituintes do material funde-se gerando uma massa viscosa, enquanto a outra parte decompõe-se quimicamente libertando gases que são incorporados por esta massa sinterizada, expandindo-a em até sete vezes o seu volume inicial. Esses gases, retidos no interior da argila, não podem escapar para o seu exterior devido à fase líquida que envolve as partículas da argila. Essa estrutura porosa mantém-se após o resfriamento, de modo que a massa unitária do material resultante torna-se menor do que antes do aquecimento (Moravia, 2006).

O agregado de argila expandida pode ser produzido pelo tratamento térmico da matéria-prima, triturada e classificada granulometricamente, ou moída e pelotizada, feito, geralmente, em forno rotativo a gás ou óleo diesel, similar aos usados na fabricação de cimento *Portland*. Pode, também, ser obtido por sinterização contínua. Nesse caso, o material bem humedecido é transportado numa esteira, sob queimadores, de modo que o calor atinja gradualmente toda a espessura da camada. Os agregados de argila expandida, produzidos pelo processo de sinterização contínua possuem massa específica aparente na faixa compreendida entre 650 kg/ m³ e 900 kg/m³ e os produzidos em forno rotativo, entre 300 kg/m³ e 650 kg/m³ (Mehta, 1994).

O uso de agregados de argila expandida em edifícios deve-se às boas características de isolamento térmico e de resistência ao fogo (material incombustível, classe M0), favorecendo o seu balanço energético (Ferreira *et al.*, 2007).

Na Tabela 2.6 apresentam-se propriedades indicadas por um fabricante do produto.

Tabela 2.6 Características da Argex® [W3]

| Tipo de Argex® | Principal utilização | Granulometria (mm) | Massa volúmica (kg/m ³) | Condutibilidade térmica (W/m.°C) |
|----------------|---|--------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| Argex® 0-2 | Argamassa leve Reboco Betão refratário | 0,25 - 2,0 | 550 | 0,13 |
| Argex® 2-4 | Betão leve de elevada resistência Argamassa leve Abobadilhas e blocos de betão isolante | 4,0 - 8,0 | 358 | 0,11 |

2.5.2.3 Aerogel de sílica

O aerogel de sílica (Figura 2.3) é um nanomaterial muito isolante. Segundo Gonçalves (2012), a nanotecnologia centra-se no estudo e no desenvolvimento de novos materiais funcionais (artificiais), dispositivos e sistemas, a uma escala nanométrica. Um nanomaterial (ou uma nanoestrutura) tem pelo menos uma dimensão crítica inferior a 100nm. Um nanómetro (nm) é a milésima milionésima parte do metro, isto é, 10⁻⁹ m, e equivale ao comprimento de 10 átomos de hidrogénio ou de 5 átomos de silício, alinhados.



Figura 2.3 Aerogel de sílica

Aerogéis de sílica são materiais altamente porosos nanoestruturados obtidos por remoção do líquido de um gel molhado sem encolhimento. São compostos de uma rede altamente reticulada de partículas

de sílica (Bangi *et al.*, 2008). Este material exibe muitas propriedades, que incluem uma forma única e tamanho reduzido dos poros (10-100nm), uma densidade muito baixa (3 a 500 kg/m³, dependendo da porosidade), excelente isolamento térmico (condutibilidade térmica entre 0,01 e 0,02 W/m.K). Estas propriedades fazem com que este material tenha uma boa eficiência energética, crie isolamentos térmico com reduzida espessura, tenha um bom comportamento ao fogo (Flores-Colen, 2014). Na Figura 2.4 encontra-se o método de fabrico destes aerogéis.

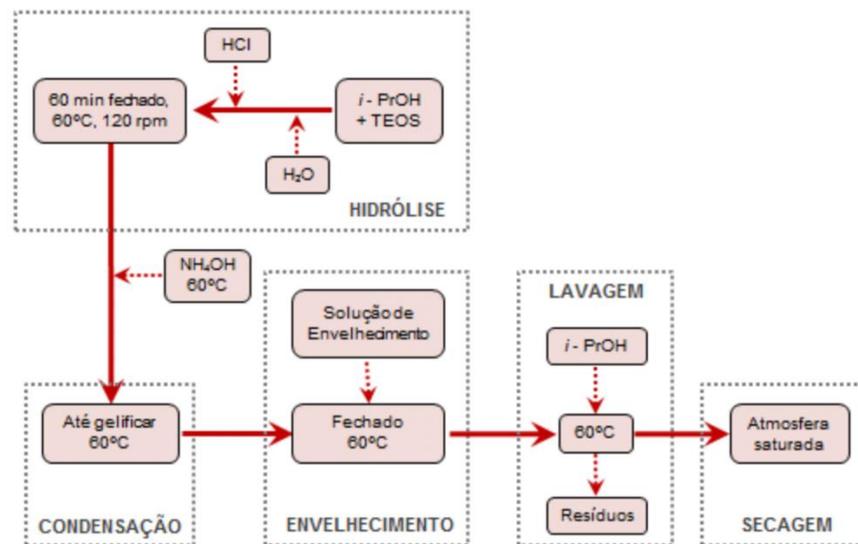


Figura 2.4 Representação esquemática do processo de preparação dos aerogéis de sílica (Júlio *et al.* (2013))

2.6 Análise do comportamento mecânico de argamassas térmicas no mercado

2.6.1 Argamassas térmicas doseadas em laboratório

Foi realizada uma pesquisa de diferentes trabalhos e estudos anteriores com incorporação de agregados isolantes térmicos em argamassas, tendo sido possível observar a introdução de diferentes percentagens de materiais como aerogel de sílica, cortiça e argila expandida em substituição parcial ou total do agregado, com o objectivo de dotar as argamassas com propriedades térmicas.

Em Vale (2014), investigou-se as características mecânicas uma argamassa com 80% de substituição do agregado por cortiça, em provetes prismáticos e aplicada em tijolo. A argamassa continha cimento *portland*, areia e cortiça. Realizaram-se ensaios de resistência à compressão (R_c) em provetes prismáticos normalizados aos 14 e 28 dias de idade. Os resultados da resistência à compressão, resistência à tracção por flexão, módulo de elasticidade e aderência ao suporte encontram-se na Tabela 2.7. Este autor concluiu que a incorporação de agregados isolantes (superior a 70%) em argamassas afectam, significativamente, o desempenho mecânico. No que se refere às argamassas doseadas em

laboratório, verificou-se decréscimos na ordem dos 70-80% para a resistência mecânica (compressão e tração por flexão) por comparação com uma argamassa de referência (R), só com agregado de areia.

Tabela 2.7 Características mecânicas das argamassas estudadas por Vale (2014)

| Desig. | Ligante | M. isolante / % substituição | Mv (kg/m ³) | r (%) | R _c (MPa) | r (%) | R _t (MPa) | r (%) | Ed (MPa) | r (%) | Aderência ao suporte T _{Médio} (MPa) | r (%) |
|-----------------------------------|---------|------------------------------|-------------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|-------|----------|-------|---|-------|
| R | Cimento | - | 1885 | 55 | 16,14 | 87 | 3,43 | 66 | 15140 | 90 | 0,31 | 65 |
| F ^{Trad} _{Cort} | Cimento | Cortiça / 80 | 855 | | 2,08 | | 1,15 | | 1420 | | 0,11 | |

Legenda: Mv - massa volúmica aparente, estado fresco; r - Redução; R_c - resistência à compressão; R_t - resistência à tração por flexão; Ed - módulo de elasticidade dinâmico; R - argamassa referência; F^{Trad}_{Cort} - argamassa de cortiça (80% em volume)

Em Barroca (2013), investigou-se as características mecânicas de argamassas com substituição do agregado nas seguintes percentagens: 25%, 50% e 75%, por cortiça ou argila expandida. Os constituintes das argamassas são: cimento *portland*, cal hidratada, cortiça natural, argila expandida, areia natural amarela e adjuvantes. Realizaram-se ensaios de resistência à compressão (R_c) em provetes prismáticos normalizados aos 14 e 28 dias de idade. Os resultados da resistência à compressão, resistência à tracção por flexão e aderência ao suporte encontram-se na Tabela 2.8.

Este autor verifica que existe uma diminuição da massa volúmica com o aumento da percentagem de substituição e do tipo de agregado. Independentemente da percentagem de substituição deste agregado, a argamassa apresentou sempre resistências iguais ou inferiores à de referência. Esta mesma argamassa obteve o valor mais elevado de aderência. Esta situação poderia ter sido prevista pelo bom comportamento à flexão e compressão, no entanto não era previsível que a sua aderência fosse de tal forma elevada, que ocorresse uma rotura pelo substrato. Verificou-se que as argamassas que apresentam maior ductilidade são aquelas compostas por cortiça, sendo as que apresentam menor ductilidade, as argamassas com argila expandida. Entende-se por ductilidade a capacidade de deformação de um material, um material mais dúctil é aquele com maior capacidade de deformação, sendo o oposto um material frágil. Barroca (2013) conclui ser bastante significativa a influência da deformabilidade dos materiais, na ductilidade das argamassas.

Tabela 2.8 Características mecânicas das argamassas estudadas por Barroca (2013)

| Desig. | Ligante | M. isolante / %substituição | Mv (kg/m ³) | r (%) | R _c (MPa) | r (%) | R _t (MPa) | r (%) | Aderência ao suporte T _{Médio} (MPa) | Tipologia Rotura | r (%) |
|--------|-------------|-----------------------------|-------------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|-------|---|------------------|-------|
| Ref | Cimento/cal | - | 1844 | - | 19,5 | - | 4,5 | - | 0,12 | Adesiva | - |
| COR75 | Cimento/cal | Cortiça / 75 | 754 | 60 | 4 | 80 | 1,8 | 60 | 0,07 | Coesiva | 42 |
| LS75 | Cimento/cal | Argila Exp/75 | 1304 | 30 | 20 | +2,5 | 3,6 | 20 | 0,13 | Adesiva | +8 |

Legenda: Mv – massa volúmica aparente, estado fresco; r – Redução; R_c – resistência à compressão; R_t – resistência à tração por flexão; Ed – módulo de elasticidade dinâmico; R – argamassa referência; F^{Trad}_{Cort} – argamassa de cortiça (80% em volume)

Em Silva (2014) desenvolveram-se argamassas bastardas de revestimento com baixas condutibilidades térmicas, fazendo substituições do agregado, com varias percentagens, por regranulado negro de cortiça. Produziram-se várias formulações com diferentes dosagens de cortiça, correspondendo a substituições de 40% a 100%, em volume, de areia por cortiça com diferentes granulometrias, e uma argamassa de referência (R). Focando na argamassa com 100% de substituição

do agregado por cortiça, esta argamassa contém cal hidráulica e cimento, agregado de cortiça, em que 30% tem granulometria de 2-4 mm e 70% cortiça em pó. Realizaram-se ensaios de resistência à compressão (R_c) e à flexão (R_t) segundo a norma EN 1015- 11 (CEN, 1999). Para esta argamassa, com relação a/c de 1,16, foram obtidas resistências à compressão e à flexão de 1,26 MPa e 0,49 MPa, respectivamente (Tabela 2.9).

Este autor concluiu que a substituição da areia por cortiça deu origem a argamassas com uma massa volúmica aparente no estado endurecido consideravelmente mais baixa que nas misturas de referência, chegando-se a obter uma redução de cerca 70% da massa volúmica aparente ao substituir-se a totalidade da areia por cortiça, nas argamassas de ligante misto. A perda de resistência mecânica é especialmente notória nas misturas em que se procedeu à substituição de 80% e 100% do volume de areia, e em que houve utilização da cortiça em pó. Ainda assim, todas as misturas estudadas retiveram resistências suficientes para se considerar a sua utilização como revestimento de paredes.

Tabela 2.9 Características mecânicas das argamassas estudadas por Silva (2014)

| Desig | Ligante | M. isolante / % substituição | Mv (kg/m ³) | r (%) | Rc (MPa) | r (%) | Rt (MPa) | r (%) | Ed (MPa) | r (%) | IE | r (%) | Aderência ao suporte T _{Médio} (MPa) | r (%) |
|-----------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|------|-------|---|-------|
| R | Cal hidráulica e Cimento | - | 1942.5 | 70 | 11,2 | 89 | 2,9 | 83 | 14793 | 96 | 60,1 | 11 | 0,32 adesiva | 28 |
| CH+C 30R1+ 70R3 | Cal hidráulica e Cimento | Cortiça / 100 | 600 | | 1,26 | | 0,49 | | 657 | | 53,7 | | 0,23 coesiva | |

Legenda: Mv – massa volúmica aparente, estado fresco; r – Redução; Rc – resistência à compressão; Rt – resistência à tração por flexão; Ed – módulo de elasticidade dinâmico; R – argamassa referência; CH+C 30R1+ 70R3– argamassa bastarda de cortiça (100% em volume); IE – índice esclerométrico.

Gao *et al.* (2014) produziu uma argamassa com incorporação de aerogel. A sigla atribuída a esta argamassa é AIC (*aerogel-incorporated concrete*), que é usada para descrever uma argamassa ou betão com base material contendo partículas de aerogel. Esta argamassa tem uma densidade de 1000 kg/m³, uma condutibilidade térmica de 0.26 W/mK e uma resistência à compressão de 8.3 MPa, para uma percentagem de substituição do agregado de aerogel de 60% do volume.

A argamassa com maior conteúdo de aerogel neste trabalho (60% - AIC 2A609) mostra uma densidade medida de cerca de 1000 kg/m³, em comparação com 1980 kg/m³ da amostra de referência (R) só com areia (Tabela 2.10). Também se verificou que as densidades medidas da AIC são ligeiramente maiores do que os seus valores teóricos, que podem ser devido a várias razões: água de absorção por partículas de aerogel, reacção de aerogel com hidróxidos, esmagamento das partículas do aerogel durante o processo de mistura, etc. Visto que a absorção de água pelas partículas de aerogel não é muito provável devido à sua natureza hidrofóbica, e a reacção de aerogel com hidróxidos não é significativo, as mudanças de densidade podem indicar que a presença de partículas porosas de aerogel pode alterar o conteúdo de ar vazio da matriz da argamassa. Em termos mecânicos, quanto maior a percentagem de aerogel menor será a resistência à compressão e à flexão (Figura 2.5).

Tabela 2.10 Características mecânicas das argamassas estudadas por Gao *et al.* (2014)

| Desig. | Ligante | M. isolante / %substituição | Mv (kg/m ³) | redução (%) | Rc (MPa) | redução (%) | Rt (MPa) | redução (%) |
|--------|---------|-----------------------------|-------------------------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|
| R | Cimento | - | 1980 | 51 | - | - | - | - |
| AIC | Cimento | Aerogel / 60 | 1000 | | 8,3 | | 1,2 | |

Legenda: Mv – massa volúmica aparente, estado fresco; Rc – resistência à compressão; Rt – resistência à tração por flexão; R – argamassa referência; AIC – argamassa de aerogel (60% em volume)

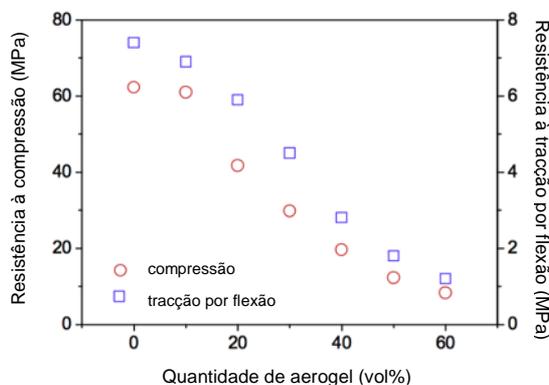


Figura 2.5 Tensão de compressão e flexão de AIC (Gao, *et al.* 2014)

2.6.2 Argamassas térmicas industriais

Na indústria da construção existem, cada vez mais, preocupações com a racionalização dos custos, com o cumprimento de prazos, com a qualidade e durabilidade do trabalho acabado, com as questões relacionadas com a limpeza e gestão do estaleiro de obra, e, principalmente nos centros urbanos, com a falta de espaço disponível para os estaleiros de obra. Assim, o tradicional método de preparação em obra das argamassas, torna-se, cada vez menos adequado, e como resposta a estas questões foi desenvolvida, a partir dos anos 1950, a tecnologia para a produção industrial da argamassas de construção [W3].

Nas argamassas de construção industriais o doseamento e mistura das várias matérias-primas são realizados, de forma perfeitamente controlada, numa instalação fabril. Esta argamassa de construção é fornecida ao cliente pronta a ser misturada com água (no caso mais comum das argamassas secas) ou pronta a aplicar (no caso das argamassa estabilizadas, de forma semelhante ao betão pronto). A expedição é geralmente feita ou em saco ou a granel, para alimentação de um silo colocado em obra, conforme o tipo de produto, o volume de consumo, a localização geográfica da obra, o espaço disponível, entre outros factores que podem determinar esta opção [W4].

Em Vale (2014) já se encontra efectuado estudos das argamassas industriais, ficando aqui os resultados obtidos pelos autores que foram consultados por Vale (2014) e os resultados por ele obtidos (Tabela 2.11).

De acordo com Gonçalves *et al.* (2012) os resultados obtidos foram da classe CS I (0,4 a 2,5 MPa), de acordo com a EN 998-1 (CEN, 2010) para a resistência à compressão, de 0,6 MPa para a resistência à flexão e de 0,15 MPa para a tensão de aderência, registando-se uma rotura adesiva (a). A massa

volúmica aparente obtida foi de 250 kg/m^3 , no estado endurecido e o módulo de elasticidade dinâmico foi de 500 MPa.

Em Frade *et al.* (2012) os resultados obtidos foram de 9,8 MPa para a resistência à compressão, de 3,3 MPa para a resistência à flexão e de 0,34 MPa para a tensão de aderência, registrando-se uma rotura adesiva (a). A massa volúmica aparente obtida foi de 910 kg/m^3 , no estado endurecido e o módulo de elasticidade dinâmico foi de 1009,8 MPa.

Tabela 2.11 Resumo das características mecânicas das argamassas industriais estudadas noutros trabalhos.

| Autor | Designação | Ligante | M. isolante / % adição | Mv (kg/m^3) | Rc (MPa) | Rt (MPa) | Ed (MPa) | Aderência (MPa) |
|--------------------------------|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------|----------|----------|-----------------|
| Gonçalves <i>et al.</i> (2012) | Isodur | Cimento branco | EPS / 70-80 | 250 | 0,4-2,5 | 0,6 | 500 | 0,15 adesiva |
| Vale (2014) | | | | 432 | 1,25 | 0,77 | 620 | 0,21 adesiva |
| Frade <i>et al.</i> (2012) | RHP ecoCORK | cimento | Cortiça / 70-80 | 910 | 9,8 | 3,3 | 1009,8 | 0,34 adesiva |
| Vale (2014) | | | | 863 | 4,4 | 1,89 | 2110 | 0,36 adesiva |
| Fabricante | Evolution | Cal hidráulica NHL 3.5 | Cortiça (si) | 360 ± 20 | 1,5 | - | 742 | 0,1 coesiva |
| Vale (2014) | | | | 642 | 2,1 | 1,13 | 1160 | 0,29 adesiva |

Legenda: Mv – massa volúmica aparente, estado endurecido; Rc – resistência à compressão; Rt – resistência à tração por flexão; Ed – módulo de elasticidade dinâmico; si – sem informação.

2.7 Síntese do capítulo

Sendo a maior parte do consumo de energia eléctrica no sector residencial devido ao aquecimento e arrefecimento das edificações, torna-se essencial a utilização de soluções construtivas que permitam uma diminuição do recurso a equipamentos de climatização. As argamassas térmicas são um exemplo de uma solução existente para atingir os objectivos no que diz respeito ao comportamento térmico e eficiência energética das paredes dos edifícios. Caracterizam-se por terem agregados isolantes com baixa condutibilidade térmica, tais como a cortiça, a argila expandida, o aerogel e o EPS.

Estas argamassas térmicas, sendo para revestimento de alvenarias, não têm só que isolar termicamente mas também têm que cumprir os requisitos mínimos para as características mecânicas e as funções para as quais são destinadas. A forma de aplicação da argamassa no suporte pode condicionar o desempenho mecânico das argamassas, tal como a preparação prévia do suporte.

Pela recolha bibliográfica conclui-se que as argamassas térmicas no mercado, são classificadas de argamassas leves, visto apresentarem massas volúmicas aparentes, no estado endurecido inferiores a 1300 kg/m^3 . No entanto, é preciso ter em conta as adições e adjuvantes inseridos nas argamassas industriais que melhoram a aderência, como sejam os promotores de aderência.

Os estudos anteriores indicam também que os resultados do ensaio de esclerómetro nem sempre são de fácil interpretação, devido a condicionantes como a rugosidade (tipo de acabamento) e características da argamassa, sendo esta a sua principal limitação. Pode fazer-se uma avaliação qualitativa e afirmar que, em geral, os valores de resalto baixos indicam materiais pouco resistentes

e, possivelmente, degradados, o que é um bom indicador para estudar as argamassas em estado endurecido.

Sendo assim, e de forma a obter-se um conhecimento mais aprofundado do desempenho mecânico de argamassas térmicas aplicadas no presente trabalho, foi elaborado um estudo experimental em laboratório sobre o desempenho mecânico deste tipo de argamassas em vários suportes incluindo em protótipos de parede (próximo capítulo).

3 Caracterização do trabalho experimental

3.1 Considerações gerais

O principal objectivo deste capítulo é a caracterização da metodologia utilizada no trabalho experimental. Neste capítulo, primeiramente, é feita uma descrição geral do plano de ensaios e de seguida, são caracterizadas as argamassas térmicas e sua produção. Posteriormente, é descrito o processo de execução dos protótipos de parede, tanto a sua preparação como a aplicação das argamassas. Por último, é feita a descrição e caracterização dos ensaios.

Nesta campanha experimental pretende-se relacionar o desempenho das argamassas em provetes normalizados e após aplicação em modelos de tijolo e protótipos de parede, e observar as diferenças.

No âmbito desta dissertação foram realizados ensaios mecânicos. No entanto, em paralelo com estes ensaios foram realizados ensaios físicos, que constam no artigo científico de Lazera *et al.* (2016). Para tal, procedeu-se à realização dos seguintes ensaios de caracterização mecânica, no estado endurecido: resistência à compressão e à tracção por flexão; ensaio de arrancamento por tracção (*pull-off*); módulo de elasticidade dinâmico; velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas; esclerómetro pendular e ensaio de resistência ao impacto de *Martinet Baronnie*.

3.2 Descrição geral do plano de ensaios

A campanha experimental teve como principal objectivo, fazer uma análise comparativa das características mecânicas das diferentes argamassas térmicas produzidas e aplicadas nos diferentes modelos. Para tal, foram produzidas seis argamassas doseadas em laboratório e três argamassas industriais. Na produção das argamassas doseadas em laboratório optou-se pela introdução de adições/adjuvantes para melhoria na aplicação destas argamassas, visto estas terem sido aplicadas também na vertical. A quantidade de adições/adjuvantes foram mantidas na produção de todas as argamassas doseadas em laboratório, para que seja possível fazer a comparação de resultados entre as argamassas.

As argamassas doseadas em laboratório são de base cementícias e variam os seus agregados entre granulado de cortiça expandida, argila expandida e aerogel. Foi produzida um argamassa de controlo (argamassa A^{con}) contendo só areia como agregado. As argamassas industriais consistiam em duas argamassas com agregado de cortiça expandida (argamassas H^{GC/T} e I^{GC}) e uma com agregado EPS (argamassa G^{EPS}).

Primeiramente, foi preparada a parede da câmara climática para realização dos protótipos de parede com suporte em tijolo cerâmico furado (Figura 3.1), para posterior aplicação das nove argamassas, procedendo-se aos ensaios após 28 dias da aplicação. Durante os 28 dias de cura, procedeu-se a

humidificação da superfície da argamassa em intervalos regulares e colocou-se um plástico em frente à parede, para evitar a retração nos primeiros dias de cura.

Para além dos protótipos, foram produzidos, para cada argamassa, 3 provetes prismáticos normalizados 40x40x160 mm (Figura 3.2) e preparados 2 tijolos cerâmicos furados (Figura 3.3), para serem ensaiados aos 28 dias de idade. Estes foram colocados em sacos de polietileno e armazenados numa câmara de cura, a temperatura constante de 20°C ±2°C e humidade relativa do ar de 50%. A desmoldagem dos provetes e descofragem dos tijolos foi realizada após 5 dias de cura, sendo colocados os mesmos novamente dentro dos sacos de polietileno, no interior da câmara de cura. A remoção dos sacos foi feita aos 7 dias de cura, mantendo os provetes na câmara de cura.



Figura 3.1 Suporte protótipos de parede



Figura 3.2 Molde metálicos dos provetes prismáticos



Figura 3.3 Suporte tijolo com cofragem

A Tabela 3.1 mostra os ensaios que foram realizados e em que modelos foram efectuados. Os ensaios no estado fresco não estão contabilizados na Tabela 3.1 dado que foram realizados, imediatamente, após a produção de todas as argamassas. Os provetes da parede que aparecem na Tabela 3.1 são amostras retiradas das argamassas aplicadas nos protótipos de parede.

Tabela 3.1 Ensaios realizados nos diferentes modelos, em estado endurecido

| Modelos de ensaio | Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas | Resistência à Flexão | Resistência à Compressão | Índice Esclerómetro | Resistência superficial <i>Martinet Baronnie</i> | Módulo Elasticidade Dinâmico | Aderência (<i>Pull-off</i>) |
|---------------------|--|----------------------|--------------------------|---------------------|--|------------------------------|-------------------------------|
| Provete normalizado | x | x | x | | | x | |
| Tijolo | x | | | x | x | | x |
| Parede | x | | | x | x | | x |
| Provete da parede | | | x | | | | |

3.3 Caracterização das argamassas

3.3.1 Argamassas doseadas em laboratório

Foram produzidas em laboratório seis argamassas doseadas em laboratório, das quais cinco eram argamassas térmicas, com agregados isolantes térmicos, e uma era de controlo para comparação. Na Tabela 3.2 encontram-se as percentagens de cada constituinte das argamassas.

Tabela 3.2 Constituintes das argamassas doseadas em laboratório produzidas em laboratório

| Argamassas doseadas em laboratório | Ligante | Adjuvantes (% da massa ligante) | | Agregado em volume (%) | | | | a/c |
|------------------------------------|---------------|---------------------------------|------------------|------------------------|-----|-----|---------|------|
| | | Tensioactivos | Éter de celulose | Areia | GC | AE | Aerogel | |
| A ^{con} | CEM II 32,5 N | 0,05 | 0,075 | 100 | - | - | - | 0,57 |
| B ^{GC} | CEM II 32,5 N | 0,05 | 0,075 | - | 100 | - | - | 0,77 |
| C ^{AE} | CEM II 32,5 N | 0,05 | 0,075 | - | - | 100 | - | 0,78 |
| D ^{Aero/AE} | CEM II 32,5 N | 1,00 | 0,075 | - | - | 40 | 60 | 1,25 |
| E ^{GC/AE} | CEM II 32,5 N | 0,05 | 0,075 | - | 60 | 40 | - | 0,76 |
| F ^{AE/GC} | CEM II 32,5 N | 0,05 | 0,075 | - | 40 | 60 | - | 0,76 |

Legenda: GC- Granulado de cortiça expandida; AE- Argila expandida; a/c – relação água/cimento.

A areia utilizada na campanha experimental foi areia Areipor, sendo esta empregada apenas numa única argamassa, a de controlo (Tabela 3.2). As restantes argamassas tiveram substituição total do agregado de areia por agregados isolantes térmicos, podendo o agregado variar entre granulado de cortiça expandida, argila expandida e/ou aerogel de sílica, materiais já apresentados no Capítulo 2.5.2. Para qualquer agregado as granulometrias utilizadas foram de 0,5-1 mm e 1-2 mm, com excepção do aerogel. Quanto ao aerogel, este não segue nenhuma curva granulométrica específica, devido à fragilidade dos agregados e à sua proporção homogénea, pelo que não foi necessário peneirar este material. As baridades médias dos agregados térmicos constituintes das argamassas doseadas em laboratório, com excepção do aerogel, encontram-se na Tabela 3.3, obtidas por Afonso (2015). A baridade do aerogel foi obtida pelo mesmo método que Afonso (2015) utilizou para achar as restantes baridades, e o valor foi de 67 kg/m³.

Tabela 3.3 Baridade média dos agregados térmicos (Afonso (2015))

| Agregados | Baridade média (kg/m ³) |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| Granulado de cortiça expandida | 52 |
| Argila expandida | 431 |

O cimento utilizado foi o cimento *Portland* composto do tipo CEM II B/L da classe 32,5 N por ser o mais correntemente utilizado em Portugal para a produção de argamassas. Foram adicionados dois tipos de adjuvantes, um retentor de água (éter de celulose) e um introdutor de ar (tensioactivo).

3.3.2 Argamassas industriais

Foram produzidas três argamassas industriais, com junção de água à mistura em pó doseada em fábrica, a partir das respectivas fichas técnicas. Na Tabela 3.4 encontram-se os respectivos constituintes das industriais utilizadas, e no anexo A.3.1 as características mecânicas declaradas pelo fabricante.

Tabela 3.4 Constituintes das argamassas industriais declaradas pelos fabricantes

| Argamassas industriais | Ligante | % de substituição (em volume) | Dimensão do ag. isolante (mm) | Outros agregados | Quantidade de água (l/kg) | Adições/ Adjuvantes | Aplicação |
|------------------------|--|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|--|-----------|
| G ^{EPS} | Cal / Cimento branco e ligantes sintéticos | 70 a 80% EPS | ≤1,5 | si | 0,7 a 0,8 | si | Int/ext |
| H ^{GC/T} | Cal hidráulica NHL 3.5 | Cortiça (si) | ≤3 | Terra diatomácea / Argila | 0,55 | aditivos naturais; fibras de polipropileno; | Int/ext |
| I ^{GC} | Cimento Portland | 70-80% Cortiça | 1,5 a 2 | si | 0,5 | pó redispersível; hidrófugo em pó; agente introdutor de ar e controlo tração; retentores de água | Int/ext |

Legenda: si – sem informação

3.4 Produção das argamassas

3.4.1 Produção das argamassas doseadas em laboratório

Nas argamassas doseadas em laboratório, com excepção da argamassa com aerogel, foram adoptadas as relações a/c obtidas em Carrajola *et al.* (2015), tendo estas sido optimizadas para que as argamassas obtivessem uma consistência de acordo com a norma EN 1015-2 (CEN, 1998). Para a argamassa com aerogel foram realizados cálculos químicos para se obter a relação a/c de 1,25, tendo sido necessário a introdução de água em dois momentos diferentes, directamente no agregado (0,85) e depois na mistura do agregado com o cimento (0,4).

A produção das argamassas doseadas em laboratório teve como base as regras preconizadas na norma EN 1015-2 (CEN,1998), e pode ser resumida nos seguintes passos:

1. Pesou-se os materiais (Figura 3.4);
2. Pesou-se a água e colocou-se no recipiente de mistura;
3. Misturou-se os agregados com o ligante e as adições/adjuvantes e introduziu-se a mistura no recipiente de mistura (Figura 3.6), este processo com duração de cerca de 15 segundos (EN 1015-2 (CEN, 1998));
4. Misturou-se com a misturadora mecânica durante 75 segundos (Figura 3.7) (EN 1015-2 (CEN, 1998));
5. Parou-se uns 5 a 10 segundos para se misturar manualmente a argamassa, retirando os detritos que não foram bem misturados do fundo (EN 1015-9 (CEN, 1999));
6. Misturou-se durante 180 segundos (3 minutos) com a misturadora, tempo aconselhado para as argamassas leves (EN 1015-2 (CEN, 1998), alínea 6.2.3). Como foram utilizados adjuvantes, que conferem maior trabalhabilidade à argamassa, o tempo de mistura diminuiu 2 minutos e 15 segundos, ficando a máquina a misturar durante 2 minutos, havendo um intervalo a meio com mistura manual de cerca de 5 a 10 segundos.



Figura 3.4 Balança



Figura 3.5 Misturadora mecânica



Figura 3.6 Introdução da mistura no recipiente



Figura 3.7 Mistura da massa com misturadora mecânica

3.4.2 Produção de argamassas industriais

Para a produção das três argamassas industriais (Tabela 3.3), seguiram as instruções dos fabricantes em termos da quantidade de água:

1. Pesou-se o produto em pó;
2. Pesou-se da água necessária à mistura;
3. Juntou-se o produto em pó com a água no recipiente misturador;
4. Misturou-se manualmente o produto com auxílio de uma colher de plástico;
5. Misturou-se mecânica durante 1 min;
6. Raspou-se o material aderente às paredes do recipiente com a ajuda de uma espátula;
7. Misturou-se mecânica durante 1 min;
8. Deixou-se a argamassa repousar entre 10 a 15 min.

3.5 Processo de execução dos protótipos de parede

Para a realização dos ensaios nos protótipos de parede foi necessário, em primeiro lugar, a execução dos suportes das argamassas. Estes consistiam em quadrados de tijolo feitos numa parede já existente, realizada por Santos (2012b), numa das laterais de uma câmara climática. Os materiais constituintes da parede existente, de acordo com Santos (2012b), são: tijolo cerâmico furado de 15 cm de espessura; tijolo cerâmico furado de 11 cm de espessura; poliestireno extrudido de 6 cm de espessura; lâ de rocha de 6 cm de espessura; cola SikaBond FoamFix. O valor da coeficiente de transmissão térmica da parede original é $U=0,41 \text{ W/m}^2\text{C}$.

A execução dos modelos de protótipo consistiu na realização de 9 aberturas em toda a espessura da parede existente, com dimensões de 44 cm de altura e 49 cm de largura (Figuras 3.8 e 3.9).

Com o objectivo desta instalação experimental poder ser utilizada em futuros ensaios, foi necessário fixar umas molduras interiores em madeira nas aberturas, com 4 cm de espessura e 40x45 cm de dimensões, através da injeção de espuma de poliuretano entre a moldura e a parede para isolamento da envolvente, evitando assim pontes térmicas e permitindo a respectiva fixação. Esta aplicação encontra-se representada na Figura 3.10. Após a secagem do isolante, foi efectuado um acabamento com uma argamassa cimentícia de traço volumétrico de 1:2 com uma areia de rio, em todo o contorno, conforme ilustração na Figura 3.11.



Figura 3.8 Parede com as aberturas



Figura 3.9 Pormenor de uma das aberturas



Figura 3.10 Isolante entre a moldura e a parede

Foi necessário arranjar uma forma de ser possível remover os tijolos do interior da moldura sem danificar esta última. Para tal, entre os tijolos e a moldura foi colocada uma lâmina de poliestireno expandido nas laterais e folha de espuma de polietileno na base que, para além de servirem como isolante, também facilitam a remoção dos tijolos (Figura 3.12). Em cada moldura foram colocados três tijolos, dois inteiros e duas metades, como se pode ver na Figura 3.13, com argamassa de assentamento com traço volumétrico de 1:2, com aproximadamente espessura de 5 mm, entre estes, igual à argamassa de fechamento já utilizada. Antes da colocação dos tijolos, fez-se passar em todas as aberturas um fio de termopar para leitura das temperaturas na face interior dos tijolos (Figura 3.12), excepto no quadrado central, pois neste passaram dois termopares, um para leitura na face interior do tijolo e outro para leitura dentro da câmara. Assim, ao colocar-se os tijolos teve-se que ter muito cuidado para não danificar nenhum dos termopares já instalados. Após a colocação dos tijolos (Figura 3.13), fixou-se termopares na face exterior, para estes ficarem na interface entre o tijolo e a argamassa (Figura 3.14), tendo o cuidado de colocar os termopares exteriores no mesmo local que os interiores e afastados da união dos tijolos o mais centrado possível.



Figura 3.11 Selagem das molduras



Figura 3.12 Pormenor do poliestireno expandido nas laterais e folha de espuma de polietileno na base com passagem de termopar

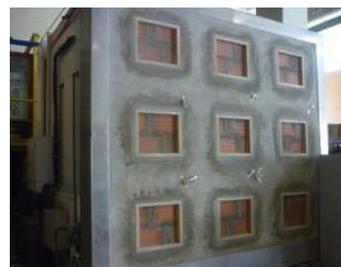


Figura 3.13 Parede após a colocação dos tijolos nas molduras



Figura 3.14 Aplicação dos termopares na face exterior do tijolo

3.6 Aplicação das argamassas

3.6.1 Nos protótipos de parede

A aplicação das várias argamassas nos protótipos de parede foram realizadas conforme se descreve seguidamente, em ambiente natural de laboratório. Como se trata de argamassas com características térmicas, estas foram aplicadas com uma espessura mínima de 4 cm, esta espessura também é recomendada pelos fabricantes das argamassas industriais. A aplicação foi feita em duas fases, ou seja, duas camadas com um máximo de 2 cm de espessura cada.

Para se proceder a aplicação foram necessários equipamentos e utensílios como a máquina de pressão de ar, o borrifador de água, colher de pedreiro, talocha e recipiente para a argamassa. Assim, para todos os protótipos de parede, foram seguidos os passos abaixo descritos:

1. Limpou-se o suporte e a moldura de madeira com máquina de pressão de ar, retirando as poeiras e partículas soltas, como se observa na Figura 3.15;
2. Humidificou-se o suporte, borrifando-o 30 vezes com água e, quando este se apresentou seco, borrifou-se mais 30 vezes (Figura 3.16);
3. Aplicou-se a primeira camada de argamassa (Figura 3.17) quando o suporte se apresentou seco ou pouco húmido e, após a argamassa ter assentado no mínimo 10 minutos (EN 1015-21 (CEN, 2002), alínea 5.2), utilizou-se a talocha e a pá de pedreiro;
4. Criou-se uma superfície rugosa, com a pá de pedreiro, que serve de interface para melhor aderência da segunda camada (Figura 3.18);

- Humidificou-se a superfície antes da aplicação da segunda camada e após 24 horas da aplicação da primeira camada para as argamassas doseadas em laboratório e $H^{GC/T}$, 15 horas para a argamassa I^{GC} e 2 horas para a argamassa G^{EPS} . Borrifou-se 20 vezes a superfície de interface e só se aplicou a segunda camada quando a primeira se apresentou quase seca;
- Aplicou-se a segunda camada de argamassa de espessura de 2 cm (Figura 3.19);
- Após as argamassas aplicadas, efectuou-se um alisamento da superfície com uma régua, para que o acabamento final seja liso (Figura 3.20).



Figura 3.15 Limpeza do suporte



Figura 3.16 Humidificação do suporte



Figura 3.17 Aplicação da primeira camada



Figura 3.18 Superfície rugosa e interface para segunda camada



Figura 3.19 Aplicação da segunda camada



Figura 3.20 Acabamento final (liso)

3.6.2 Nos tijolos

A aplicação das argamassas nos tijolos foi realizada em apenas uma camada de 4 cm, com o suporte colocado na horizontal. Com base na norma EN 1015-21 (CEN, 2002), a aplicação de argamassas em tijolos realizou-se segundo os seguintes passos:

- Fixou-se as cofragens de madeira revestidas com película aderente (para substituição do óleo descofrante) com o auxílio de grampos, de modo a que a argamassa após aplicação fique com uma altura de 4 cm;
- Limpou-se o suporte e as cofragens de madeira, retirando partículas soltas e poeiras;
- Humidificou-se a superfície do tijolo, borrifando 10 vezes, e, após secagem borrifou-se mais 10 vezes, como se observa na Figura 3.21;
- Aplicou-se a argamassa no suporte quando este se apresentou seco e 10 minutos após produção da argamassa, chapando-a até atingir uma camada de 4 cm, como se observa na Figura 3.22;

5. Alisou-se a superfície da argamassa com recurso a colher de pedreiro, removendo o excesso de material (Figura 3.23).



Figura 3.21 Humidificação do suporte de tijolo



Figura 3.22 Aplicação da argamassa no tijolo



Figura 3.23 Aperto da argamassa com remoção do excesso

3.6.3 Nos provetes prismáticos

Na aplicação das argamassas nos provetes prismáticos normalizados, foi seguido o seguinte procedimento, baseado na norma EN 1015-11 (CEN, 1998):

1. Limpou-se os moldes metálicos normalizados, removendo as poeiras e partículas soltas;
2. Aplicou-se, com pincel, o óleo mineral descofrante nos moldes, espalhando bem, como se observa na Figura 3.24;
3. Colocou-se a argamassa até meio do molde;
4. Compactou-se com o pilão dando 25 pancadas em cada provete distribuídas pelo molde, como se observa na Figura 3.25;
5. Encheu-se do molde, a transbordar;
6. Compactou-se novamente com 25 pancadas com o pilão;
7. Removeu-se o excesso de argamassa com uma espátula;
8. Alisou-se a superfície, como se observa na Figura 3.26.



Figura 3.24 Colocação de óleo mineral descofrante nos moldes



Figura 3.25 Compactação com o pilão



Figura 3.26 Alisamento da superfície dos moldes

3.7 Ensaios no estado fresco

3.7.1 Massa volúmica

Para a determinação da massa volúmica em pasta, efetuou-se o ensaio baseado na norma EN 1015-6 (CEN, 1998), o qual determina a massa volúmica através do quociente entre a massa da argamassa fresca e o volume por ela ocupado. Para tal, foi necessário um recipiente cilíndrico com capacidade de 1 l, uma colher de pedreiro e uma balança. A realização deste ensaio ocorreu de acordo com o seguinte procedimento (adaptado de EN 1015-6 (CEN, 1998)):

1. Pesou-se o recipiente cilíndrico com capacidade de 1 l;
2. Encheu-se o recipiente, até metade da sua capacidade, com a argamassa;
3. Compactou-se a argamassa através da queda vertical do copo metálico em cima de um sólido com mais de 25 kg (que no caso, o pavimento), 10 vezes para a argamassa de controlo, e 5 vezes para as restantes argamassas leves, a uma distância máxima de 3 cm (Figura 3.28);
4. Encheu-se o resto do recipiente (Figura 3.27);
5. Repetiu-se do processo de compactação;
6. Rasou-se a superfície do recipiente com colher de pedreiro para retirar o excesso de argamassa;
7. Pesou-se o recipiente contendo a argamassa e registou-se o valor (Figura 3.29).



Figura 3.27 Colocação da argamassa no copo metálico



Figura 3.28 Compactamento da argamassa



Figura 3.29 Pesagem do recipiente com a argamassa

Os resultados do ensaio são obtidos através da equação 3.1.

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3.1)$$

onde:

ρ_m – massa volúmica da argamassa no estado fresco (kg/m^3);

m_1 – massa do recipiente (kg);

m_2 – massa do recipiente + argamassa (kg);

V – volume do recipiente (1 litro).

3.7.2 Consistência por espalhamento

A consistência da argamassa no estado fresco foi avaliada recorrendo ao ensaio do espalhamento, segundo a norma EN 1015-3 (CEN, 1999), que consiste na medição do diâmetro médio do espalhamento da argamassa quando submetido a um determinado número de impactos verticais numa mesa preparada para o efeito. A realização deste ensaio ocorreu de acordo com o seguinte procedimento (adaptado de EN 1015-3 (CEN, 1999)):

1. Humedeceu-se as faces interiores do molde troncocónico e da mesa de espalhamento, com um pano húmido;
2. Colocou-se o molde troncocónico no centro da mesa de espalhamento;
3. Encheu-se o molde troncocónico, com argamassa, até meio (Figura 3.30);
4. Compactou-se com 10 pancadas verticais com o pilão (Figura 3.31);
5. Encheu-se o resto do molde até transbordar;
6. Repetiu-se a compactação (10 pancadas);
7. Rasou-se do molde e limpou-se a mesa para retirar os excessos de argamassa (Figura 3.32);
8. Removeu-se o molde (Figura 3.33) e executou-se 15 pancadas na mesa, espaçadas de um segundo (Figura 3.34);
9. Mediu-se e registou-se o diâmetro de espalhamento da argamassa em três direções (Figura 3.35).



Figura 3.30 Colocação da argamassa no molde no ensaio de espalhamento



Figura 3.31 Compactação da argamassa no ensaio de espalhamento



Figura 3.32 Resultado do alisamento da argamassa no ensaio de espalhamento



Figura 3.33 Após remoção do molde no ensaio de espalhamento



Figura 3.34 Equipamento do ensaio de espalhamento



Figura 3.35 Medição no ensaio de espalhamento

3.8 Ensaios no estado endurecido

3.8.1 Massa volúmica aparente

A massa volúmica aparente, no estado endurecido, foi determinada através do princípio geométrico, segundo a norma EN 1015-10 (CEN, 1999). Este ensaio foi realizado nos provetes normalizados, para cada argamassa. Dado o ensaio não ser destrutivo, reutilizaram-se os provetes para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico, da resistência à tração por flexão e compressão. Para tal, foi necessário o recurso a uma balança, com precisão de 0,01 g, e uma craveira para medição dos provetes. Para cada argamassa foram obtidos 3 valores de massa volúmica aparente. Os resultados do ensaio são obtidos através da equação 3.2.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (3.2)$$

onde:

ρ – massa volúmica do provete (kg/m^3);

M – massa do provete (g);

V – volume do provete (m^3).

3.8.2 Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas

O ensaio para a determinação da velocidade das ondas ultra-sónicas foi realizado de acordo com a norma EN 12504-4 (CEN, 2004), referente a betão, mas adaptado para argamassas. O equipamento utilizado foi *PUNDIT LAB* da *PROCEQ*, que se encontra na Figura 3.36, e os transdutores tinham uma frequência na ordem dos 50 kHz. Antes do início das medições, o aparelho teve que ser calibrado, para tal utilizou-se uma barra de calibração própria, com tempo de transição conhecido (25,4 μs) (Figura 3.36). A vaselina foi utilizada como material de contacto em todos os ensaios.

Para a realização do método direto os transdutores são colocados em faces opostas do material a ser ensaiado (Figura 3.37), enquanto para o método indireto os transdutores são colocados na mesma face do material a ser ensaiado (Figura 3.38). Assim, adotou-se o método directo para os provetes prismáticos e o método indireto para as argamassas aplicadas na parede e no tijolo.



Figura 3.36 Equipamento *PUNDIT LAB*

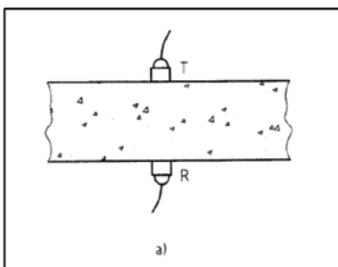


Figura 3.37 Esquema de transmissão directa (EN 12504-4 (CEN, 2004))

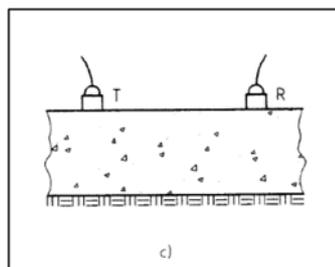


Figura 3.38 Esquema de transmissão indirecta (EN 12504-4 (CEN, 2004))

i) Método directo (provetes normalizados):

Foram ensaiados 3 provetes por argamassa, aos 28 dias de cura, e procedeu-se da seguinte forma (adaptado da EN 12504-4 (CEN, 2004)):

1. Calibrou-se o aparelho (25,4 μ s) (Figura 3.39);
2. Colocou-se o material de contacto (vaselina, Figura 3.40) nos transdutores;
3. Realizou-se três medições por cada provete (Figura 3.41);
4. Registou-se o tempo de propagação das ondas (μ s), para os diferentes provetes.



Figura 3.39 Calibração do equipamento



Figura 3.40 Material de contacto (Vaselina)



Figura 3.41 Medição do provete prismático

Com os valores obtidos, efectuou-se a média dos 3 valores de cada provete, obtendo-se um valor médio de tempo de propagação. Seguidamente, calculou-se a velocidade de propagação das ondas em cada provete, através da equação 3.3, e finalmente, fez-se a média das velocidades das ondas ultra-sónicas para cada argamassa.

$$V = \frac{L}{T} \quad (3.3)$$

Onde:

V – velocidade de propagação das ondas, em cada provete (m/s);

L – distância percorrida pelas ondas (mm);

T – tempo que a onda ultra-sónica demora a percorrer o provete (μ s).

ii) Método indireto (argamassa aplicada em protótipos de parede e tijolo)

De acordo com a norma, no método de transmissão indireta, não se mede o comprimento do caminho, mas faz-se uma série de medições separadamente com os transdutores a distâncias diferentes mas equidistantes, para reduzir as incertezas que existem neste método. Para tal, o transmissor deverá ser colocado em contacto com a superfície num ponto fixo x e o receptor deverá ser colocado a diferentes distâncias com incrementos fixos x_n ao longo de uma linha escolhida na superfície, como mostra a Figura 3.42. A norma também explícita que se deve realizar leituras repetidas, até se obter um valor mínimo de tempo que leva o pulso ultra-sónico do transmissor ao receptor.

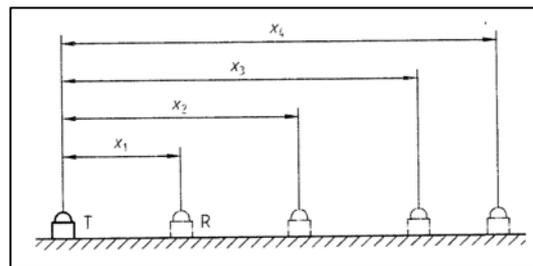


Figura 3.42 Esquema apresentado na norma EN 12504-4 (CEN, 2004) (legenda: T – transdutor transmissor; R – transdutor receptor)

No caso dos protótipos de parede foram realizados dois percursos em cada, um em cima e outro em baixo, como se mostra na Figura 3.43, com uma distância de 60 mm entre pontos, marcados previamente. A localização dos pontos encontra-se no anexo A.3.2.

No caso das argamassas aplicadas em tijolo, foi realizado um percurso, também com a distância de 60 mm entre pontos como no protótipo de parede, com o início a 30 mm para o interior do contorno do tijolo, como mostra a Figura 3.44. Este ensaio foi realizado num tijolo por cada argamassa.



Figura 3.43 Marcação dos percursos num protótipo de parede



Figura 3.44 Marcações do percurso num tijolo

O ensaio para cada percurso, aos 28 dias de cura, procedeu-se da seguinte forma (adaptado da EN 12504-4 (CEN, 2004)):

1. Calibrou-se o aparelho ($25,4 \mu\text{s}$) (Figura 3.39);
2. Colocou-se o material de contacto (vaselina, Figura 3.40) nos transdutores;

3. Em cada percurso realizou-se várias medições (Figuras 3.45 e 3.46, medição na parede e no tijolo respectivamente) no sentido da esquerda para a direita e vice-versa, como representa o esquema da Figura 3.47, e por essa ordem;
4. Registou-se o valor mais baixo em cada local, fazendo-se, pelo menos, três medições.



Figura 3.45 Exemplo de medição do método indirecto na parede



Figura 3.46 Exemplo de medição do método indirecto no tijolo

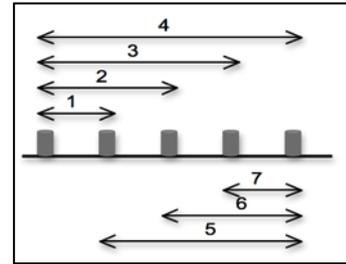


Figura 3.47 Esquema da sequência do ensaio

Após a conclusão do ensaio, procedeu-se à análise dos valores obtidos. Efetuou-se uma média dos 3 valores alcançados por distância, num sentido e noutro, obtendo-se um valor médio de tempo de propagação das ondas em cada distância. Seguidamente, calculou-se a velocidade aparente de propagação das ondas dos respetivos tempos, através da equação 3.4.

$$V_i = \frac{L_i}{T_i} \quad (3.4)$$

onde:

V_i – velocidade aparente de propagação parcial, correspondente à distancia i (m/s);

L_i – distância percorrida pela onda ultra-sónica entre o transmissor e o receptor (mm);

T_i – tempo que a onda ultra-sónica demora a percorrer a distância L_i (μ s).

Com as velocidades de propagação aparentes determinou-se a velocidade média aparente de propagação das ondas ultra-sónicas em cada percurso por intermédio de dois processos, pelo cálculo da média dos valores de velocidade parcial de cada distância e através do ajustamento da reta obtida do gráfico referente às distâncias em função dos tempos medidos em cada percurso (método das dromocrónicas).

3.8.3 Ensaio de arrancamento por tracção (*Pull-off*)

O ensaio de resistência ao arrancamento por tração, conhecido por *pull-off*, realizou-se segundo a norma EN 1015-12 (CEN, 2000) e serve para a determinação de aderência ao suporte (adesiva ou coesiva) e respectivas tensões de rotura. O equipamento utilizado foi *58-C0215/T Pull-off digital tester, load capacity 16KN* da *Controls*, como mostra a Figura 3.48. Executou-se este ensaio nas argamassas aplicadas em suporte, ou seja, nos protótipos de parede e nos tijolos.

No caso dos protótipos de parede, este ensaio foi efectuado após a conclusão dos ensaios de caracterização do comportamento térmico, devido ao seu efeito destrutivo, e passado 2 meses e 25 dias da aplicação da argamassa. Para marcação dos locais de corte, primeiro verificou-se o local onde se encontrava o tijolo inteiro, para não se apanhar uma união de tijolos pois poderia influenciar o ensaio, como mostra a Figura 3.49 e o esquema no Anexo A.3.2. No caso dos tijolos, este ensaio foi realizado 28 dias após a aplicação da argamassa, e a marcação dos cortes foi a apresentada na Figura 3.50.



Figura 3.48 Equipamento de ensaio de Pull-Off



Figura 3.49 Marcações para o ensaio de Pull-Off num protótipo de parede



Figura 3.50 Marcações para o ensaio de Pull-Off num tijolo



Figura 3.51 Realização dos cortes na parede para ensaio Pull-Off



Figura 3.52 Realização dos cortes no tijolo para ensaio Pull-Off



Figura 3.53 Pormenor dos cortes até ao tijolo.

Em ambos os casos foram realizados 3 carotes, de 4x4 cm, na argamassa aplicada. Os cortes na argamassa aplicada em parede foram feitos com uma rebarbadora, que se encontra na Figura 3.51, e na argamassa aplicada em tijolo foram feitos com uma máquina de corte apresentada na Figura 3.52. Estes cortes foram feitos até cortar cerca de 3 mm do tijolo (Figura 3.53), para que a rotura também possa ser pelo suporte.

O procedimento adoptado para a realização do ensaio foi o seguinte (adaptado de EN 1015-12 (CEN, 2000)):

1. Na véspera do ensaio, alisou-se o local escolhido (Figura 3.55), para haver uma melhor aderência às chapas metálicas, com uma pedra de *carborudum* (Figura 3.54), e efectuou-se os cortes sobre os modelos a ensaiar (Figuras 3.51 e 3.52);
2. Colaram-se as pastilhas metálicas sobre as áreas delineadas com cola e deixou-se secar, tendo o cuidado de:
 - No tijolo, garantir que a cola em excesso não caía para a zona de corte envolvente (Figura 3.56);
 - Na parede, para garantir que as pastilhas não saíam do sitio enquanto a cola secava, colocou-se fita cola, segurando, assim, as pastilhas à parede (Figura 3.57);

3. No dia seguinte, aplicou-se uma força ortogonal à pastilha, através do aparelho de arrancamento (Figuras 3.58 e 3.59) e registou-se a carga de cedência e respectiva tipologia de rotura.



Figura 3.54 Pedra de *carborudum*



Figura 3.55 Alisamento do local de colagem das pastilhas metálicas



Figura 3.56 Pastilhas coladas na argamassa aplicada em tijolo



Figura 3.57 Pastilhas coladas na argamassa aplicada em parede



Figura 3.58 Aplicação da força através do aparelho de arrancamento a argamassa aplicada em tijolo



Figura 3.59 Aplicação da força através do aparelho de arrancamento a argamassa aplicada em Parede

De acordo com a referida norma, a rotura pode ocorrer de 3 maneiras diferentes:

- rotura adesiva – fractura padrão “a” (a rotura ocorre na interface entre a argamassa e o suporte);
- rotura coesiva – fractura padrão “b” (a rotura ocorre pela argamassa, no seu interior);
- rotura coesiva – fractura padrão “c” (a rotura ocorre pelo suporte, no seu interior).

Se a rotura for adesiva, a tensão que se obtém pelo ensaio, representa a tensão de aderência. Caso a rotura seja coesiva, o valor da tensão obtido é como um limite inferior do real. O valor de tensão de aderência de cada provete individual é obtido através da equação 3.5.

$$f_u = \frac{F_u}{A} \quad (3.5)$$

onde:

f_u – tensão de aderência (MPa);

F_u – força de arrancamento (kN);

A – área da secção do provete (mm).

3.8.4 Esclerómetro pendular

O ensaio com esclerómetro pendular é um ensaio semi-destrutivo que permite avaliar a dureza superficial e possibilita o mapeamento de zonas com pior desempenho mecânico e, indirectamente, pode ser uma medida qualitativa da resistência à compressão da argamassa. O ensaio consiste na produção de uma reacção elástica pelo impulso de uma massa conhecida, que choca contra o material sobre uma dada superfície de contacto. O equipamento usado foi uma *Schmit Pendulum Hammer type P* da *PROCEQ* com uma energia de impacto de 0,88 J, como mostra a Figura 3.60.

Este ensaio foi realizado nos protótipos de parede e nos tijolos. Como os tijolos tem uma dimensão pequena, foi colocado outro tijolo por cima para aumentar a área, pois o esclerómetro tem que ficar todo apoiado (Figura 3.61).

Os resultados obtidos podem ser influenciados por vários parâmetros, como o teor de humidade da superfície e as irregularidades da superfície. Para controlar o primeiro factor escolheu-se um dia menos húmido para se realizar o ensaio, e para controlo do último factor, efectuou-se um alisamento prévio das superfícies.

No caso dos protótipos de parede, realizou-se este ensaio no dia seguinte ao do ensaio de *pull-off*, pois poderia alterar as características de aderência das argamassas. Foi desenhado na argamassa uma grelha de orientação para a realização dos ensaios de esclerómetro e *Martinet Baronnie*, pois estes dois podiam influenciar os resultados um do outro. Foram realizados cinco ensaios em cada argamassa e o esquema encontra-se no anexo A.3.2.

No caso da argamassa em tijolo, realizou-se este ensaio quando a argamassa tinha a mesma idade da argamassa aplicada na parede, para que os resultados fossem possíveis comparar. Em cada argamassa foram realizados três leituras.



Figura 3.60 Esclerómetro



Figura 3.61 Ensaio de esclerómetro no tijolo



Figura 3.62 Ensaio de esclerómetro na parede

Procedimento utilizado:

1. Antes da realização do ensaio passou-se uma pedra de *carborudum* (Figura 3.54) pela superfície das argamassas, e, de seguida, marcou-se os pontos na superfície da argamassa;
2. Posicionou-se o esclerómetro encostado ao modelo;

3. Libertou-se o pêndulo, através do botão de disparo e a massa de impacto embate sobre a superfície do revestimento (Figuras 3.61 e 3.62);
4. Registou-se o valor resultante do ressalto do pêndulo, indicado pela escala graduada do aparelho.

3.8.5 Ensaio de resistência superficial *Martinet Baronnie*

O ensaio de *Martinet Baronnie* serve para a determinação da resistência ao choque de corpos duros não cortantes em superfícies. Mede-se e regista-se o diâmetro da mocha ($\varnothing_{\text{mossa}}$) produzida pelo impacto dum esfera de aço (Figura 3.63). Assim caracteriza-se a resistência superficial, ou seja, a deformabilidade superficial no ensaio de impacto com energia de 3J. O equipamento utilizado encontra-se na Figura 3.64. Os locais de ensaio encontram-se no Anexo A.3.2.

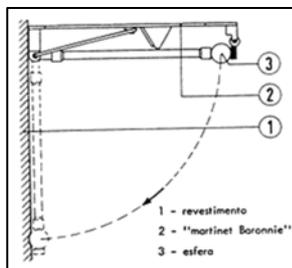


Figura 3.63 Esquema do ensaio de *Martinet Baronnie*



Figura 3.64 Equipamento *Martinet Baronnie*

Procedeu-se do seguinte modo:

1. Fixou-se a parte superior do aparelho;
2. Deixou-se cair a esfera que se situava a 90° da parede;
3. Mediu-se e registou-se o diâmetro da mocha (Figura 3.67).

Para cada argamassa foi feita a média dos resultados obtidos.



Figura 3.65 Ensaio de *Martinet Baronnie* na parede



Figura 3.66 Ensaio de *Martinet Baronnie* no tijolo



Figura 3.67 Medição do diâmetro da mocha produzida pelo equipamento de *Martinet Baronnie*

3.8.6 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico foi obtido com recurso ao equipamento *GrindoSonic MK5 "Industrial"*, como mostra a Figura 3.68, através da frequência de ressonância do modo de vibração à flexão (Figura 3.69) e à torção (Figura 3.70), segundo a norma ASTM E1876-1 (ASTM, 2006). O módulo de elasticidade dinâmico foi obtido através do software *GrindoSonic*, inserindo os resultados obtidos no ensaio.

Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico foram utilizados provetes prismáticos de dimensão normalizada e foram obtidos 3 valores por argamassa, aos 28 dias.

O procedimento adotado para a realização do ensaio foi o seguinte:

1. Calibrou-se o equipamento, para a flexão e torção (Figuras 3.71 e 3.72, respectivamente);
2. Fez-se as medições das ressonâncias correspondentes (Figuras 3.69 e 3.70);
3. Registou-se as medições.



Figura 3.68 Equipamento de leitura de frequências



Figura 3.69 Leitura de frequência de ressonância do modo de vibração à flexão



Figura 3.70 Leitura de frequência de ressonância do modo de vibração à torção

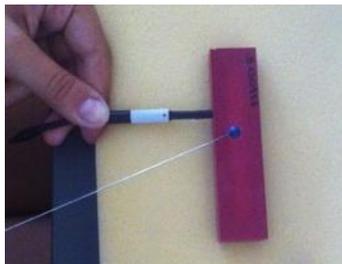


Figura 3.71 Calibração à flexão do equipamento de leitura de frequências



Figura 3.72 Calibração à torção do equipamento de leitura de frequências

3.8.7 Resistência à tração por flexão

O ensaio de resistência à tração por flexão foi realizado segundo a norma EN 1015-11 (CEN, 1999). O equipamento utilizado foi o da marca *Seidner Form+Test* (modelo 505/200/10 DM1) com uma célula de carga de 10 kN. O provete foi colocado como mostra o esquema da Figura 3.73. Foram ensaiados três provetes prismáticos para cada argamassa aos 28 dias.

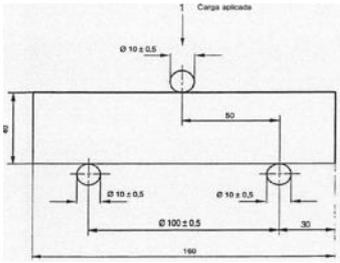


Figura 3.73 Esquema do ensaio à tração por flexão (EN 1015-11 (CEN, 1999))

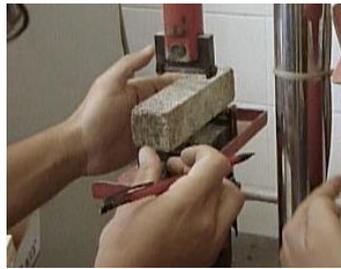


Figura 3.74 Colocação do provete na máquina de flexão



Figura 3.75 Rotura do provete à flexão

O ensaio foi realizado da seguinte forma, segundo a norma EN 1015-11 (CEN, 1999):

1. Limpou-se as superfícies do provete e os rolos de suporte;
2. Colocou-se os provetes com a face que não teve em contacto com o molde de metal para o lado (não pode estar a tocar nos rolos) como mostra a Figura 3.74;
3. Fez-se subir o prato inferior de maneira a que fosse aplicada uma carga gradualmente crescente a meio vão de modo contínuo, até à rotura do provete (Figura 3.75);
4. Registou-se a carga máxima aplicada e guardou-se as metades dos provetes para o ensaio da compressão.

O valor da resistência à tração é obtido através da equação 3.6:

$$f_t = 1,5 \frac{F_t \times l}{b \times d^2} \quad (3.6)$$

onde:

f_t – tensão de rotura à flexão (MPa);

F_t – carga máxima aplicada (kN);

l – distância entre apoios da máquina (100 mm);

b – largura do provete (40 mm);

d – espessura do provete (40 mm).

3.8.8 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado segundo a norma EN 1015-11 (CEN, 1999), que consiste em aplicar uma carga contínua gradualmente crescente, até à rotura do provete ensaiado. Para tal foi utilizado um equipamento da marca Seidner Form+Test (modelo 505/200/10 DM1) com uma célula de carga de 200 kN. Este ensaio foi realizado em argamassas aplicadas na parede e nos provetes normalizados.

No caso dos provetes prismáticos normalizados, utilizou-se as metades dos provetes (Figura 3.76), provenientes do ensaio da resistência à flexão, aos 28 dias, tendo sido feitos três ensaios para cada argamassa, ou seja, só uma metade de cada provete foi utilizado. Colocou-se a metade do provete com a face que não teve em contacto com o molde de metal e a face de rotura da flexão para o lado (não pode estar em contacto com os pratos) como mostra a Figura 3.78.

No caso dos protótipos de parede, foram retiradas amostras (Figura 3.77) com 40 mm de altura e 40 mm de largura, com uma profundidade superior a 60 mm. Colocou-se em contacto com os pratos as duas faces cortadas, pois eram as mais lisas. Estes foram ensaiados após a remoção dos moldes da parede, com uma idade superior a 3 meses.

O ensaio foi realizado segundo a norma EN 1015-11 (CEN, 1999):

1. Limpou-se as superfícies do provete e os pratos de suporte;
2. Colocou-se os provetes no prato da máquina;
3. Fez-se subir o prato inferior de maneira a que fosse aplicada uma carga gradualmente crescente, até à rotura do provete (Figuras 3.78 e 3.79);
4. Registou-se o valor de tensão de rotura à compressão do material em função da área.

O valor da resistência à compressão é obtido através da equação 3.7.

$$f_c = \frac{F_c}{A_c} \quad (3.7)$$

onde:

f_c – tensão de rotura à compressão (MPa);

F_c – carga de compressão máxima aplicada (KN);

A_c – área de secção comprimida (mm²).



Figura 3.76 Provetes a ensaiar à compressão provenientes dos provetes normalizados



Figura 3.77 Provelte a ensaiar à compressão proveniente de amostras da argamassa aplicada em parede



Figura 3.78 Ensaio à compressão de meio provete prismático



Figura 3.79 Ensaio à compressão de amostra de parede

3.9 Síntese do capítulo

Na campanha experimental foram produzidas seis argamassas doseadas em laboratório e três argamassas industriais, perfazendo um total de oito argamassas com desempenho térmico melhorado e uma argamassa de controlo. Para tal foram produzidos, por argamassa, três provetes prismáticos normalizados de 40x40x160 mm, preparados dois tijolos com 4 cm de espessura de argamassa aplicada e um protótipo de parede, também com 4 cm de argamassa aplicada.

Realizou-se uma caracterização preliminar dos materiais constituintes das argamassas, tanto as doseadas em laboratório como as industriais. Também foi explicado o processo de execução dos protótipos de parede e aplicação das argamassas nos três tipos de molde.

Foi realizada a caracterização das argamassas no estado fresco e no estado endurecido. A caracterização no estado fresco foi concretizada imediatamente após a produção das mesmas e consistiu no espalhamento e na massa volúmica. A caracterização das argamassas no estado endurecido foi realizada em diferentes idades, dependendo do ensaio e do molde.

Na Tabela 3.5 estão sintetizados os números de ensaios, realizados para cada tipo de provete, por argamassa. Os valores totais encontram-se no final dessa tabela.

Tabela 3.5 Número de ensaios por argamassa

| Suporte | Número de moldes | Ultra-sons | Flexão | Compressão | Esclerómetro | <i>Martinet Baronnie</i> | Módulo Elasticidade Dinâmico | <i>Pull-off</i> |
|---------------------|--------------------------------|------------|--------|------------|--------------|--------------------------|------------------------------|-----------------|
| Provete Normalizado | 3 | 9 | 3 | 3 | - | - | 3 | - |
| Tijolo | 2 | 7 | - | - | 3 | 3 | - | 3 |
| Parede | 1 | 7 | - | - | 5 | 5 | - | 3 |
| Provete da parede | 3 | - | - | 3 | - | - | - | - |
| | Total de ensaios por argamassa | 13 | 3 | 6 | 8 | 8 | 3 | 6 |
| | Total de ensaios | 117 | 27 | 54 | 72 | 72 | 27 | 54 |

4 Apresentação e discussão dos resultados

4.1 Considerações gerais

Neste capítulo é descrita a fase de aplicação, as condições e os principais problemas apresentados. São também analisados os resultados obtidos nos ensaios realizados durante toda a campanha experimental para se avaliar as características que influenciam o comportamento mecânico das argamassas térmicas, tendo em conta a sua aplicação. No final, efectua-se uma correlação dos resultados, de todos os modelos ensaiados, de algumas das técnicas de ensaio utilizadas, de modo a uma melhor interpretação dos resultados.

4.2 Aplicação das argamassa nos protótipos de parede

Em relação à argamassa de areia (A^{con}) verificaram-se algumas dificuldades na aplicação, devido à sua granulometria predominantemente grossa (agregados entre 0.5 a 2 mm), que possivelmente poderia ser ultrapassada com a adopção de mais ligante ou de outra curva granulométrica com maior percentagem de agregados mais finos. Como tal, foi necessário aplicar a argamassa em camadas mais finas, uma camada no primeiro dia, duas no segundo e mais uma no terceiro dia. Verificou-se dificuldade no alisamento final. O resultado final encontra-se na Figura 4.1.



Figura 4.1 Resultado final da aplicação da argamassa A^{con}



Figura 4.2 Resultado final da aplicação da argamassa B^{GC}



Figura 4.3 Resultado final da aplicação da argamassa C^{AE}

A argamassa B^{GC} (com granulado de cortiça expandida), na primeira aplicação, pôde-se verificar que era muito elástica e pouco estável, resultando no destacamento durante a aplicação. A sua falta de coesão fez com que a aplicação fosse mais faseada em várias camadas muito mais finas. Para aumentar a trabalhabilidade houve um aumento do tempo de mistura (+ 1 min), pois este aumento fez com que os tensoactivos tivessem mais tempo para actuar. Assim, foram efectuadas quatro camadas, em que na última não houve grande dificuldade de alisamento. O resultado final encontra-se na Figura 4.2.

A argamassa C^{AE} (com argila expandida) teve uma boa trabalhabilidade e aplicação, no entanto poderia ter mais agregados finos. Esta argamassa foi possível aplicar em duas camadas de 2 cm como planeado. O resultado final encontra-se na Figura 4.3.

A argamassa $D^{Aero/AE}$ revelou ter tido as melhores propriedades em termos de aplicação em relação às outras argamassas, com muito boa trabalhabilidade, tendo sido aplicada em dois dias e em duas camadas. O resultado final encontra-se na Figura 4.4.



Figura 4.4 Resultado final da aplicação da argamassa $D^{Aero/AE}$



Figura 4.5 Resultado final da aplicação da argamassa $E^{GC/AE}$



Figura 4.6 Resultado final da aplicação da argamassa $F^{AE/GC}$

Houve algumas dificuldades de aplicação da argamassa $E^{GC/AE}$ (com granulado de cortiça expandida e argila expandida), pois havia destaque em algumas zonas, devida à falta de aderência, e problemas de trabalhabilidade. Esta foi aplicada em três camadas, em vez das duas camadas inicialmente programadas, estando o resultado final ilustrado na Figura 4.5.

Em termos da argamassa $F^{AE/GC}$, a trabalhabilidade foi boa, tendo sido aplicada em três camadas em dias diferentes, como a argamassa $E^{GC/AE}$. O resultado final encontra-se representado na Figura 4.6.

As três argamassas industriais G^{EPS} , $H^{GC/T}$ e I^{GC} apresentaram muito boa trabalhabilidade em termos de facilidade de mistura e de aplicação no paramento. Este comportamento seria de esperar, já que estas argamassas são actualmente comercializadas e por isso com aplicação industrial. Nestas argamassas, as adições e adjuvantes conferem estas características. O resultado final das argamassas G^{EPS} , $H^{GC/T}$ e I^{GC} encontram-se nas Figuras 4.7 a 4.9, respectivamente.



Figura 4.7 Resultado final da aplicação da argamassa G^{EPS}



Figura 4.8 Resultado final da aplicação da argamassa $H^{GC/T}$



Figura 4.9 Resultado final da aplicação da argamassa I^{GC}

4.3 Caracterização das argamassas no estado fresco

4.3.1 Massa volúmica aparente

O ensaio da massa volúmica aparente, no estado fresco, foi efetuado para todas as argamassas produzidas. Os resultados médios obtidos para a massa volúmica aparente para cada argamassa, independentemente de onde foi aplicada, assim como o número de ensaios efectuados, encontram-se representados na Tabela 4.1. Os resultados individuais deste ensaio para cada produção por modelo, encontram-se no anexo A.4.1.

Tabela 4.1 Massa volúmica aparente das argamassas produzidas, no estado fresco

| Argamassa | % substituição / ag. Isolante | Nº ensaios | Massa Volúmica (kg/m ³) | Desvio Padrão (kg/m ³) | CV (%) | |
|-------------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------|----|
| Doseadas em laboratório | A ^{con} | Sem adição | 6 | 1886 | 60 | 3 |
| | B ^{GC} | 100%GC | 6 | 560 | 64 | 11 |
| | C ^{AE} | 100%AE | 4 | 788 | 24 | 3 |
| | D ^{Aero/AE} | 60%Aerogel e 40%AE | 4 | 819 | 49 | 6 |
| | E ^{GC/AE} | 60%GC e 40%GC | 5 | 652 | 39 | 6 |
| | F ^{AE/GC} | 40%GC e 60%GC | 5 | 705 | 46 | 7 |
| Industriais | G ^{EPS} | 70 a 80% EPS | 4 | 477 | 81 | 17 |
| | H ^{GC/T} | Cortiça (si) | 5 | 676 | 72 | 11 |
| | I ^{GC} | 70 a 80% Cortiça | 5 | 778 | 42 | 5 |

Legenda: si – sem informação; CV – Coeficiente de Variação

É possível verificar que os valores da massa volúmica, no estado fresco, das argamassas com incorporação de agregados isolantes, com percentagens de substituição de 70 a 100 % variam entre os 477 - 819 kg/m³.

Vale (2014) produziu uma argamassa cimentícia com 80% de substituição do agregado por cortiça, sem adições/adjuvantes. Para esta argamassa obteve um valor de massa volúmica aparente de 1056 kg/m³. Barroca (2013) produziu argamassas com agregados de cortiça, bastardas (cal hidráulica e cimento) e superplastificantes, com diferentes percentagens dos constituintes. Para percentagens de substituição de 75%, em volume, de areia por cortiça, obteve valores de massa volúmica aparente, aproximadamente, de 900-950 kg/m³. Para a argamassa cimentícia B^{GC}, produzida por substituição total de agregados por cortiça, foi obtido um valor de massa volúmica aparente de 560 kg/m³, e a argamassa E^{GC/AE}, com substituição total dos agregados por 60% cortiça e 40% argila expandida, foi obtido um valor de 652 kg/m³. Os valores obtidos neste ensaio experimental são mais baixos que os de Vale (2104), devido a estas argamassas conterem adjuvantes que diminuem a quantidade de água, e também porque estas não contêm agregado de areia, sendo integralmente compostas por agregados leves. Já em comparação com Barroca (2013) os valores obtidos são mais baixos, mas mais próximos, devido a ambos terem adjuvantes. De notar que os valores obtidos para as argamassas industriais e doseadas em laboratório com cortiça (B^{GC}, E^{GC/AE}, F^{AE/GC}, H^{GC/T} e I^{GC}), são da mesma ordem de grandeza, tanto para percentagens elevadas de incorporação de cortiça (60-100%), como para

percentagens menores (40%) de incorporação de cortiça, mas sendo uma argamassa só com agregados leves.

Para a argamassa C^{AE} (com argila expandida) foi obtido um valor de massa volúmica aparente de 788 kg/m^3 , e para a argamassa $F^{AE/GC}$ (granulado de cortiça expandida e argila expandida) foi obtido um valor de 705 kg/m^3 . Estes valores são bastante mais baixos (cerca de 50% menores) que os obtidos por Barroca (2013). Este obteve, aproximadamente, uma massa volúmica aparente de $1500\text{-}1550 \text{ kg/m}^3$, para argamassas com substituição de 75%, em volume, de areia por argila expandida. Este facto deve-se a substituição do agregado nas argamassas C^{AE} e $F^{AE/GC}$ ser total, por agregados leves.

A argamassa térmica que apresentou um valor maior de massa volúmica aparente em fresco foi a $D^{Aero/AE}$ (60% aerogel e 40% argila expandida) de 819 kg/m^3 . Este facto deve-se, não só por conter argila expandida, mas também porque foi a argamassa que tem mais água (relação a/c de 1,25), pois o agregado de aerogel precisa de mais água para se ligar com os tensioactivos.

Em relação às argamassas industriais, os valores obtidos estão, sensivelmente, próximos dos preconizados pelos fabricantes. Segundo o fabricante da argamassa de EPS (G^{EPS}), é de esperar um valor compreendido entre os $350\text{-}450 \text{ kg/m}^3$. O valor obtido (477 kg/m^3) encontra-se 6% acima do limite superior, mas é uma percentagem baixa. Segundo o fabricante da argamassa I^{GC} é de esperar um valor compreendido entre os $850\text{-}950 \text{ kg/m}^3$. O valor obtido (778 kg/m^3) encontra-se 8% abaixo do limite inferior. Em relação à argamassa $H^{GC/T}$, o fabricante não especifica valores para a massa volúmica no estado fresco.

Por último, a argamassa de controlo A^{con} obteve um valor de 1886 kg/m^3 . Arromba (2011) e Gonçalves (2010), que utilizaram os mesmos materiais, mas com uma granulometria mais extensa e sem adjuvantes, obtiveram para a massa volúmica valores de 2056 kg/m^3 e 2023 kg/m^3 , respectivamente. Já Barroca (2013) obteve, para a argamassa bastarda de referência, uma massa volúmica de cerca de 2000 kg/m^3 , aproximando-se mais do valor obtido de A^{con} .

Pelos resultados obtidos pode concluir-se que a introdução de agregados isolantes faz baixar a massa volúmica no estado fresco entre 58% a 75%, comparativamente com a argamassa de controlo. Também é possível verificar que as argamassas que contêm argila expandida, tem uma massa volúmica aparente em pasta maior que as restantes argamassas térmicas, com excepção da industrial I^{GC} . Comparando a B^{GC} (100% cortiça) com a $E^{GC/AE}$ (60% cortiça e 40% argila expandida) pode-se verificar a influência da argila no aumento da massa volúmica, de 14%. Finalmente, verificou-se que as argamassas G^{EPS} , $H^{GC/T}$ e B^{GC} foram as que obtiveram um coeficiente de variação superior a 10%, sendo que duas delas são argamassas industriais.

4.3.2 Consistência por espalhamento

Os valores médios do espalhamento das argamassas doseadas em laboratório e industriais encontram-se sintetizados na Tabela 4.2. Foi realizado um ensaio por cada produção, fez-se pelo menos um ensaio

na argamassa produzida para o tijolo, um ensaio para os provetes e um ensaio para cada camada de reboco da parede. Os resultados individuais deste ensaio podem ser consultados no Anexo A.4.2.

Tabela 4.2 Consistência por espalhamento da argamassa produzidas com valores para o espalhamento consoante a massa volúmica no estado fresco pela EN 1015-2 (CEN, 1998)

| Argamassa | | % substituição / ag. Isolante | Nº ensaios | Espalhamento médio (mm) | Desvio Padrão (kg/m ³) | CV (%) | Mv EN 1015-2 (kg/m ³) | Espalhamento EN 1015-2 (mm) |
|-------------------------|----------------------|-------------------------------|------------|-------------------------|------------------------------------|--------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Doseadas em laboratório | A ^{con} | Sem adição | 6 | 147,9 | 20,3 | 14 | > 1200 | 175 ± 10 |
| | B ^{GC} | 100%GC | 6 | 139,0 | 9,8 | 7 | 300 - 600 | 140 ± 10 |
| | C ^{AE} | 100%AE | 4 | 144,1 | 16,2 | 11 | 600 - 1200 | 160 ± 10 |
| | D ^{Aero/AE} | 60%Aerogel e 40%AE | 4 | 189,1 | 20,8 | 11 | 600 - 1200 | 160 ± 10 |
| | E ^{GC/AE} | 60%GC e 40%GC | 5 | 139,6 | 15,9 | 11 | 600 - 1200 | 160 ± 10 |
| | F ^{AE/GC} | 40%GC e 60%GC | 5 | 138,2 | 11,2 | 8 | 600 - 1200 | 160 ± 10 |
| Industriais | G ^{EPS} | 70 a 80% EPS | 4 | 135,6 | 7,9 | 6 | 300 - 600 | 140 ± 10 |
| | H ^{GC/T} | Cortiça (si) | 5 | 123,6 | 5,1 | 4 | 600 - 1200 | 160 ± 10 |
| | I ^{GC} | 70 a 80% Cortiça | 5 | 142,3 | 10,6 | 7 | 600 - 1200 | 160 ± 10 |

Legenda: si – sem informação; CV – Coeficiente de Variação

Ao analisar a Tabela 4.2 pode-se verificar que só as argamassas com cortiça (B^{GC}) e EPS (G^{EPS}) tem os valores médios de espalhamento dentro dos intervalos previstos, de acordo com as suas massas volúmicas no estado fresco (EN 1015-2, CEN, 1998). Isto pode dever-se ao facto de estas argamassas conterem adjuvantes e também às quantidades de argamassa que foram produzidas. Houve produções de um litro (como é habitual), de três litros e de quatro litros de uma só vez, o que pode levar a mais desperdícios, perdas de água e variações no espalhamento. Também se pode verificar que existe um coeficiente de variação elevado, até 14%, o que mostra que algumas das argamassa produzidas estiveram dentro dos intervalos previstos pela norma referida.

Tendo as argamassas doseadas em laboratório tensioativos, que melhoram a plasticidade da argamassa, logo era de esperar que os espalhamentos fossem maiores. Reparou-se que quanto mais tempo fosse a mistura da argamassa, mais trabalhabilidade esta ganhava. Este facto pode explicar o motivo pelo qual existe um coeficiente de variação elevado.

Foi também perceptível, nesse estudo, que nas argamassas com argila expandida e EPS, foi necessário uma menor quantidade de água para a obtenção da mesma consistência e plasticidade, o inverso aconteceu para o caso da cortiça. Tal como ocorreu no estudo de Barroca (2013), que obteve inicialmente um espalhamento de 150 mm para a argamassa com 75% de substituição do agregado por cortiça, e não foi possível efectuar o ensaio para a argamassa com 75% de substituição do agregado por argila expandida, com a mesma quantidade de água, pois o valor do espalhamento foi superior ao diâmetro da mesa de espalhamento (a dosagem de água era excessiva).

Como as argamassas térmicas doseadas em laboratório tem praticamente o mesmo a/c (0,76 – 0,78) é possível verificar que o espalhamento das argamassas com maior percentagem de argila expandida é superior aos das argamassas contendo maior percentagem de cortiça. Pode-se comparar as argamassa com agregados 100% cortiça ou argila expandida, tendo o primeiro um espalhamento de 139 mm e o segundo de 144,1 mm, mais 4%.

4.4 Caracterização das argamassas no estado endurecido

4.4.1 Massa volúmica aparente

Na Tabela 4.3 encontram-se os valores médios da massa volúmica aparente, no estado endurecido, aos 28 dias de idade. No Anexo A.4.3, encontram-se os resultados individuais relativos a este ensaio.

Tabela 4.3 Massa volúmica aparente no estado endurecido

| Argamassa | % substituição / Ag. Isolante | Nº ensaios | Massa volúmica (kg/m ³) | Desvio padrão (kg/m ³) | CV (%) |
|-------------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------|
| Doseadas em laboratório | A ^{con} | Sem adição | 1690,3 | 23,00 | 1 |
| | B ^{GC} | 100%GC | 443,1 | 12,78 | 3 |
| | C ^{AE} | 100%AE | 721,8 | 20,35 | 3 |
| | D ^{Aero/AE} | 60%Aerogel e 40%AE | 651,6 | 13,95 | 2 |
| | E ^{GC/AE} | 60%GC e 40%GC | 622,8 | 14,98 | 2 |
| | F ^{AE/GC} | 40%GC e 60%GC | 693,1 | 24,51 | 4 |
| Industriais | G ^{EPS} | 70 a 80% EPS | 387,4 | 2,61 | 1 |
| | H ^{GC/T} | Cortiça (si) | 563,9 | 7,54 | 1 |
| | I ^{GC} | 70 a 80% Cortiça | 668,9 | 5,01 | 1 |

Legenda: si – sem informação; CV – Coeficiente de Variação

As massas volúmicas das argamassas com incorporação de agregados isolantes variam dos 387 aos 722 kg/m³. As argamassas industriais variam desde os 387 aos 668 kg/m³ e as argamassas doseadas em laboratório térmicas variam desde os 443 aos 722 kg/m³ (Figura 4.10).

As argamassa B^{GC}, G^{EPS} e H^{GC/T} obtiveram valores, respectivamente, de 443,1 kg/m³, 387,4 kg/m³ e 563,9 kg/m³, sendo valores inferiores a 600 kg/m³ (Capítulo 2.5, valores de referência para argamassas térmicas). As restantes argamassas apresentaram valores entre 4 a 20% superiores ao valor limite de 600 kg/m³, sendo a argamassa C^{AE} (100% argila expandida) a que obteve mais 20% (721,8 kg/m³) de massa volúmica. A argamassa E^{GC/AE} só ultrapassou cerca de 4% do valor limite, o que não é significativo. Pode-se assim concluir que as argamassas que contém argila expandida têm uma massa volúmica superior a 600 kg/m³, que se deve ao facto da baridade da argila expandida (de 431 kg/m³) ser cerca de 8 vezes superior aos outros agregados com propriedades térmicas (Tabela 3.3). Segundo a norma EN 998-1 (CEN, 2003), pôde-se verificar que as argamassas térmicas analisadas são classificadas como leves, pois têm uma massa volúmica inferior a 1300 kg/m³ (Capítulo 2.5).

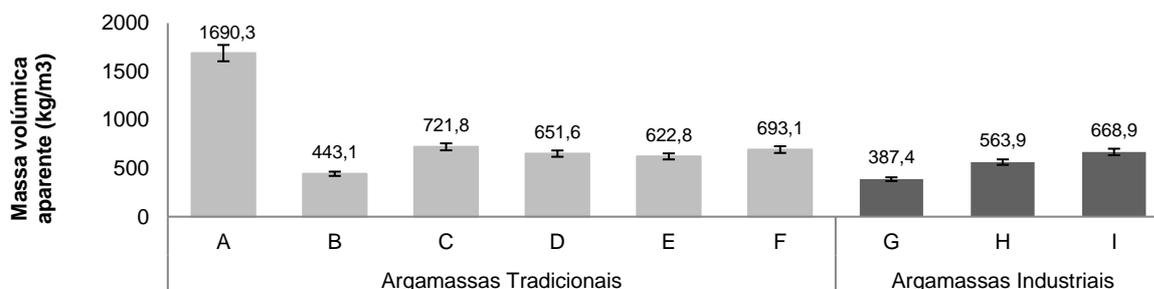


Figura 4.10 Massa volúmica aparente das argamassas produzidas aos 28 dias, no estado endurecido

A argamassa de controlo A^{con} obteve massa volúmica cerca de 1690 kg/m^3 , tendo as outras argamassas uma massa volúmica de cerca de 57% a 77% menor do que a de controlo. Barroca (2013) apresenta valores de massa volúmica para a argamassa bastarda (cimento e cal aérea), com 75% de substituição do agregado por cortiça, de $753,7 \text{ kg/m}^3$ e para a argamassa com 75% de substituição do agregado por argila expandida de $1304,2 \text{ kg/m}^3$. Para as argamassas B^{CG} e C^{AE} , obteve-se os valores $443,1 \text{ kg/m}^3$ e $721,8 \text{ kg/m}^3$, respectivamente. Comparando com Barroca (2013), verifica-se que ao fazer a substituição total do agregado em vez dos 75%, os valores de massa volúmica são cerca de 45% menores, pois as argamassas produzidas por Barroca (2013) contêm areia.

Gao *et al.* (2014) produziu uma argamassa com 60% de substituição do agregado por aerogel, que teve uma massa volúmica de 1000 kg/m^3 . A argamassa $D^{Aero/AE}$ com 60% de Aerogel e 40% argila expandida como agregado, obteve uma massa volúmica de $651,5 \text{ kg/m}^3$, que foi cerca de 35% inferior à massa volúmica obtida para a argamassa produzida por Gao *et al.* (2014). Esta diferença é fundamentalmente devido à argamassa de Gao *et al.* (2014) conter areia que tem uma baridade superior à da argila expandida.

Silva (2014) produziu uma argamassa bastarda (cal hidráulica e cimento) com 100% de substituição do agregado por cortiça (regranulado negro de cortiça). Para esta argamassa obteve uma massa volúmica de 600 kg/m^3 . Comparando com a B^{CG} ($443,1 \text{ kg/m}^3$), esta teve um valor 26% inferior.

As argamassas $D^{Aero/AE}$, $E^{GC/AE}$ e $F^{AE/GC}$ tiveram valores semelhantes ($651,6 \text{ kg/m}^3$, $622,8 \text{ kg/m}^3$ e $693,1 \text{ kg/m}^3$, respectivamente) sendo a que contem mais percentagem de argila expandida ($F^{AE/GC}$) a que obteve maior massa volúmica.

Em relação às argamassas industriais, e de acordo com o que os respectivos fabricantes especificam para a massa volúmica aparente, o valor obtido para a argamassa I^{GC} ($668,9 \text{ kg/m}^3$) encontram-se abaixo (21%) do valor previsto ($900 \pm 50 \text{ kg/m}^3$). O valor obtido para a argamassa G^{EPS} ($387,4 \text{ kg/m}^3$) e $H^{GC/T}$ ($563,9 \text{ kg/m}^3$) foram superiores (29%) e (48%), tendo em conta aquilo que os fabricantes preconizam ($250 \pm 50 \text{ kg/m}^3$) e ($360 \pm 20 \text{ kg/m}^3$), respectivamente. Destaca-se a argamassa $H^{GC/T}$ que teve uma massa volúmica de cerca de 50% acima da prevista pelo fabricante, com um coeficiente de variação de 1%, pouco significativo.

Pode-se concluir, tal como na massa volúmica aparente em pasta, que as argamassas que contêm argila expandida, tem uma massa volúmica aparente maior do que as restantes argamassas térmicas, com excepção da industrial I^{GC} . Isto deve-se ao facto de esta argamassa (I^{GC}) ser de acabamento. A argamassa com 100% do agregado em cortiça (B^{GC}) e a industrial G^{EPS} são as que tem uma massa volúmica menor.

4.4.2 Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas

i) Método directo (provetes normalizados):

A Tabela 4.4 sintetiza a média dos valores de velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, desvio padrão e coeficiente de variação para as várias argamassas produzidas, em provetes normalizados, aos 28 dias de idade. Encontra-se no Anexo A.4.4, os resultados individuais deste ensaio.

Tabela 4.4 valores da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas (método directo)

| Argamassa | % substituição / Ag. Isolante | Nº medições | Velocidade média (m/s) | Desvio padrão (m/s) | CV (%) |
|-------------------------|-------------------------------|--------------------|------------------------|---------------------|--------|
| Doseadas em laboratório | A ^{con} | Sem adição | 2941 | 48 | 2 |
| | B ^{GC} | 100%GC | 1185 | 14 | 1 |
| | C ^{AE} | 100%AE | 2266 | 33 | 1 |
| | D ^{Aero/AE} | 60%Aerogel e 40%AE | 1586 | 35 | 2 |
| | E ^{GC/AE} | 60%GC e 40%GC | 1760 | 20 | 1 |
| | F ^{AE/GC} | 40%GC e 60%GC | 2032 | 32 | 2 |
| Industriais | G ^{EPS} | 70 a 80% EPS | 1404 | 44 | 3 |
| | H ^{GC/T} | Cortiça (si) | 1266 | 36 | 3 |
| | I ^{GC} | 70 a 80% Cortiça | 1330 | 12 | 1 |

Legenda: si – sem informação; CV – Coeficiente de Variação

É possível observar que para as argamassas com agregados isolantes, os valores de velocidade variam desde os 1185 m/s a 2266 m/s. As argamassas industriais variam desde 1266 a 1404 m/s e para as argamassas doseadas em laboratório variam desde 1674 a 2176 m/s (Figura 4.11). As argamassas doseadas em laboratório, com excepção da B^{GC}, apresentam valores de velocidade superiores às industriais, como seria expectável pois são mais compactas (maior massa volúmica e, por consequência, maior compactidade).

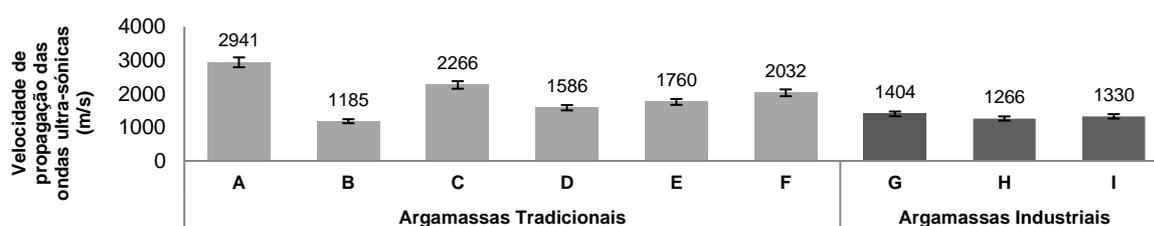


Figura 4.11 Valores da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas (método directo)

Pode-se observar que os coeficientes de variação são bastante baixos, isto deve-se a argamassa de cada provete ensaiados ter sido da mesma produção, não se ter feito várias produções para os três provetes.

ii) Método indirecto (protótipos de parede e tijolos):

A velocidade aparente de propagação das ondas determinou-se através de dois processos. Pelo cálculo da média dos valores de velocidade parcial de cada distância e através do ajustamento da recta

obtido do gráfico referente às distâncias em função dos tempos medidos em cada percurso (método das dromocrónicas). Os valores médios da velocidade aparente obtidos, pelos dois processos, para as argamassas aplicadas em tijolo estão representados na Tabela 4.5, os valores obtidos nas argamassas aplicadas nos protótipos de parede encontram-se na Tabela 4.6. Os valores individuais encontram-se no Anexo A.4.5 e os gráficos representativos deste ensaio nos tijolos e na parede, pelo método das dromocrónicas, encontram-se, respectivamente, nos Anexos A.4.6 e A.4.7.

Tabela 4.5 Valores de velocidade aparente das ondas ultra-sónicas (método indirecto), através do cálculo das médias e do método das dromocrónicas na argamassa aplicada em tijolo

| | | % substituição / Ag. Isolante | Cálculo das médias | | | Método das Dromocrónicas | Diferença (m/s) |
|-------------------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------|----------|--------|--------------------------|-----------------|
| | | | V _{Média} (m/s) | DP (m/s) | CV (%) | Declive (m/s) | |
| Doseadas em laboratório | A ^{con} | Sem adição | 3688,6 | 294,9 | 8,0 | 3326,6 | 362,0 |
| | B ^{GC} | 100%GC | 2143,5 | 1211,0 | 56,5 | 1278,8 | 864,7 |
| | C ^{AE} | 100%AE | 2823,8 | 629,6 | 22,3 | 2119,0 | 704,8 |
| | D ^{Aero/AE} | 60%Aerogel e 40%AE | 2239,8 | 1457,1 | 65,1 | 1131,7 | 1108,1 |
| | E ^{GC/AE} | 60%GC e 40%GC | 2620,5 | 1514,3 | 57,8 | 1321,5 | 1299,0 |
| | F ^{AE/GC} | 40%GC e 60%GC | 2762,5 | 1141,7 | 41,3 | 1659,8 | 1102,7 |
| Industriais | G ^{EPS} | 70 a 80% EPS | 1711,8 | 697,1 | 40,7 | 1278,7 | 433,1 |
| | H ^{GC/T} | Cortiça (si) | 1926,5 | 619,7 | 32,2 | 1394,3 | 532,2 |
| | I ^{GC} | 70 a 80% Cortiça | 1994,9 | 258,5 | 13,0 | 1672,6 | 322,3 |

Legenda: si – sem informação; V_{Média} – velocidade média de propagação das ondas ultra-sónicas; DP – Desvio Padrão; CV – Coeficiente de Variação

Observando a Tabela 4.5, verifica-se que as velocidades das argamassas térmicas variam entre os 1711 e os 2824 m/s e entre os 1131 e os 2119 m/s, pelo método das médias e pelo método das dromocrónicas, respectivamente. É possível apurar que as velocidades médias obtidas pelo método das médias são mais elevadas que as obtidas pelo método das dromocrónicas, como é possível observar na Figura 4.12. As argamassas industriais variam desde 1711 a 1995 m/s pelo método das médias e 1278,7 a 1672,6 m/s, pelo método das dromocrónicas. Para as argamassas doseadas em laboratório variam desde 2143 a 2824 m/s pelo método das médias e 1278,8 a 1672,6 m/s, pelo método das dromocrónicas.

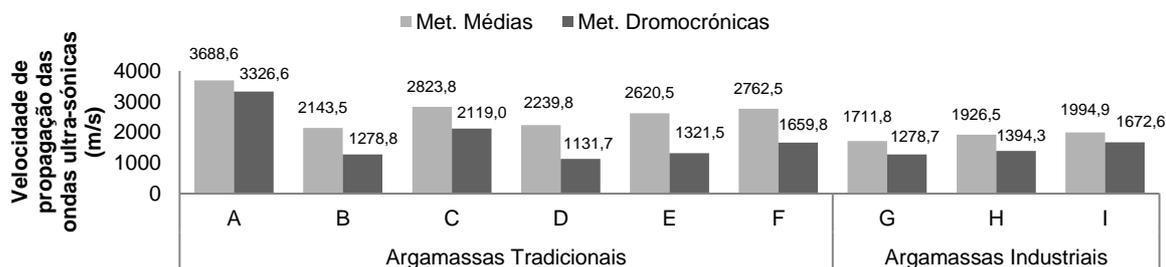


Figura 4.12 Valores da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas (método indirecto) em argamassas aplicadas em tijolo

Após a análise dos valores que se encontram na Tabela 4.5, verificou-se que as médias obtidas pelo método do cálculo das médias estavam muito elevadas, tal como os desvios padrão e os coeficientes de variação. Concluiu-se que este facto deve-se a algumas medições efectuadas à distância de 60 mm

são muito elevadas, resultando num coeficiente de variação muito elevado. Este facto é possível ser verificado no Anexos A.4.6.

De seguida apresentam-se as médias das velocidades obtidas nos ensaios nos protótipos de parede (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 Valores de velocidade aparente das ondas ultra-sónicas (método indirecto), através do cálculo das médias e do método das dromocrónicas na argamassa aplicada em protótipos de parede

| Argamassa | | % substituição / Ag. Isolante | Cálculo das médias | | | | Método das Dromocrónicas | | Diferença (m/s) | |
|-------------------------|----------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------------|----------|--------|--------------------------|---------------|-----------------|-------|
| | | | Posição | V _{Média} (m/s) | DP (m/s) | CV (%) | V _{Média} (m/s) | Declive (m/s) | | |
| Doseadas em laboratório | A ^{con} | Sem adição | Cima | 2710,4 | 700,5 | 25,8 | 2618,9 | 1988,2 | 2166,0 | 452,9 |
| | | | Baixo | 2527,4 | 183,8 | 7,3 | | 2343,8 | | |
| | B ^{GC} | 100%GC | Cima | 1489,6 | 375,4 | 25,2 | 1415,3 | 1145,8 | 1075,5 | 339,8 |
| | | | Baixo | 1341,1 | 458,8 | 34,2 | | 1005,2 | | |
| | C ^{AE} | 100%AE | Cima | 2506,3 | 364,1 | 14,5 | 2470,1 | 1999,4 | 1926,2 | 543,9 |
| | | | Baixo | 2433,8 | 645,8 | 26,5 | | 1853,0 | | |
| | D ^{Aero/AE} | 60%Aerogel e 40%AE | Cima | 1838,3 | 455,5 | 24,8 | 2065,2 | 1359,6 | 1304,4 | 760,8 |
| | | | Baixo | 2292,0 | 1040,6 | 45,4 | | 1249,1 | | |
| | E ^{GC/AE} | 60%GC e 40%GC | Cima | 1960,7 | 640,0 | 32,6 | 1799,4 | 1209,5 | 1089,6 | 709,9 |
| | | | Baixo | 1638,2 | 658,2 | 40,2 | | 969,6 | | |
| | F ^{AE/GC} | 40%GC e 60%GC | Cima | 2276,6 | 594,5 | 26,1 | 1986,6 | 1465,6 | 1475,8 | 510,8 |
| | | | Baixo | 1696,6 | 313,2 | 18,5 | | 1486,0 | | |
| Industriais | G ^{EPS} | 70 a 80% EPS | Cima | 1592,9 | 507,7 | 31,9 | 1566,3 | 1180,0 | 1239,5 | 326,8 |
| | | | Baixo | 1539,6 | 354,0 | 23,0 | | 1299,0 | | |
| | H ^{GC/T} | Cortiça (si) | Cima | 1399,3 | 383,3 | 27,4 | 1406,9 | 1081,6 | 981,5 | 425,4 |
| | | | Baixo | 1414,6 | 396,6 | 28,0 | | 881,4 | | |
| | I ^{GC} | 70 a 80% Cortiça | Cima | 2207,0 | 581,9 | 26,4 | 2138,7 | 1599,9 | 1560,1 | 578,6 |
| | | | Baixo | 2070,4 | 679,1 | 32,8 | | 1520,2 | | |

Legenda: si – sem informação; V_{Média} – velocidade média de propagação das ondas ultra-sónicas; DP – Desvio Padrão; CV – Coeficiente de Variação

Analisando a tabela, as velocidades das argamassas térmicas variam entre os 1406 e os 2470 m/s e entre os 981 e os 1926 m/s, pelo método das médias e pelo método das dromocrónicas, respectivamente. É possível verificar, tal como nas argamassas aplicadas nos tijolos, que as velocidades médias obtidas pelo método do cálculo das médias, são mais elevadas que as obtidas pelo método das dromocrónicas, como se vê na Figura 4.13. Assim, nas argamassas industriais o método que se aproximou mais das velocidades obtidas pelo método directo destas argamassas foi o método das dromocrónicas com velocidades entre os 981 e 1560 m/s. Já nas argamassas doseadas em laboratório, o método que se aproximou mais das velocidades obtidas pelo método directo foi o método das médias com valores a variar entre variam desde 1415 a 2470 m/s. Verifica-se que as argamassas com cortiça obtiveram velocidades mais baixas que as argamassas com argila expandida, assim, a argamassa com 100% do agregado de argila expandida teve uma velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas cerca de 40% superior a argamassa com 100% do agregado de cortiça expandida.

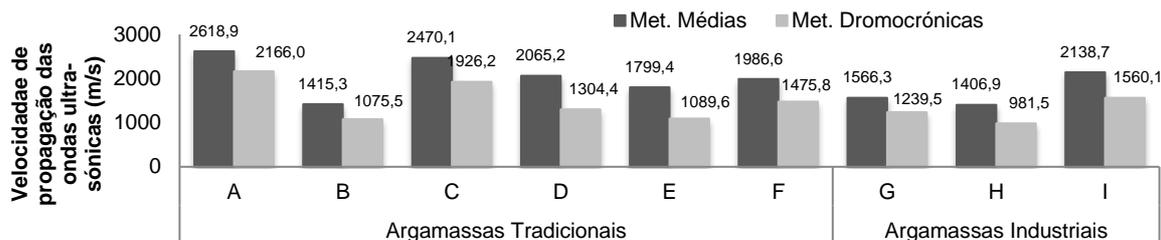


Figura 4.13 Valores da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas (método indirecto) em argamassas aplicadas em protótipos de parede

Também para as argamassas aplicadas nos protótipos de parede, verificou-se que as velocidades obtidas na distância de 60 mm eram muito elevadas, não fazendo sentido comparado com as velocidades obtidas a partir do método das dromocrónicas e com velocidades obtidas em outros trabalhos mencionados mais à frente. Isto deverá ser devido à aplicação, visto acontecer as argamassas que estão aplicadas em tijolo e nos protótipos de parede.

As seguintes comparações feitas com outros estudos serão feitas com os valores obtidos pelo método das médias.

Em Magalhães *et al.* (2003) foram ensaiados muretes com argamassa bastarda e areia, com cerca de 5,5 anos aplicada. Foi obtido um valor de velocidade de ultra-sons de 3100 a 3280 m/s. A argamassa A^{con} obteve, para a argamassa aplicada em protótipo de parede, um valor de 2618,9 m/s. Este é um pouco mais baixo que o obtido por Magalhães *et al.* (2003), o que era espectável visto a argamassa de controlo contém adjuvantes.

Leal (2012) ensaiou uma argamassa cimentícia com substituição de 70% do agregado de areia por granulado de cortiça expandida e com superplastificante, aplicada em murete. Esta argamassa obteve uma velocidade de propagação entre 989 e 1150 m/s. A velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas na argamassa B^{GC} foi de 1415,3 m/s, cerca de 20% superior à velocidade obtida por Leal (2012). Este facto deve-se a argamassa B^{GC} ter uma substituição total do agregado por cortiça, enquanto a argamassa produzida por Leal (2012) só 70% do agregado foi substituído por cortiça.

Comparando os resultados obtidos nas argamassas aplicadas em tijolo e aplicadas em protótipos de parede (Figura 4.14), pode-se observar que a aplicação na vertical diminui a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, entre 8 a 40%, nas argamassas térmicas doseadas em laboratório. A argamassa com maior diferença entre as velocidades obtidas nos diferentes tipos de aplicação foi a argamassa com 100% de substituição do agregado por granulado de cortiça. Este facto pode dever-se a esta argamassa ter sido aplicada em varias camadas no protótipo de parede reduzindo assim a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas. As argamassas industriais tiveram uma diminuição da velocidade nos protótipos de parede entre os 9% e os 27%, com excepção da I^{GC} que teve um aumento da velocidade de propagação de cerca de 7%, sendo a única argamassa a aumentar a velocidade quando aplicada no protótipo de parede..

Concluindo, a redução das velocidades de propagação das ondas ultra-sónicas nas argamassas aplicadas nos protótipos de parede pode dever-se à perda de alguma compacidade, como era de esperar, e a fissuras.

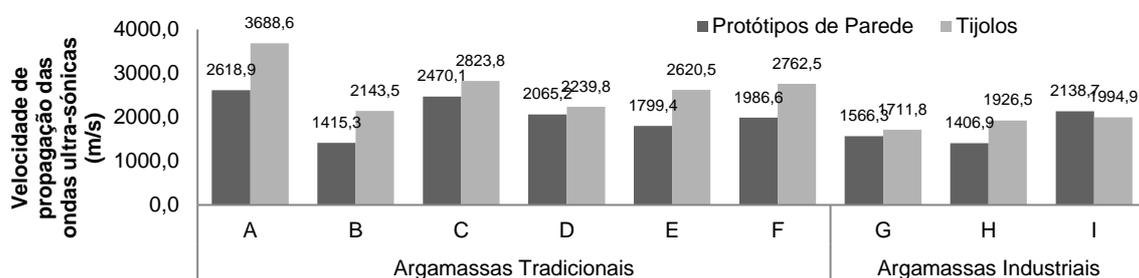


Figura 4.14 Comparação das velocidades de propagação das ondas ultra-sónicas das argamassas aplicadas em tijolo e protótipos de parede.

4.4.3 Ensaio de arrancamento por tracção (*Pull-off*)

Na Tabela 4.7 estão representados os valores obtidos da tensão média de aderência em ambos os suportes, desvio padrão, coeficiente de variação e tipologia de rotura, aos 28 dias de idade, das diferentes argamassas produzidas. No Anexo A.4.8 encontram-se os valores individuais não nulos deste ensaio.

Tabela 4.7 Resultados da tensão de aderência das argamassas aplicadas nos protótipos de parede e nos tijolos

| Argamassa | % substituição / Ag. Isolante | Suporte | Tensão Média (MPa) | Desvio Padrão (MPa) | CV (%) | Tipologia rotura |
|-------------------------|-------------------------------|---------|--------------------|---------------------|--------|------------------|
| Doseadas em laboratório | A ^{con} | Parede | (x) | (x) | (x) | nulo |
| | | Tijolo | 0,24 | 0,121 | 51,6 | adesiva |
| | B ^{GC} | Parede | 0,01 | 0,009 | 65,9 | coesiva* |
| | | Tijolo | 0,20 | 0,041 | 20,3 | coesiva* |
| | C ^{AE} | Parede | (x) | (x) | (x) | nulo |
| | | Tijolo | 0,11 | 0,013 | 11,9 | adesiva |
| | D ^{Aero/AE} | Parede | (x) | (x) | (x) | nulo |
| | | Tijolo | 0,05 | 0,028 | 57,6 | adesiva |
| | E ^{GC/AE} | Parede | (x) | (x) | (x) | nulo |
| | | Tijolo | 0,07 | 0,018 | 28,0 | adesiva |
| | F ^{AE/GC} | Parede | (x) | (x) | (x) | nulo |
| | | Tijolo | 0,09 | 0,018 | 19,5 | adesiva |
| Industriais | G ^{EPS} | Parede | 0,08 | 0,036 | 42,4 | adesiva |
| | | Tijolo | 0,14 | 0,017 | 11,8 | coesiva* |
| | H ^{GC/T} | Parede | 0,10 | 0 | 0 | adesiva |
| | | Tijolo | 0,30 | 0,027 | 9,0 | coesiva* |
| | I ^{GC} | Parede | 0,29 | 0,052 | 18,0 | adesiva |
| | | Tijolo | 0,29 | 0,100 | 34,6 | coesiva* |

Legenda: si – sem informação; CV – Coeficiente de Variação; (x) – Ensaio nulo; * - Coesiva tipo b, pela argamassa; adesiva – adesiva com o suporte.

Nos protótipos de parede com as argamassas A^{con}, C^{AE}, D^{Aero/AE}, E^{GC/AE} e F^{AE/GC}, não foi possível realizar Ensaio de arrancamento por tracção (*Pull-off*), pois durante a realização dos cortes as carotes caíram. O motivo pelo qual este facto ocorreu pode ter sido a vibração da rebarbadora, que provocou o destacamento das carotes, ou devido à própria aplicação da argamassa ou tratamento do suporte antes

da aplicação das argamassas (deficiente humidificação, ou fraco promotor de aderência, “chapiscos”). A argamassa que contém aerogel, após 3 cortes a argamassa destacou-se (Figura 4.15).

A única argamassa doseada em laboratório onde foi possível realizar o ensaio na parede (B^{GC}), obteve valores de tensão de rotura muito baixas (0,01 MPa), comparadas com as argamassas industriais, mas as tipologias de rotura foram duas coesivas e uma adesiva (anexo A.4.8) (Figura 4.16). Mas neste caso as roturas coesivas foram devido a esta argamassa ter sido aplicada em várias camadas, logo poderão ser roturas adesivas nas camadas.

As argamassas industriais obtiveram um valor de tensão de rotura entre 0,08 e 0,29 MPa. A argamassa $H^{GC/T}$ teve o segundo ensaio nulo, pois a carote caiu com o peso da pastilha metálica (Figura 4.17). A possibilidade de se ter podido realizar este ensaio nestas argamassas mostra a influência das adições/adjuvantes que estas argamassas têm para melhorar a aderência.



Figura 4.15 Destacamento da argamassa $D^{Aero/AE}$ após cortes.



Figura 4.16 Ensaio *Pull-Off* na argamassa B^{GC} nos protótipos de parede



Figura 4.17 Ensaio *Pull-Off* na argamassa $H^{GC/T}$ nos protótipos de parede

De acordo com Veiga & Malanho (2012), as exigências adicionais do LNEC para argamassas térmicas são: a aderência tem que ser maior ou igual a 0,2 MPa ou a tipologia de rotura tem que ser coesiva (tipo b ou c). Só a argamassa I^{GC} é que respondeu a estas exigências, nos protótipos de parede.

Nas argamassas aplicadas em tijolo, os valores de tensão de rotura variaram dos 0,05 até 0,30 MPa. As argamassas industriais obtiveram valores entre os 0,14 e os 0,30 MPa, sendo a $H^{GC/T}$ a que obteve melhores resultados. As argamassas doseadas em laboratório obtiveram valores entre os 0,05 e os 0,24 MPa, sendo a argamassa A^{con} a que obteve o maior valor. As argamassas térmicas doseadas em laboratório tiveram uma tensão de rotura de 16 a 79% inferiores à tensão de rotura da argamassa de controlo (A^{con}), com 100% areia, logo a substituição do agregado por agregados leve reduz a tensão de aderência. É de notar que a argamassa B^{GC} foi a que obteve melhores resultados das argamassas térmicas doseadas em laboratório.

Na argamassa industrial G^{EPS} a rotura deu-se superficialmente, ligação da pastilha à amostra, como mostra a Figura 4.19. Na argamassa $H^{GC/T}$ a rotura deu-se relativamente a meio da argamassa (Figura 4.20), como era desejável.

É de notar que as argamassas que contêm grandes percentagens de cortiça são as que tem melhor aderência, tanto as industriais como as doseadas em laboratório. Cerca de cinco vezes superior que as restantes argamassas, com excepção da argamassa de controlo.

Silva (2014), para uma argamassa 100% agregado de cortiça obteve um valor de 0,23 MPa com uma tipologia de rotura adesiva. Leal (2012), para uma argamassa 80% de substituição do agregado por cortiça, obteve um valor de 0,11 MPa e uma tipologia de rotura coesiva na argamassa. A argamassa B^{GC} teve um valor de 0,20 MPa com tipologia de rotura coesiva na argamassa, esta aplicada em tijolo. Comparando os resultados verifica-se que os valores obtidos para a argamassa B^{GC} foram melhores para ambos os autores, pois a tipologia de rotura que se quer é a coesiva e não adesiva. A argamassa B^{GC} pode ter tido resultados melhores que Silva (2014).



Figura 4.18 Resultado final do ensaio de arrancamento da argamassa B^{GC} aplicada em tijolo



Figura 4.19 Resultado final do ensaio de arrancamento da argamassa G^{EPS} aplicada em tijolo



Figura 4.20 Resultado final do ensaio de arrancamento da argamassa H^{GCT} aplicada em tijolo

Barroca (2013), para uma argamassa bastarda com 75% de substituição do agregado por argila expandida e superplastificantes, obteve uma tensão de rotura de 0,13 MPa, com tipologia de rotura adesiva. Para as argamassas C^{AE} e F^{AE/GC} aplicadas em tijolo, tiveram-se os valores 0,11 MPa e 0,09 MPa, respectivamente, e ambas com rotura adesiva. A argamassa produzida por Barroca (2013) teve melhor resultado, mas esta continha areia, o que se revelou melhorar a aderência.

Comparando aos ensaios realizados em suporte de tijolo com protótipos de parede, pode-se concluir, observando a Figura 4.21, que a aplicação na vertical reduz a aderência, podendo estar muitos motivos envolvidos, tais como a força da gravidade, a aplicação da argamassas, as varias camadas aplicadas na parede, enquanto no tijolo só se aplicou numa camada ou mesmo a vibração da rebarbadora na argamassa, já que nos tijolos foi uma maquina de corte que não produz tanta vibração. É de notar que a argamassa I^{GC} obteve o mesmo valor nos dois suportes, mostrando que esta melhor preparada para aplicação na vertical. Nas restantes argamassas industriais a diferença foi de 43 a 67% inferior na aplicação em parede.

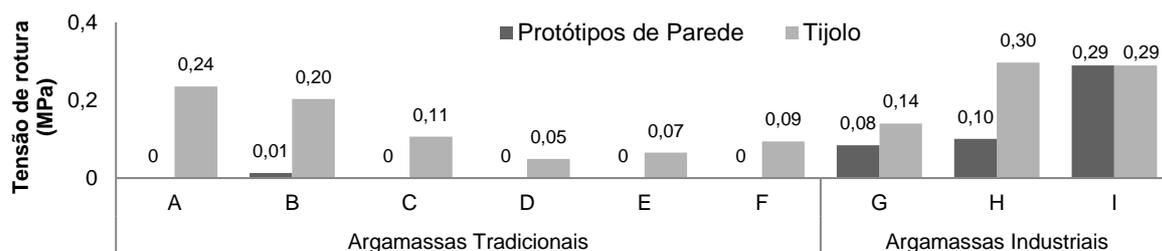


Figura 4.21 Comparação das tensões de rotura nas argamassas aplicadas me tijolo com as aplicadas em protótipos de parede

Em conclusão, é possível verificar que as argamassas térmicas que contêm cortiça são as que têm melhores resultados em termos de valor de tensão de rotura e em termos de tipologia, independentemente do suporte. Também se conclui que as argamassas aplicadas em parede perdem aderência, com excepção da I^{GC} (industrial de cortiça). Isto pode dever-se ao tipo de aplicação, das características da própria argamassa e da verticalidade do suporte.

4.4.4 Esclerómetro pendular

Encontram-se na Tabela 4.8 os resultados médios alcançados do índice esclerométrico obtidos nas argamassas aplicadas em protótipos de parede e tijolo. No anexo A.4.9 encontram-se os valores individuais deste ensaio.

Tabela 4.8 Índice esclerométrico das argamassas aplicadas nos protótipos de parede e em tijolo

| Argamassa | | % substituição / Ag. Isolante | Protótipos de parede | | | Tijolo | | |
|-------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------|------|--------|--------|-----|--------|
| | | | Média | DP | CV (%) | Média | DP | CV (%) |
| Doseadas em laboratório | A ^{con} | Sem adição | 117,3 | 13,9 | 11,9 | 112,8 | 6,0 | 5,3 |
| | B ^{GC} | 100%GC | 93,4 | 4,6 | 4,9 | 77,5 | 1,3 | 1,7 |
| | C ^{AE} | 100%AE | 91,1 | 8,0 | 8,8 | 82,8 | 2,0 | 2,4 |
| | D ^{Aero/AE} | 60%Aerogel e 40%AE | 77,1 | 2,0 | 2,7 | 78,5 | 2,2 | 2,8 |
| | E ^{GC/AE} | 60%GC e 40%GC | 90,3 | 7,1 | 7,9 | 74,2 | 0,8 | 1,0 |
| | F ^{AE/GC} | 40%GC e 60%GC | 92,5 | 5,7 | 6,2 | 75,0 | 1,5 | 2,0 |
| Industriais | G ^{EPS} | 70 a 80% EPS | 83,0 | 1,7 | 2,1 | 79,3 | 3,5 | 4,4 |
| | H ^{GC/T} | Cortiça (si) | 96,5 | 3,8 | 3,9 | 80,0 | 1,0 | 1,3 |
| | I ^{GC} | 70 a 80% Cortiça | 100,2 | 3,7 | 3,7 | 77,5 | 4,8 | 6,2 |

Legenda: si – sem informação; DP – Desvio Padrão; CV – Coeficiente de Variação.

Os valores do índice esclerométrico na parede, para as argamassas térmicas, variam entre os 77,1 e os 100,2. As argamassas térmicas doseadas em laboratório variam entre os 77,1 e os 93,4 e as argamassas industriais variam entre os 83,0 e os 100,2. A argamassa A^{con} obteve um valor médio de 117,3, tendo as restantes argamassas doseadas em laboratório um valor inferior de cerca de 24%. A argamassa I^{GC} foi, das argamassas térmicas, a que teve o índice esclerométrico maior (100,2), isto deve-se ao facto de ser uma argamassa de acabamento. Os coeficientes de variação para estas argamassas aplicadas nos protótipos de parede variam entre os 11,9% e os 2,1%, sendo a argamassa de controlo (A^{con}) a com maior variação dos resultados e as argamassas industriais as que obtiveram menores coeficientes de variação.

Galvão (2009) realizou este ensaio em muretes envelhecidos que tinham uma argamassa cimentícia doseada em laboratório, e obteve um índice esclerométrico de 90 a 95. A argamassa doseada em laboratório de controlo (A^{con}), teve um valor de índice esclerométrico cerca de 23% superior, comparando com a argamassa ensaiada por Galvão (2009).

Nos estudos de Flores-Colen (2009), verificou-se que a argamassa com desempenho mecânico adequado em rebocos exteriores doseadas em laboratório e pré-doseados mais compactos, de base cimentícia, apresentou índice esclerométrico superior a 75. Assim, as argamassas doseadas em laboratório e industriais ensaiadas neste trabalho tem um desempenho mecânico adequado, comparativamente com as argamassas estudadas por Flores-Colen (2009), visto terem um índice superior a 77,1.

Em termos das argamassas aplicadas em tijolo, os valores do índice esclerométrico variou entre os 74,2 e os 112,8. As argamassas térmicas doseadas em laboratório variam entre os 74,2 e os 82,8, e as argamassas industriais variam entre os 77,5 e os 80,0. Na argamassa A^{con} obteve-se um valor médio de 112,8, tendo as restantes argamassas doseadas em laboratório um valor inferior de cerca de 30%. Os coeficientes de variação estão entre os 1% e os 6,2%, sendo a argamassa I^{GC} a que obteve um coeficiente de variação maior.

Arromba (2011) para uma argamassa cimentícia de referência, com traço 1:4, aplicada em tijolo, obteve um valor de índice esclerométrico de 61 a 75. O valor obtido para a argamassa de controlo (A^{con}) com agregado de areia aplicada em tijolo, foi 50% superior ao valor obtido por Arromba (2011).

Silva (2014) aplicou uma argamassa com 100% de substituição do agregado por cortiça em tijolo e obteve um valor de índice esclerométrico igual a 53,7. Este valor foi 30% inferior ao obtido para a argamassa B^{GC} , que também tem 100% de substituição do agregado por cortiça.

Comparando as argamassas aplicadas em tijolo e nos protótipos de parede (Figura 4.22), verifica-se que o índice esclerométrico aumenta quando aplicadas na parede, com excepção da argamassa $D^{Aero/AE}$, em que a diferença não é muito relevante. Este facto pode dever-se aos tijolos não estarem fixos, mesmo encostados a uma parede. Também se esperam índices mais elevados na parede pois a rigidez da parede também contribui, este facto nota-se mais nas argamassas menos compactas.

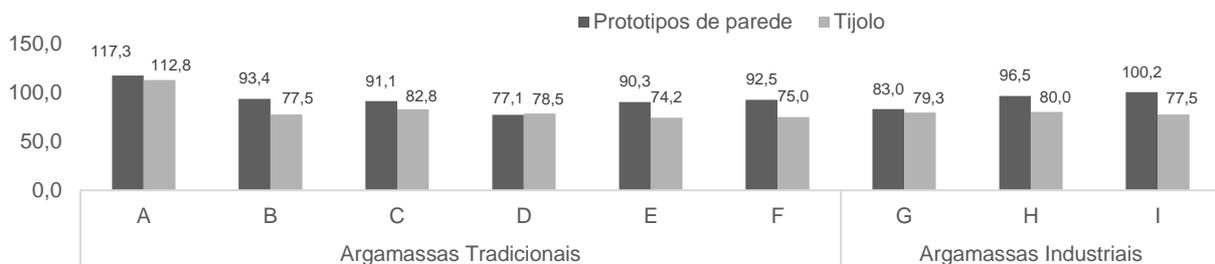


Figura 4.22 Valores do índice esclerométrico nas argamassas aplicadas em protótipos de parede e tijolo.

4.4.5 Ensaio de resistência superficial *Martinet Baronnie*

Na Tabela 4.9 estão os diâmetros médios da massa provocada pelo equipamento de *Martinet Baronnie* nas argamassas aplicadas em protótipos de parede e tijolo. No Anexo A.4.10 encontram-se os valores individuais deste ensaio.

Tabela 4.9 Diâmetros médios de *Martinet Baronnie* nas argamassas aplicadas nos protótipos de parede e em tijolo

| Argamassa | | % substituição / Ag. Isolante | Protótipos de parede | | | Tijolo | | |
|-------------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------|---------|--------|-------------------------|---------|--------|
| | | | D _{Médio} (cm) | DP (cm) | CV (%) | D _{Médio} (cm) | DP (cm) | CV (%) |
| Doseadas em laboratório | A ^{con} | Sem adição | 0,5 | 0,1 | 21,1 | 0,7 | 0,2 | 22,9 |
| | B ^{GC} | 100%GC | 2,0 | 0,2 | 8,9 | 2,2 | 0,3 | 13,3 |
| | C ^{AE} | 100%AE | 1,4 | 0,2 | 14,3 | 1,6 | 0,2 | 14,1 |
| | D ^{Aero/AE} | 60%Aerogel e 40%AE | 2,1 | 0,1 | 5,5 | 1,7 | 0,3 | 14,5 |
| | E ^{GC/AE} | 60%GC e 40%GC | 1,8 | 0,2 | 13,7 | 2,7 | 0,3 | 10,8 |
| | F ^{AE/GC} | 40%GC e 60%GC | 1,5 | 0,2 | 14,6 | 2,1 | 0,1 | 5,6 |
| Industriais | G ^{EPS} | 70 a 80% EPS | 2,5 | 0,1 | 4,4 | 2,7 | 0,3 | 10,8 |
| | H ^{GC/T} | Cortiça (si) | 1,2 | 0,3 | 24,3 | 1,6 | 0,1 | 7,4 |
| | I ^{GC} | 70 a 80% Cortiça | 1,7 | 0,1 | 4,9 | 1,9 | 0,1 | 6,0 |

Legenda: si – sem informação; D_{Médio} – Diâmetro médio da massa DP – Desvio Padrão; CV – Coeficiente de Variação.

Os diâmetros das massas realizadas pelo equipamento de *Martinet Baronnie* na parede, nas argamassas com isolantes térmicos, variam entre os 1,2 e os 2,5 cm. Nas argamassas térmicas doseadas em laboratório a massa de impacto varia entre os 1,4 e os 2,1 cm e nas argamassas industriais varia entre aos 1,2 e os 2,5 cm. O aumento do diâmetro da massa das argamassas térmicas em relação à argamassa A^{con} é mais do dobro, podendo chegar perto do sêxtuplo do valor do diâmetro da argamassa de controlo. A argamassa térmica doseada em laboratório com menos resistência superficial é a D^{Aero/AE} com um diâmetro de impacto médio de 2,1 cm, e a com maior resistência é a C^{AE} (1,4 cm). De todas as argamassas térmicas a com mais resistência é a H^{GC/T} com um diâmetro média de 1,2 cm de massa.

Rodrigues (2010) realizou este ensaio numa parede com reboco térmico pré-doseado muito semelhante a argamassa G^{EPS}, mas com uma camada de regularização de argamassa armada com fibra de vidro muito fina. O diâmetro de impacto obtido foi de 2,2 cm, o que não foi muito diferente do resultado obtido para a argamassa G^{EPS}, que foi de 2,5 cm.

Os diâmetros das massas realizadas pelo equipamento de *Martinet Baronnie* nas argamassas aplicadas em tijolos variam entre os 0,7 e os 2,7 cm. Nas argamassas térmicas doseadas em laboratório a massa de impacto varia entre os 1,6 e os 2,7 cm e nas argamassas industriais varia entre aos 1,6 e os 2,7 cm. As argamassas térmicas aplicadas em tijolo também têm um aumento do diâmetro da massa de impacto muito grande em relação à A^{con}. A argamassa térmica doseada em laboratório com menos resistência superficial, neste caso, é a E^{GC/AE} com um diâmetro de impacto médio de 2,7 cm, e a com maior resistência é a C^{AE} (1,6 cm).

De acordo com Flores-Colen *et al.* (2010), estabeleceu-se o critério para avaliação do desempenho de rebocos exteriores com massa volúmica aparente inferior a $1550 \pm 150 \text{ kg/m}^3$, em que o diâmetro da massa no *Martinet Baronnie* deve ter valores entre 1,3 e 2,0 cm. Tendo em conta que a argamassa

térmica com maior massa volúmica teve o valor de $721,8 \text{ kg/m}^3$, significa que todas estas argamassas têm uma massa volúmica inferior a 1550 kg/m^3 . Assim no caso das argamassas térmicas aplicadas em protótipos de parede existe duas que excederam os 2,0 cm, a $D^{\text{Aero/AE}}$ e a G^{EPS} , com diâmetros de impacto em média igual a 2,1 cm e 2,5 cm, respectivamente. A argamassa $H^{\text{GC/T}}$ não chegou a ter um diâmetro de 1,3 cm, tendo um diâmetro de impacto médio igual a 1,2 cm, mas isso quer dizer que tem mais resistência superficial. Logo, no geral as argamassas estão com uma boa resistência. No caso das argamassas aplicadas em tijolo, quatro argamassas ultrapassaram o limite, a B^{GC} , a $F^{\text{AE/GC}}$, a $E^{\text{GC/AE}}$ e a G^{EPS} , tendo as duas últimas ultrapassado 35% dos 2,0 cm. Assim o ensaio em tijolo mostrou que as argamassas ai aplicadas têm menos resistência superficial que as estudadas por Flores-Colen *et al.* (2010).

Comparando os dois tipos de aplicação, pode-se observar pela Figura 4.23, que as argamassas aplicadas em tijolo obtiveram um maior diâmetro da massa de impacto, com excepção da $D^{\text{Aero/AE}}$, o que traduz numa menor resistência superficial, este fenómeno pode dever-se as condições de ensaio, como por exemplo, o tijolo não estar fixo e o efeito de sucção do tijolo.

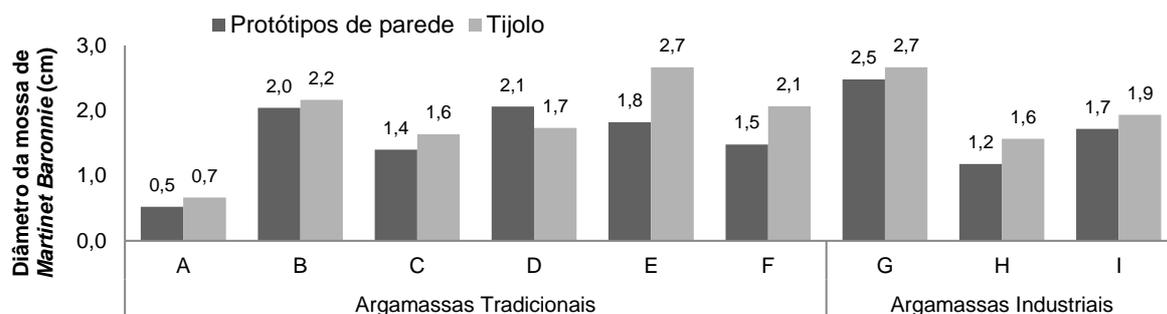


Figura 4.23 Diâmetros de massa do impacto do equipamento de *Martinet Baronnie* nas argamassas aplicadas em tijolo e nos protótipos de parede

É possível verificar que quanto maior for a percentagem de substituição do agregado por argila expandida na argamassa térmica, maior é a sua resistência superficial ou seja, menor é o diâmetro da massa.

4.4.6 Módulo de elasticidade dinâmico

Na Tabela 4.10 estão representados os valores médios do módulo de elasticidade dinâmico, aos 28 dias, para as argamassas industriais e doseadas em laboratório. Os resultados individuais deste ensaio, tais como os valores de flexão e torção (kHz), encontram-se no anexo A.4.11.

É possível constatar que o valor do módulo de elasticidade dinâmico varia entre os 404 MPa e os 2890 MPa, para as argamassas térmicas. Para as argamassas industriais varia entre os 527 a 870 MPa e para as argamassas doseadas em laboratório varia entre os 404 a 2890 MPa, como é possível observar na Figura 4.24.

Tabela 4.10 Módulo de elasticidade das argamassas produzidas

| Argamassa | % substituição / Ag. Isolante | Módulo de elasticidade dinâmico médio (MPa) | Desvio padrão (MPa) | Coefficiente de Variação (%) | |
|-------------------------|-------------------------------|---|---------------------|------------------------------|------|
| Doseadas em laboratório | A ^{con} | Sem adição | 13394 | 756,9 | 5,7 |
| | B ^{GC} | 100%GC | 404 | 23,4 | 5,8 |
| | C ^{AE} | 100%AE | 2890 | 205,3 | 7,1 |
| | D ^{Aero/AE} | 60%Aerogel e 40%AE | 1095 | 113,1 | 10,3 |
| | E ^{GC/AE} | 60%GC e 40%GC | 1340 | 14,5 | 1,1 |
| | F ^{AE/GC} | 40%GC e 60%GC | 2151 | 129,5 | 6,0 |
| Industriais | G ^{EPS} | 70 a 80% EPS | 527 | 36,8 | 7,0 |
| | H ^{GC/T} | Cortiça (si) | 554 | 41,5 | 7,5 |
| | I ^{GC} | 70 a 80% Cortiça | 870 | 6,4 | 0,7 |

Legenda: si – sem informação.

Em relação às argamassas doseadas em laboratório, o valor obtido para a argamassa A^{con} (13394 MPa) aproxima-se de valores obtidos por outros autores, para uma argamassa semelhante: Arromba (2011), obteve o valor de 11600 MPa; Gonçalves (2010) obteve o valor de 12900 MPa; Veiga (1998) obteve o valor de 11580 MPa; Vale (2014) obteve o valor de 15140 MPa, aos 28 dias.

Silva (2014) produziu uma argamassa bastarda com 100% de substituição do agregado por cortiça e obteve o valor de 657 MPa de módulo de elasticidade dinâmico. A argamassa B^{GC} teve um módulo de elasticidade de 404 MPa, sendo um pouco a baixo do obtido por Silva (2014), esta diferença poderá ser devida às argamassas não terem os mesmos ligantes.

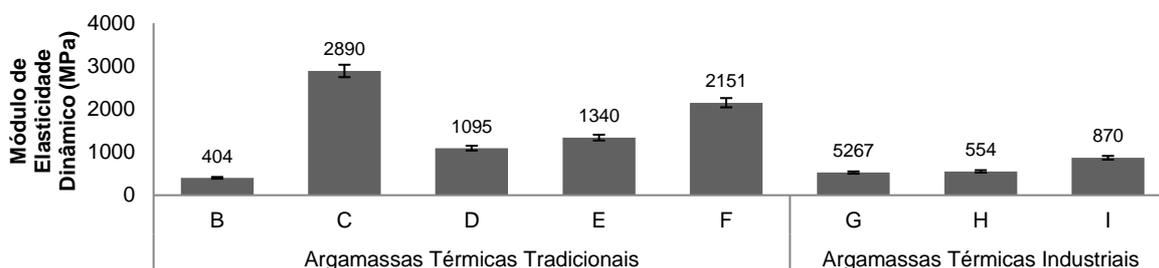


Figura 4.24 Valores do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas térmicas

Em relação às argamassas industriais e relativamente aos valores que os respectivos fabricantes preconizam para o módulo de elasticidade dinâmico, os valores obtidos não distam muito dos resultados previstos. Assim, o valor obtido para a argamassa G^{EPS} (527 MPa) está próximo do previsto pelo respectivo fabricante (500 MPa). As outras duas argamassas estão um pouco mais abaixo que o previsto pelo fabricante, tendo a argamassa H^{GC/T} (554 MPa) um valor 25% inferior (742 MPa) e a argamassa I^{GC} (870 MPa) 13% inferior (1000 MPa).

4.4.7 Resistência à tracção por flexão

Na Tabela 4.11 encontram-se os valores médios da resistência à tracção por flexão, o desvio-padrão e o coeficiente de variação das diferentes argamassas produzidas, aos 28 dias de idade. Os resultados individuais obtidos do respectivo ensaio encontram-se no anexo A.4.12.

Tabela 4.11 Resultados da resistência à tração por flexão das argamassas produzidas

| Argamassa | % substituição / Ag. Isolante | Resistência à tração (MPa) | Desvio Padrão (MPa) | Coefficiente de Variação (%) | |
|-------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------|------------------------------|------|
| Doseadas em laboratório | A ^{con} | Sem adição | 2,26 | 0,19 | 8,6 |
| | B ^{GC} | 100%GC | 0,36 | 0,01 | 2,8 |
| | C ^{AE} | 100%AE | 0,99 | 0,06 | 6,3 |
| | D ^{Aero/AE} | 60%Aerogel e 40%AE | 0,37 | 0,06 | 17,1 |
| | E ^{GC/AE} | 60%GC e 40%GC | 0,74 | 0,02 | 2,2 |
| | F ^{AE/GC} | 40%GC e 60%GC | 0,87 | 0,09 | 10,6 |
| Industriais | G ^{EPS} | 70 a 80% EPS | 0,65 | 0,02 | 2,8 |
| | H ^{GC/T} | Cortiça (si) | 0,69 | 0,13 | 19,4 |
| | I ^{GC} | 70 a 80% Cortiça | 0,70 | 0,04 | 6,3 |

Legenda: si – sem informação.

A resistência à tração por flexão das argamassas térmicas variam entre os 0,36 MPa e os 0,99 MPa. As argamassas térmicas doseadas em laboratório variam os valores de resistência à tração entre os 0,36 e os 0,99 MPa e as industriais entre os 0,65 e os 0,7 MPa (Figura 4.25).

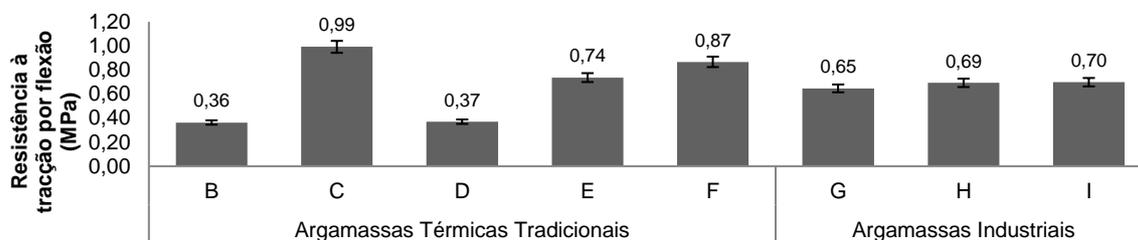


Figura 4.25 Resistência à tração por flexão das argamassas térmicas

Em relação as argamassas térmicas doseadas em laboratório, estas têm uma resistência entre 56% a 84% inferior à argamassa A^{con} (2,26 MPa).

Para a argamassa produzida por Gao *et al.* (2014) com 60% de substituição do agregado por aerogel, esta teve um valor de resistência à tração por flexão de 1,2 MPa. A argamassa D^{Aero/AE}, que contém Aerogel, comparando com a argamassa de Gao *et al.* (2014), alcançou uma resistência cerca de 60% inferior (0,37 MPa). Este resultado deve-se a argamassa D^{Aero/AE} só conter agregados isolantes, que são agregados leves com uma resistência mais baixa que a areia.

A argamassa bastarda (cal hidráulica e cimento) produzida por Silva (2014) com 100% de substituição do agregado por cortiça teve uma resistência à tração de 0,49 MPa. A argamassa B^{GC} teve um valor (0,36 MPa) inferior a Silva (2014) de cerca de 27%. As pequenas diferenças devem-se as argamassas não terem o mesmo ligante nem a mesma granulometria de cortiça.

Em relação as argamassas industriais, o único fabricante a fornecer valores previstos para as resistências à tração é para a argamassa I^{GC} de 1,5 MPa. Na argamassa I^{GC} obteve-se um valor inferior ao previsto pelo fabricante, cerca de 50%.

Conclui-se que, em relação as argamassas doseadas em laboratório, quanto mais percentagem de cortiça tiverem, menor é a resistência à flexão. Pode-se ver que a argamassa C^{AE} (100% argila

expandida) teve uma resistência cerca de três vezes superior à resistência obtida para a argamassa B^{GC} (100% granulado de cortiça expandida).

4.4.8 Resistência à compressão

Na Tabela 4.12 estão representados os valores médios da resistência à compressão, o desvio-padrão e o coeficiente de variação das diferentes argamassas produzidas, aos 28 dias de idade, em provetes prismáticos normalizados, e aos 10 meses, nas amostras de protótipos de parede. Os resultados individuais obtidos do respectivo ensaio encontram-se no anexo A.4.13.

Tabela 4.12 Resultados da resistência à compressão das argamassas produzidas em provete e aplicadas em tijolo

| Argamassa | | % substituição / Ag. Isolante | Amostra | Resistência à compressão (MPa) | Desvio padrão (MPa) | Coeficiente de Variação (%) |
|-------------------------|----------------------|-------------------------------|---------|--------------------------------|---------------------|-----------------------------|
| Doseadas em laboratório | A ^{con} | Sem adição | Provete | 6,61 | 0,40 | 6,1 |
| | | | Parede | 5,50 | 1,21 | 22,0 |
| | B ^{GC} | 100%GC | Provete | 0,61 | 0,05 | 7,7 |
| | | | Parede | 0,84 | 0,07 | 8,2 |
| | C ^{AE} | 100%AE | Provete | 2,39 | 0,11 | 4,5 |
| | | | Parede | 2,88 | 0,65 | 22,5 |
| | D ^{Aero/AE} | 60%Aerogel e 40%AE | Provete | 1,32 | 0,23 | 17,4 |
| | | | Parede | 0,91 | 0,12 | 13,6 |
| | E ^{GC/AE} | 60%GC e 40%GC | Provete | 1,75 | 0,11 | 6,3 |
| | | | Parede | 1,06 | 0,13 | 12,7 |
| F ^{AE/GC} | 40%GC e 60%GC | Provete | 2,22 | 0,25 | 11,1 | |
| | | Parede | 1,70 | 0,02 | 11,7 | |
| Industriais | G ^{EPS} | 70 a 80% EPS | Provete | 0,92 | 0,08 | 8,2 |
| | | | Parede | 0,79 | 0,08 | 9,9 |
| | H ^{GC/T} | Cortiça (si) | Provete | 1,30 | 0,16 | 11,9 |
| | | | Parede | 1,97 | 0,06 | 2,8 |
| | I ^{GC} | 70 a 80% Cortiça | Provete | 1,56 | 0,16 | 10,3 |
| | | | Parede | 2,89 | 0,36 | 12,6 |

Legenda: si – sem informação.

As argamassas térmicas em provetes prismáticos normalizados tiveram valores de resistência à compressão entre os 0,6 e os 2,2 MPa. As argamassas térmicas doseadas em laboratório tiveram valores entre os 0,6 e os 2,2 MPa e as industriais tiveram valores entre os 0,9 e os 1,6 MPa.

As argamassas térmicas doseadas em laboratório obtiveram uma resistência à compressão entre 67 e 90% inferior à resistência da A^{con} (6,61 MPa).

Para a argamassa de Gao *et al.* (2014) (60% de substituição do agregado por aerogel), o valor de resistência à compressão foi de 8,3 MPa. Comparando com a D^{Aero/AE} (1,32 MPa, ensaio em provete), a argamassa de Gao *et al.* (2014) teve uma resistência muito superior. Assim a argamassa D^{Aero/AE} foi muito fraca.

As amostras das argamassas térmicas retiradas dos protótipos de parede tiveram valores de resistência à compressão entre os 0,8 e os 2,9 MPa. Neste caso as argamassas térmicas doseadas em laboratório obtiveram uma resistência à compressão entre 47 e 85% inferior à resistência da A^{con} (5,5 MPa).

Em relação as argamassas industriais, as resistências à compressão previstas pelos fabricantes são 0,4 a 2,5 MPa, 1,5 MPa e 1,5 a 5 MPa para as argamassas G^{GPS}, H^{GC/T} e I^{GC} respectivamente. As argamassas industriais tiveram resultados compreendidos nos limites previstos pelo fabricante.

Comparando os resultados dos provetes prismáticos e das amostra da parede (Figura 4.26), é possível observar que para metade das argamassas térmicas (B^{GC}, C^{AE}, H^{GC/T} e I^{GC}) as resistências à compressão são superiores nas amostra da parede do que nos provetes prismáticos, sendo as restantes o contrário. Era de esperar que as resistências das amostras fossem superiores às dos provetes pois, para além de o ensaio ter sido realizado passado 10 meses na argamassa aplicada na parede (amostras) e os provetes terem sido ensaiados aos 28 dias, também se tem que ter em conta que maior compactação na argamassa aplicada na parede. Com estes resultados pode-se concluir que a aplicação da argamassa na vertical e o efeito de sucção do tijolo, influenciam os resultados da resistência à compressão.

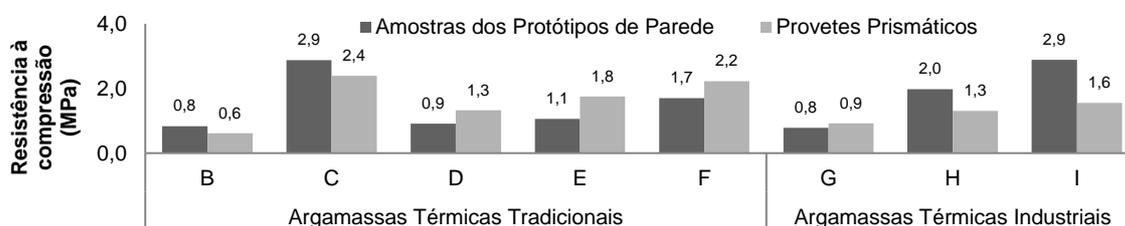


Figura 4.26 Resistência à compressão dos provetes prismáticos e das amostras retiradas dos protótipos de parede

4.5 Correlação entre os resultados das técnicas de ensaio

Com o intuito de se proceder a uma melhor interpretação dos resultados, efectuaram-se várias correlações entre os resultados das técnicas de ensaio, de forma a complementar os resultados já obtidos. De realçar que estas relações têm em conta, apenas, as argamassas térmicas, excluindo a argamassa de referência.

Assim, na Tabela 4.13 encontra-se um resumo das correlações entre ensaios realizados nos protótipos de parede e respectivos R² do tipo de regressão que se achou mais adequado.

Tabela 4.13 Comparação entre ensaios e tipos de relação

| Parâmetros de medição | Parâmetro de comparação | Tipo de regressão | R ² |
|--|--|-------------------|----------------|
| Velocidade da propagação das ondas ultra-sónicas (m/s) | Resistência à compressão (MPa) | Polinomial | 0,46 |
| | Massa volúmica aparente (kg/m ³) | Exponencial | 0,68 |
| Índice esclerométrico | Resistência à compressão (MPa) | Potência | 0,43 |
| | Resistência superficial de <i>Martinet Baronnie</i> (cm) | Linear | 0,38 |
| | Massa volúmica aparente (kg/m ³) | Potência | 0,04 |
| Resistência superficial de <i>Martinet Baronnie</i> (cm) | Resistência à compressão (Mpa) | Potência | 0,59 |
| | Massa volúmica aparente (kg/m ³) | Linear | 0,42 |
| Resistência à compressão(MPa) | Massa volúmica aparente (kg/m ³) | Linear | 0,61 |

Como se pode observar na Tabela 4.13, a correlação com um R^2 superior, foi entre a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas e a massa volúmica aparente, com um R^2 de 0,68.

Uma vez que as ondas se propagam por vibração das partículas sólidas, a velocidade de propagação das ondas depende, principalmente, da constituição do material analisado. Sabendo que os materiais menos compactos apresentam valores de velocidade de propagação inferiores aos materiais mais compactos (maior massa volúmica aparente) (Magalhães *et al.*, 2003), é possível estabelecer um paralelismo entre estes resultados e os valores da massa volúmica aparente. Como se pode verificar na Figura 4.27, em geral, quanto maior a massa volúmica aparente mais rápida é a velocidade da propagação das ondas.

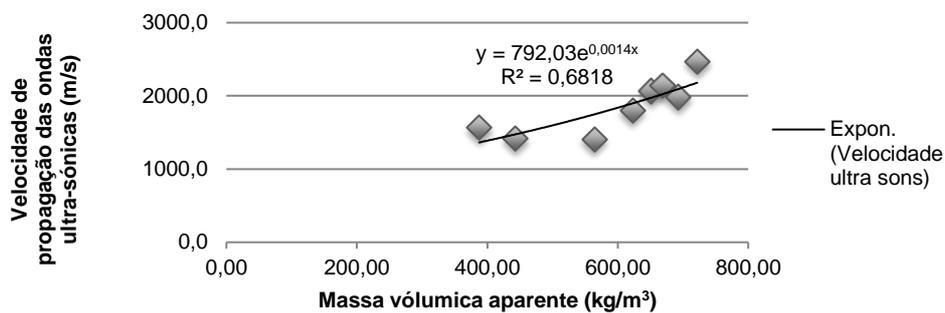


Figura 4. 27 Correlação dos resultados dos ensaios de Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas com Massa Volúmica Aparente

Também existe uma relação razoável ($R^2=0,61$) entre a resistência à compressão e a massa volúmica aparente. Na figura 4.28 é possível verificar que quanto maior a massa volúmica aparente maior é a resistência à compressão.

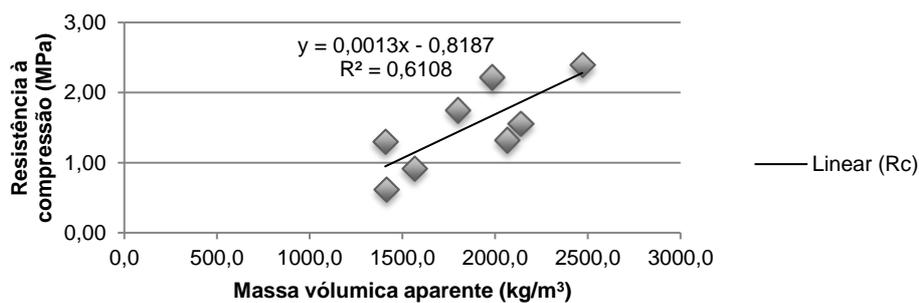


Figura 4. 28 Correlação dos resultados dos ensaios de Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas com Massa Volúmica Aparente

Outra relação que também se pode destacar é a resistência superficial de *Martinet Baronnie* e a resistência à compressão, com um R^2 de 0,59. Na Figura 4.29 pode-se verificar a relação entre estes dois ensaios. É possível concluir que quanto maior a resistência à compressão menor é a massa provocada pelo equipamento de *Martinet Baronnie*, ou seja, maior é a resistência à deformabilidade superficial da argamassa, como era expectável.

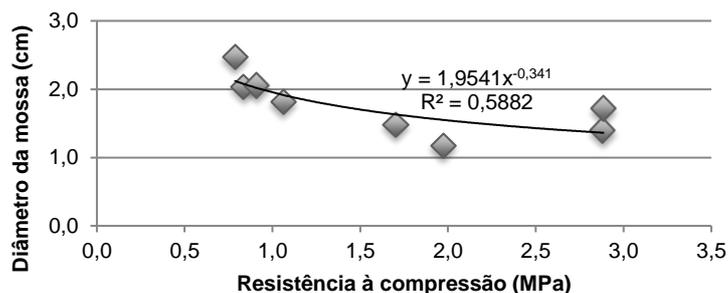


Figura 4.29 Correlação dos resultados dos ensaios de resistência superficial de Martinet Baronnie com Resistência à compressão

4.6 Análise crítica/síntese dos resultados

Na Tabela 4.14 estão representadas, de um modo geral, as características mecânicas estudadas das diferentes argamassas produzidas, tanto industriais como doseadas em laboratório.

Em primeira análise, e tendo em conta a verificação da diferença das características mecânicas das argamassa térmicas aplicadas em parede vertical e a aplicações em tijolo e provete, é possível verificar que, em comparação com os provetes, a argamassa aplicada na parede mostrou uma melhor resistência, muito devido ao efeito de sucção do tijolo. Em relação aos tijolos, os ensaios na parede obtiveram valores menos bons, desta vez devido à diferença de condições de aplicação (verticalidade) e aderência.

Em relação à massa volúmica aparente, no estado endurecido, das argamassas isolantes é possível aferir que os valores variam de 476,6 a 818,8 kg/m³. De acordo com a norma EN 998-1 (CEN, 2010) estas argamassas podem ser classificadas de argamassas leves ($M_v \leq 1300 \text{ kg/m}^3$).

Os valores de espalhamento variam entre os 123,6 e os 189,1 mm, o que mostra que estas argamassas são bastante fluidas, especialmente a que contém aerogel.

As resistências à compressão das argamassas térmicas, variam entre 0,6 e 2,2 MPa nos provetes normalizados e 0,8 e 2,9 MPa nos protótipos de parede. Melhores resultados nos protótipos de parede devido a estes terem o efeito de sucção do tijolo e maior aperto na aplicação. As resistências à tracção por flexão variam, em geral, entre 0,4 e 1,0 MPa. Em relação ao módulo de elasticidade dinâmico, os valores das argamassas térmicas são da ordem dos 404-2890 MPa e como tal, apresentam uma capacidade de deformação superior a argamassas correntes, estando menos sujeitas a fenómenos de fendilhação ($E_d \leq 10000 \text{ MPa}$, segundo o relatório 427/05 do LNEC (2005)). Estas argamassas, apesar de cumprirem com os requisitos de resistência à compressão (classes CSI a CSII de acordo com a norma EN 998-1), apresentam módulos de elasticidade dinâmico baixos, condicionando a sua utilização, em situações pontuais, nomeadamente em paredes expostas a choques ($E_d \geq 5000 \text{ MPa}$ - MERUC CSTB (1993)). Assim, é possível verificar que os valores obtidos para o ensaio de choque (*Martinet Baronnie*), na parede nas argamassas térmicas, foram elevados (entre 1,2 e 2,5 cm)

comparados com a argamassa de controlo (0,5 cm). Foi possível verificar também que os valores do mesmo ensaio nas argamassas em tijolo foram superiores (entre 1,6 e 2,7 cm).

No ensaio esclerométrico, as argamassas térmicas obtiveram índices esclerométricos abaixo dos 100 (entre 77,1 e 100) nos ensaios na parede. Este índice ainda diminuiu mais nas argamassas aplicadas em tijolo (entre 74,2 e 82,8), onde a rigidez do suporte era menor.

Em relação aos valores de tensão de aderência ao suporte, nas argamassas térmicas aplicadas em tijolo, variaram dos 0,05 até 0,30 MPa. Nos protótipos de parede verificou-se a impossibilidade da realização de alguns ensaios, mas os que foram possível realizar obtiveram-se valores entre os 0,01 e 0,29 MPa. Tendo em conta os requisitos existentes e os campos de aplicação preconizados pelos fabricantes das respectivas argamassas industriais (podem ser utilizadas para a reabilitação de suportes antigos), os valores obtidos podem considerar-se aceitáveis em alguns casos (0,1- 0,3 MPa para roturas adesivas) (Veiga, 2003). No caso, em que os valores de tensão de aderência ao suporte são superiores a 0,30 MPa, estas argamassas adequam-se à aplicação em suportes correntes. Ainda é possível concluir que nas argamassas doseadas em laboratório falta aderência, logo precisam de uma melhoria neste aspecto.

Visto se ter realizado o ensaio de velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas em todos os suportes, é possível verificar que as argamassas térmicas aplicadas em parede tiveram em média velocidades de propagação inferiores (1175,5 a 2395,0 m/s) que as argamassas aplicadas em tijolo (1413,2 a 2544,9 m/s). Pelo método directo, estas argamassas tiveram valores ainda menores que na parede (1185 a 2266 m/s), muito devida às argamassas aplicadas na parede e no tijolo terem recebido maior aperto na sua aplicação.

Tabela 4.14 Características mecânicas das argamassas produzidas (resumo).

| Argamassa | Suporte | Estado Fresco | | | Estado Endurecido | | | | | | | |
|-------------------------|----------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|----------|----------|--------------|------------------------|----------|-------------------------------|------|
| | | Espalhamento (mm) | Mv,f (kg/m ³) | Mv,e (kg/m ³) | V _{Média} (m/s) | Rt (Mpa) | Rc (Mpa) | Esclerómetro | Martinet Baronnie (cm) | Ed (Mpa) | Pull-Off (KN/m ²) | |
| Doseadas em laboratório | A ^{con} | PN | 147,9 | 1885,7 | 1690,3 | 2941,22 | 2,257 | 6,608 | x | x | 13394,24 | x |
| | | T | | | | 3688,60 | x | x | 112,8 | 0,67 | x | 0,24 |
| | | P | | | | 2618,90 | x | 5,500 | 117,3 | 0,52 | x | nulo |
| | B ^{GC} | PN | 139,0 | 560,4 | 443,1 | 1185,00 | 0,363 | 0,615 | x | x | 403,88 | x |
| | | T | | | | 2143,50 | x | x | 77,5 | 2,17 | x | 0,20 |
| | | P | | | | 1415,30 | x | 0,835 | 93,4 | 2,04 | x | 0,01 |
| | C ^{AE} | PN | 144,1 | 787,8 | 721,8 | 2266,00 | 0,992 | 2,394 | x | x | 2889,84 | x |
| | | T | | | | 2823,80 | x | x | 82,8 | 1,63 | x | 0,11 |
| | | P | | | | 2470,10 | x | 2,879 | 91,1 | 1,4 | x | nulo |
| | D ^{Aero/AE} | PN | 189,1 | 818,8 | 651,6 | 1586,44 | 0,365 | 1,323 | x | x | 1094,84 | x |
| | | T | | | | 2239,80 | x | x | 78,5 | 1,73 | x | 0,05 |
| | | P | | | | 2065,20 | x | 0,910 | 77,1 | 2,06 | x | nulo |
| | E ^{GC/AE} | PN | 139,6 | 651,6 | 622,8 | 1760,00 | 0,737 | 1,752 | x | x | 1339,89 | x |
| | | T | | | | 2620,50 | x | x | 74,2 | 2,67 | x | 0,07 |
| | | P | | | | 1799,40 | x | 1,063 | 90,3 | 1,82 | x | nulo |
| | F ^{AE/GC} | PN | 138,2 | 704,6 | 693,1 | 2032,00 | 0,867 | 2,221 | x | x | 2150,95 | x |
| | | T | | | | 2762,50 | x | x | 75 | 2,07 | x | 0,09 |
| | | P | | | | 1986,60 | x | 1,702 | 92,5 | 1,48 | x | nulo |
| Industriais | G ^{EPS} | PN | 135,6 | 476,6 | 387,4 | 1404,00 | 0,647 | 0,917 | x | x | 526,51 | x |
| | | T | | | | 1711,80 | x | x | 79,3 | 2,67 | x | 0,14 |
| | | P | | | | 1566,30 | x | 0,788 | 83 | 2,48 | x | 0,08 |
| | H ^{GC/T} | PN | 123,6 | 675,7 | 563,9 | 1266,00 | 0,693 | 1,302 | x | x | 554,44 | x |
| | | T | | | | 1926,50 | x | x | 80 | 1,57 | x | 0,30 |
| | | P | | | | 1406,90 | x | 1,973 | 96,5 | 1,18 | x | 0,10 |
| | I ^{GC} | PN | 142,3 | 778,3 | 668,9 | 1330,00 | 0,698 | 1,556 | x | x | 870,43 | x |
| | | T | | | | 1994,90 | x | x | 77,5 | 1,93 | x | 0,29 |
| | | P | | | | 2138,70 | x | 2,885 | 100,2 | 1,72 | x | 0,29 |

Legenda: PN – Provete Normalizado; T – Tijolo; P – Parede; Rt – Resistência à tração por flexão; Rc – Resistência à compressão; Ed – Módulo de elasticidade dinâmico médio; Mv,f – Massa volúmica no estado fresco; Mv,e – Massa volúmica no estado endurecido; V_{Média} – velocidade média de propagação das ondas ultra sónicas.

4.7 Conclusões do capítulo

O presente estudo experimental permitiu fazer uma análise das características mecânicas de argamassas térmicas industriais e doseadas em laboratório, com aerogel, argila expandida, cortiça e EPS, em protótipos de parede.

Após a análise dos resultados, foi possível concluir que o desempenho mecânico é inferior nas argamassas térmicas comparadas com a argamassa de controlo. Também se pode concluir que as resistências superficiais aumentam quando as argamassas são aplicadas em protótipos de parede, comparado com a aplicação em tijolo, devido à parede estar fixa. Assim, o índice esclerométrico é cerca de 20% superior e a resistência ao choque é cerca de 30% superior. Já as velocidades de propagação das ondas ultra-sónicas e a aderência são, em média, menores que em tijolo, cerca de 20% as velocidades. Este último facto deve-se a, durante a aplicação das argamassas, ter havido um maior aperto destas nos tijolos que na parede, pois era mais difícil a aplicação na vertical.

Esta tendência é tanto para as argamassas industriais como para as doseadas em laboratório com excepção da $D^{Aero/AE}$, onde as velocidades de propagação das ondas ultra-sónicas são maiores na parede, e as resistências são menores nesta.

As argamassas com mais percentagem de agregado de argila expandida obtiveram melhores resultados em termos de resistências que as argamassas com mais percentagem de cortiça.

As argamassas industriais foram as únicas (para além da argamassa B^{GC}) onde foi possível realizar o ensaio *Pull-off*, o que mostra que estas tem uma melhor aderência que as argamassas doseadas em laboratório produzidas, muito devido aos adições/adjuvantes que estas contêm.

As argamassas com maior percentagem de argila expandida têm melhores resultados em termos de resistência que as argamassas com maiores percentagens de cortiça, logo, conclui-se que a argila expandida confere maior resistência à argamassa. Por sua vez, as argamassas com maior percentagem de cortiça têm melhor aplicação e aderência.

5 Conclusões e desenvolvimentos futuros

5.1 Considerações finais

O trabalho realizado incidiu na avaliação experimental do desempenho mecânico e na aplicação de argamassas térmicas em tijolos e parede de alvenaria. Para avaliar este comportamento procedeu-se à aplicação destas argamassas em tijolos e na parede e depois à realização de ensaios mecânicos, em laboratório. Também se produziram provetes normalizados para realização dos ensaios mecânicos. Como tal, foram caracterizados, no estado fresco, o espalhamento e a massa volúmica aparente e no estado endurecido, resistência à compressão e à tracção por flexão, ensaio de arrancamento por tracção (*pull-off*), módulo de elasticidade dinâmico, velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, esclerómetro pendular e *Martinet Baronnie*. Deste modo, tendo em conta a pesquisa bibliográfica efetuada, o trabalho desenvolvido em laboratório e os resultados obtidos, foi possível chegar a diversas conclusões que se apresentam de seguida.

5.2 Conclusões gerais

De um modo geral, o comportamento mecânico das argamassas de desempenho térmico melhorado em estudo foi fortemente influenciado pela incorporação de agregados isolantes, bem como pela utilização de adjuvantes.

Todas as argamassas com substituição de areia por agregados isolantes térmicos podem ser classificadas como argamassas térmicas segundo a EN 998-1, já que o seu coeficiente de condutibilidade térmica é inferior a $0,20 \text{ W/m.K}$. A massa volúmica sofreu também uma redução em todas as argamassas com incorporação de agregados isolantes, passando a registar valores próximos de 700 kg/m^3 (argamassas de argila C^{AE} e argila/cortiça $F^{AE/GC}$) e entre cerca de 400 e 650 kg/m^3 (argamassas com aerogel e industriais). Por comparação, a argamassa de controlo com areia, com adjuvantes, registou condutibilidade térmica de $1,44 \text{ W/m.K}$ e massa volúmica de 1690 kg/m^3 . Segundo a norma EN 998-1, foi possível verificar que as argamassas térmicas analisadas são classificadas como leves, pois têm uma massa volúmica inferior a 1300 kg/m^3 .

Ainda segundo a norma EN 998-1, as argamassas térmicas classificam-se como CS I e CS II, ou seja, as suas resistências à compressão estão compreendidas entre os $0,4$ e 5 MPa . Neste estudo as argamassas com substituição de areia por agregados isolantes térmicos obtiveram resistências entre $0,6$ e $2,4 \text{ MPa}$, nas argamassas ensaiadas em provetes normalizados, e entre $0,8$ e $2,9 \text{ MPa}$, nas amostras retiradas dos protótipos de parede. Assim, verifica-se que o comportamento mecânico é fortemente afectado pela incorporação de quantidades significativas de agregados isolantes, visto a argamassa de controlo ter obtido $6,6 \text{ MPa}$ e $5,5 \text{ MPa}$, nos provetes normalizados e amostras de parede, respectivamente. No entanto o efeito dos introdutores de ar utilizados na composição das argamassas não é desprezável, uma vez que introduzem vazios na mistura e diminuem a sua resistência. Também

se verificou que não existe significativa diferença entre os resultados obtidos em ambos os suportes, tendo algumas argamassas diminuído a resistência com a aplicação na parede e outras aumentado, mas sem diferenças significativas.

Em relação à resistência à tracção por flexão, segundo a recomendação de LNEC, esta deveria rondar os 2,5 MPa (+/- 1 MPa). A argamassas de controlo teve uma resistência de 2,26 MPa, o que foi muito superior ao obtido pelas argamassas térmicas, que variaram entre os 0,36 MPa e os 0,99 MPa. Conclui-se que a introdução de agregados isolantes diminui significativamente a resistência interna da argamassa.

Em termos da resistência superficial das argamassas, também existe uma diminuição significativa em relação à argamassa de controlo. O índice esclerométrico desta argamassa aplicada em protótipo de parede, teve um valor de 117,3, o que é bastante superior aos índices obtidos para as argamassas térmicas, que variam entre os 77,1 e os 100,2. A argamassa industrial com cortiça I^{GC} teve um valor mais próximo do índice da argamassa de controlo, este facto deve-se a esta argamassa ser de acabamento. Comparando as argamassas aplicadas em tijolo e nos protótipos de parede, verifica-se que o índice esclerométrico aumenta quando aplicadas na parede, com excepção da argamassa de aerogel e argila expandida D^{Aero/AE}, em que a diferença não é muito relevante. Este facto pode dever-se aos tijolos não estarem fixos, mesmo encostados a uma parede. Também se esperam índices mais elevados na parede pois a rigidez da parede também contribui, este facto verifica-se mais nas argamassas menos compactas.

Em relação ao diâmetro da mocha de *Martinet Baronnie* efectuada nas argamassas aplicadas nos protótipos de parede, a argamassa de controlo teve um valor de 0,5 cm, enquanto as restantes argamassas variam entre 1,2 e os 2,5 cm. Ao contrário do índice esclerométrico, quanto maior for a mocha provocada pelo equipamento de *Martinet Baronnie*, menor é a resistência superficial. Comparando os dois tipos de aplicação (parede e tijolo), pode-se observar que as argamassas aplicadas em tijolo obtiveram um maior diâmetro da mocha de impacto, com excepção da argamassa com aerogel D^{Aero/AE}. Isto traduz numa menor resistência superficial nas argamassas aplicadas em tijolo, este fenómeno pode dever-se as condições de ensaio, como por exemplo, o tijolo não estar fixo e o efeito de sucção do tijolo.

Assim após a análise dos dois ensaios de resistência superficial, conclui-se que a incorporação de agregados isolantes traduz-se numa diminuição desta resistência, muito devido à natureza destes agregados ser frágil. Mas a aplicação na parede, em comparação com o tijolo, aumenta a resistência, muito devido à rigidez da parede ser superior à do tijolo, pois a parede encontra-se fixa.

A velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas sofreu também uma redução em relação à argamassa de controlo, independentemente do suporte onde foram ensaiadas as argamassas. Pelo método directo as argamassas com incorporação de agregados isolantes tiveram velocidades de propagação de os 1000 m/s a 2500 m/s, enquanto a argamassa de controlo obteve aproximadamente 3000 m/s . Pelo método indirecto e com o método das médias, as velocidades de propagação variam

entre 1700 e os 2900 m/s e 1400 e os 2500 m/s, nas argamassas aplicadas em tijolo e em protótipos de parede, respectivamente. Em relação à argamassa de controlo uma maior diferença nas argamassas aplicadas em tijolo (3700 m/s) do que nas aplicadas na parede (2600 m/s). Estes valores, associados às massas volúmicas reduzidas das argamassas térmicas, demonstram a influência da baridade dos agregados isolantes e da incorporação dos introdutores de ar utilizados, que fazem aumentar os vazios na sua composição. Também se verifica que a aplicação destas argamassas faz com que a velocidade aumente comparativamente com os ensaios realizados nos provetes normalizados. A redução das velocidades de propagação das ondas ultra-sónicas nas argamassas aplicadas nos protótipos de parede, comparativamente com as argamassas aplicadas em tijolo, pode dever-se à perda de alguma compacidade, como era de esperar, e à presença de micro-fissuras. Esta perda de compacidade, deve-se ao facto de na aplicação na vertical implica uma maior força pela parte da pessoa que esta a aplicar a argamassa, isto faz com que o aperto seja inferior ao feito nas argamassas aplicadas em tijolo.

Em relação à tensão de aderência, como não foi possível efectuar o ensaio na parede na maioria das argamassas, destaca-se que as argamassas industriais obtiveram valores entre 0,08 e 0,29 MPa. Nos tijolos já foi possível fazer uma comparação com a argamassas de controlo, que teve uma tensão de rotura de 0,24 MPa, tendo as argamassas térmicas doseadas em laboratório valores entre 0,05 e 0,2 MPa e as argamassas industriais entre os 0,14 e os 0,30 MPa. Assim, verifica-se um melhor comportamento das argamassas industriais, o que significa que estas contêm adjuvantes para ajudar à sua aderência. Ainda foi possível verificar que as argamassas térmicas que contêm cortiça são as que têm melhores resultados em termos de valor de tensão de rotura e em termos de tipologia, independentemente do suporte. Também se conclui que as argamassas aplicadas em parede perdem aderência, com excepção da I^{GC} (industrial de cortiça). Isto pode dever-se ao tipo de aplicação, das características da própria argamassa e da verticalidade do suporte.

Tendo em conta todos os ensaios, é de notar que as argamassas com incorporação de argila expandida têm melhores resultados em termos de resistência. As com incorporação de cortiça mostraram resultados menos bons de resistências, mas uma melhor aplicação na parede de alvenaria.

A argamassa com aerogel e argila expandida D^{Aero/AE} apresentou valores de resistência aceitáveis, mas conclui-se que estes resultados foram influenciados pela presença de argila expandida na mistura da argamassa. A sua aplicação na parede foi bastante boa, tendo sido uma das melhores em termos de trabalhabilidade, mas após a sua aplicação surgiram fissuras por retracção, devido à maior quantidade de água que é necessária acrescentar a esta argamassa, devido ao aerogel e aos tensioactivos.

Em suma, e tendo em conta o objectivo da verificação das características mecânicas e a melhoria térmica das argamassas, é possível observar, que com a introdução destes agregados isolantes, o desempenho mecânico das argamassas é alterado e afectado significativamente. Em relação à comparação das aplicações das argamassas, pode-se concluir que ao aplicar as argamassas em protótipos de parede aumenta-se o índice esclerométrico, diminui-se a moessa provocada pelo equipamento de *Martinet Baronnie* e diminui-se a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas,

em relação à aplicação no tijolo. O que se traduz num aumento da dureza e resistência superficial e num aumento de vazios ou fissuração interna. Estes factos não foram verificados na argamassa que contém aerogel, na qual houve um aumento da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, na massa provocada pelo equipamento de *Martinet Baronnie* e não houve alterações no índice esclerométrico.

Assim, as argamassas industriais mostraram um melhor comportamento mecânico que as argamassas doseadas em laboratório, mostrando assim a importância dos aditivos nas argamassas e uma boa formulação destas. No geral, a aplicação das argamassas industriais foi melhor, tal como os resultados obtidos nos ensaios, independentemente do tipo de suporte.

Em conclusão, verificou-se que as argamassas térmicas podem vir a constituir uma solução de isolamento térmico, através de uma escolha cuidadosa da mistura dos agregados e dos adjuvantes que as constituem. Através desta dissertação foi possível observar uma tendência para uma melhoria do comportamento mecânico em argamassas com argila expandida. No entanto, o comportamento mecânico de argamassas com agregados isolantes térmicos é um tema complexo e dependente de muitos factores, pelo que são necessários mais estudos para avaliar a influência destes agregados no desempenho destas argamassas.

5.3 Propostas para desenvolvimento futuros

Considerando os resultados obtidos considera-se vantajoso aprofundar o conhecimento de outros aspectos inerentes a este trabalho, em particular:

- fazer um estudo mais aprofundado da formulação das argamassas tendo em conta a aplicação destas;
- estudar as características mecânicas nas argamassas aplicadas em paredes de alvenaria, em ambiente natural, com exposição solar, ou seja, nas condições de utilização;
- produzir argamassas térmicas doseadas em laboratório com ligantes diferentes do cimento (como por exemplo a cal), com agregados isolantes e com adições e adjuvantes;
- avaliação da influência das dimensões e da curva granulométrica dos agregados isolantes no comportamento mecânico das argamassas térmicas, aplicadas em protótipos de parede;
- fazer ensaios em parede com mais formulações com o agregado de Aerogel, pois este tem muitas potencialidades;
- estudar estas argamassas com outros tipos de adjuvantes, que melhorem a aderência e a aplicabilidade.

Referências bibliográficas

Abdou A.; Budaiwi I. (2013) – “The variation of thermal conductivity of fibrous insulation materials under different levels of moisture content”, *Construction and Building Materials* 43, pp. 533-544.

Almeida, J. L. (2010) – “Argamassas doseadas em laboratório e industriais de alvenaria em edifícios”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, Fevereiro, pp. 27–28.

Arromba, J. M. (2011) – “Influência do suporte no desempenho de rebocos aplicados em suportes de tijolo e betão recorrendo a técnicas de ensaio in-situ”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Novembro.

Bangi, U., Rao, A. V., Rao A. P. (2008) – “A new route for preparation of sodium-silicate-based hydrophobic silica aerogels via ambient-pressure drying”. Air Glass Laboratory, Department of Physics, Shivaji University, Índia, Setembro.

Barroca, P. (2013) – “Comportamento reológico e mecânico de argamassas com agregados leves”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Engenharia da Beira Interior, Covilhã, Junho.

Carasek, H. (1997) – “Factores que exercem influência na resistência de aderência de argamassas” In: II STBA – Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Salvador, 17-18 de Abril.

Carneiro, A., Cincotto, M. (1995) – “Requisitos e Critérios de Desempenho para Revestimento de Camada Única em Argamassa de Cimento e Cal”. I STBA – Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Goiânia.

Carrajola, R.; Soares, A.; Flores-Colen, I.; Brito, J. (2015) – “Task 4 – Performance characterization of nanoaerogel-based renders – Binders and aggregates’ influence on the mortar mixes in the fresh state”. Instituto Superior Técnico. Lisboa.

Coutinho, A. S. (1973) – “Fabrico e propriedades do betão”. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol 1, 1973.

Cruz, N. T. (2008). “Estudo da Influência da Granulometria das Areias no Desempenho de Rebocos de Ligante Hidráulico”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Faria, P. (2012) – “Argamassas Sustentáveis”, 2ª Conferência de Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, pp 1-9..

Faria P.; Silva V.; Flores Colen I. (2012) – “Argamassas de cal hidráulica e pozolanas artificiais: avaliação laboratorial”, 4º Congresso de Argamassas de Construção, APFAC, Coimbra, Março.

- Flores-Colen, I. (2009) – “Metodologia de avaliação do desempenho em serviço de fachadas rebocadas na óptica da manutenção predictiva”. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Flores-Colen, I. (2014) – “A nanotecnologia nas argamassas de construção”. Workshop: A Nanotecnologia nos Materiais de Construção, Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos, IST/UL, Lisboa, Fevereiro.
- Flores-Colen, I., Brito, J. de, Freitas, V. de (2009) – “Expected render performance assessment based on impact resistance *in situ* determination” Construction and Building Materials.
- Flores-Colen, I., Brito, J. de, Freitas, V. de (2010) – “Ensaio *in situ* e em laboratório para caracterização do desempenho em serviço de rebocos pré-doseados aplicados em fachadas de edifícios correntes”. 3º Congresso Português de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa, Março.
- Flores-Colen, I., Brito, J. (2012) – “Ciência e engenharia de materiais de construção – Rebocos”. Editora IST Press, 1ª Edição, Novembro.
- Ferreira, A. S., Brito, J. de, Branco, F. (2007) – “Desempenho relativo de argila expandida na execução de camadas de forma”. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa, Novembro.
- Frade, D., Tadeu, A., Torres, I., Mendes, P., Simões, N., Matias, G., Neves, A. (2012) – “Argamassas industriais com incorporação de granulado de cortiça expandida”. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Coimbra
- Galvão, J. (2009) – “Técnicas de ensaio in-situ para avaliação do comportamento mecânico de rebocos em fachadas - Esclerómetro e ultra-sons”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Novembro.
- Gao, T., Jelle, B., Gustavsen, A., Jacobsen, S. (2014) – “Aerogel-incorporated concrete: An experimental study” Construction and Building Materials 52,130–136.
- Gaspar, P; Flores Colen, I.; Brito, J. (2007) – “Técnicas de diagnóstico e classificação de anomalias por perda de aderência em rebocos”. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa, Novembro, CD-Rom.
- Gil, L. (1998) – “Cortiça – Produção, Tecnologia e Aplicação”, Editora INETI, Lisboa.
- Gil, L. (2012) – “Ciência e engenharia de materiais de construção – Cortiça”. Editora IST Press, 1ª Edição, Novembro.
- Gomes, A. M. (1995a) – “Caracterização de argamassas doseadas em laboratório utilizadas nos revestimentos exteriores dos edifícios”. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Gomes, A. M. (1995b) – “Metodologia para diagnóstico dos rebocos exteriores dos edifícios à base de ligantes hidráulicos através de ensaios *in situ*”. In: I STBA - Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Goiânia, 16-17 de Agosto, pp. 305-314.

Gonçalves, A. (2010) – “Estudo da influência dos factores de aplicação no desempenho de argamassas de revestimento recorrendo a técnicas de ensaio *in-situ*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Outubro.

Gonçalves, M. (2012) – “Ciência e engenharia de materiais de construção – Nanomateriais”. Editora IST Press, 1ª Edição, Novembro.

Gonçalves, P. J., Frade, D. F., Brites, J. (2012) – “Argamassas Térmicas – uma solução no cumprimento do RCCTE “ In: 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS sob a Égide da Inovação, APFAC, Coimbra.

IEA (International Energy Agency) (2015) – “Energy Technology Perspectives 2015 – Mobilising Innovation to Accelerate Climate Action” Executive summary

Júlio, M. F.; Ilharco, L.; Gaspar Martinho, J.; Farinha, J. P.; Flores-Colen, I. (2013) – “NANORENDER – Performance of sílica nanoaerogel-based renders – Synthesis of nanoaerogel to use as aggregate in mortar mixes”. Lisboa. Instituto Superior Técnico.

Labrincha J.; Samagaio A.; Vicente R. (2006) – “Associação para o desenvolvimento da casa do futuro - sub projecto de isolamento térmico”, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Lazera, R.; Santos, A. R.; Flores-Colen, I.; Gomes, M. G.; Moret Rodrigues, A. (2016) – “Estudo experimental do desempenho mecânico e físico de argamassas térmicas”. Artigo científico para Rehabend 2016, Burgos. Instituto Superior Técnico. Lisboa.

Leal, M. (2012) – “Desenvolvimento de argamassas de revestimento com comportamento térmico melhorado”. Dissertação de mestrado, IPS, Setúbal.

Low K.; Soon-Ching Ng. (2010) – “Thermal conductivity of newspaper sandwiched aerated lightweight concret panel”, Energy and Buildings 42.

Maciel, L. L., Barros, M., Sabbatini, F. H. (1998) – “Recomendações para execução de revestimentos de argamassa para paredes de vedação internas e exteriores e tetos”. Artigo científico, São Paulo.

Magalhães, A. C.; Costa, Dória; Veiga, M. R. (2003) – “Diagnóstico de anomalias de revestimentos de paredes com técnicas de ensaio in situ. Avaliação da resistência mecânica”. 3º ENCORE – Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pp. 419-427.

Mehta, P. K., Monteiro, P. (1994) “Concreto - Estrutura, Propriedades e Materiais”. Editora PINI, 1ª Edição, S. Paulo, Brasil.

Mendes, P. F. (2012) – “Isolamentos Térmicos em Edifícios e seu Contributo para a Eficiência Energética”. Trabalho apresentado à Universidade Fernando Pessoa como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Porto.

Moravia, W. G., Oliveira, C., Gumieri, A., Vasconcelos, W. L. (2006) – “Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve”. Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais.

- Moret Rodrigues A.; Canha Piedade A.; Braga A. (2009) – “Térmica de edifícios”. 1a Edição, Edições Orion, Março.
- Nepomuceno, M. (1999) – “Ensaio não-destrutivo em betão. Provas de aptidão pedagógica e capacidade científica”. Trabalho de síntese, Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- Pereira, P.; Carasek, H.; Francinete Jr, P. (2005) - "Influência da cura no desempenho de revestimentos com argamassas inorgânicas". VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Florianópolis.
- Pinto, A.; Gomes, A.; Pinto, J. (2013) – “Argamassas”. Documento de apoio à disciplina de Materiais de Construção II, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Rodrigues, M. (2010) – “Caracterização de materiais e sistemas construtivos através de ensaios laboratoriais e *in situ*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de engenharia Universidade do Porto, Porto, Agosto.
- Saleh A. (2006) – “Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique”, Applied Thermal Engineering 26.
- Santos, L. (2012a) – “Análise *in situ* do comportamento mecânico de argamassas de revestimento de fachadas”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Julho, pp. 44.
- Santos, P. (2012b) – “Paredes duplas de elevada produtividade de construção.” Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Silva. T. (2014) – “Comportamento Mecânico de Argamassas de Reboco com Regranulado Negro de Cortiça”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Julho.
- Silva, V. (2004) – “Manual de inspeções e ensaios na reabilitação de edifícios”. Lisboa: IST Press.
- Sousa, A. (2010) – “Aplicação de argamassas leves de reboco e assentamento em alvenarias”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, Março.
- Vale, H. (2014) – “Caracterização experimental do comportamento mecânico de argamassas de desempenho térmico melhorado”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Fevereiro.
- Varela, N., Vieira, F.S. (2005) – “Cimento: Uma Matéria-prima Essencial no Fabrico de Argamassas”. 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa,.
- Veiga, M. R. (1998) – “Comportamento de argamassas de revestimento de paredes - contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação”. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Veiga, M. R. (2010) – “Contribuição das argamassas e dos ETICS para a eficiência energética dos edifícios”. Seminário TEKTÓNICA 2010, LNEC , Lisboa.

Veiga, M. R., Malanho, S. (2012) – “ETICS e argamassas térmicas: novos desafios de desempenho e sustentabilidade”, Seminário TEKTÓNICA 2012 , LNEC, Lisboa

Documentos normativos:

DE (2010) – “Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings, 2010”.

ISO 6241 (1989) – “ Performance standards in building – Principles for their preparation and factors to be considered”. International Organization for Standardization, Technical Committee ISO/TC 59, Dezembro.

LNEC (2005) –“Regras para a concessão de documentos de aplicação a revestimentos pré- doseados de ligante mineral com base em cimento para paredes”. Relatório 427/05-NRI, Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

LNEC (2006) – “Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios – ITE 50”. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

REH – “Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH)”, Decreto-Lei 118/2013 de 20 Agosto, Portaria no 349-B/2013 de 29 Novembro.

RCCTE (2006) – “Regulamento das Características do Comportamento Térmico de Edifícios, Decreto-Lei no. 80/2006 de 4 Abril.

CEN (2003) – "Specification for mortar for masonry. Part 1: Rendering and plastering mortar". EN 998-1. Brussels: Comité Européen de Normalisation.

CEN (1998) – "Methods of test for mortar masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars". EN 1015-2. Brussels: Comité Européen de Normalisation.

CEN (1999) – "European Standard. Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)". EN 1015-3. Brussels: Comité Européen de Normalisation.

CEN (1998) – "Methods of test for mortar for masonry – Part 6: Determination of bulk density of fresh". EN 1015-6. Brussels: Comité Européen de Normalisation.

CEN (1999) – " Methods of test for mortar for masonry - Part 9: Determination of workable life and correction time of fresh mortar ". EN 1015-9. Brussels: Comité Européen de Normalisation.

CEN (1999) – " Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strenght of hardened mortar ". EN 1015-11. Brussels: Comité Européen de Normalisation.

CEN (2000) – “Methods of test for mortar for masonry - Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates”. EN 1015-12. Brussels: Comité Européen de Normalisation.

CEN (2002) – " Methods of test for mortar for masonry - Part 21: Determination of the comparability of one-coat rendering mortars ". EN 1015-21. Brussels: Comité Européen de Normalisation.

CEN (2004) – “Testing concrete - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity”. EN 12504-4. Brussels: Comité Européen de Normalisation.

IPQ (2011b) – “Cal de Construção – Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade”. NP EN 459-1, Caparica.

Referências webgráficas:

[W1] – <http://www.desprepavaje.ro/wp-content/uploads/2013/02/ciment2.jpg> (consultado 24-01-2016)

[W3] – <http://argex.pt/granulometrias.html> (consultado em 25-01-2016)

[W4] – <http://www.apfac.pt/argamassas-de-construcao/> (consultado em 2016)

Anexos

Anexo A.3.1 – Características mecânicas das argamassas industriais

Tabela A.3.1 Características mecânicas das argamassas industriais produzidas

| Argamassas industriais | Ligante | Agregado isolante | Massa volúmica (Kg/m^3) | Rc (MPa) | Rt (MPa) | Aderência ao suporte (MPa) | Ed (MPa) |
|------------------------|--|-------------------|-----------------------------|-----------|----------|--|----------|
| G ^{EPS} | Cal / Cimento branco e ligantes sintéticos | EPS | 250 ± 50 | 0,4 a 2,5 | - | 0,1 (rotura coesiva no revestimento) | 500 |
| H ^{ECT} | Cal hidráulica NHL 3.5 | Cortiça | 360 ± 20 | 1,5 | - | 0,1 (rotura coesiva no revestimento) | 742 |
| I ^{EC} | Cimento Portland | Cortiça | 900 ± 50 | 1,5 a 5 | 1,6 | 0,3 (rotura adesiva e coesiva do suporte) | 1000 |

Legenda: Rc - Resistência à compressão; Rt – Resistência à tracção por flexão; Ed – Modulo de elasticidade dinâmico.

Anexo A.3.2 – Esquema da disposição dos ensaios nos protótipos de parede

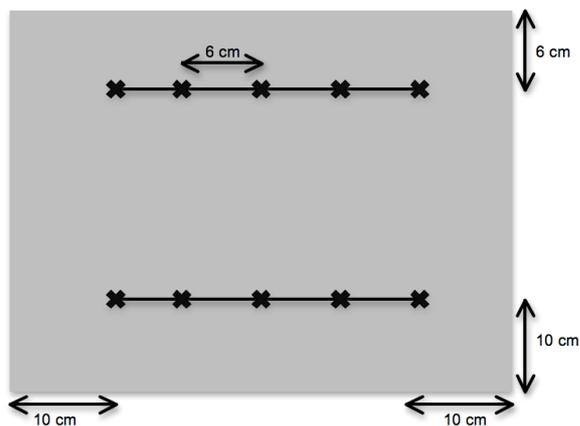


Figura A.3.2.1 Disposição ensaio velocidade ultra-sónica

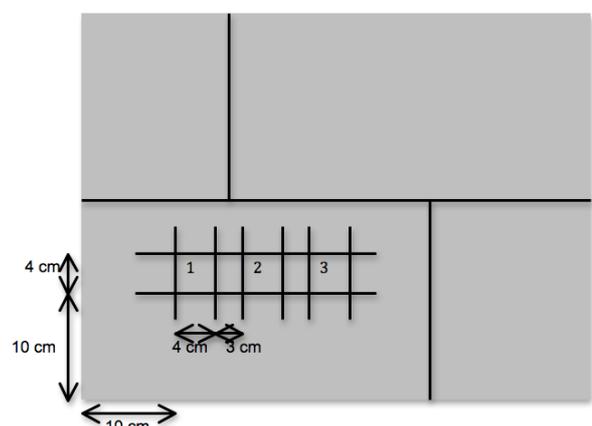
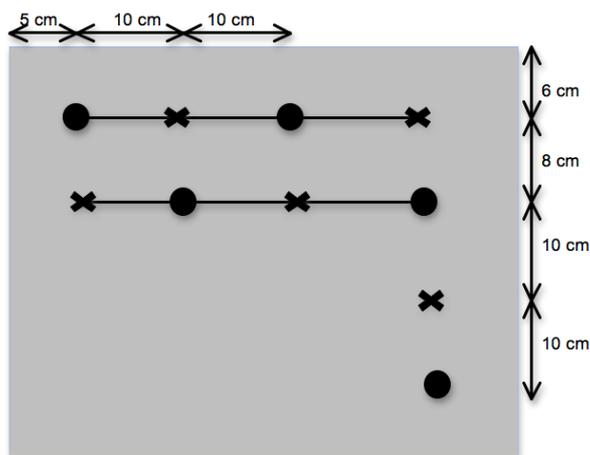


Figura A.3.2.2 Disposição dos cortes para ensaio *Pull-Off*



Legenda: o – esclerômetro; x – Martinet Baronnie

Figura A.3.2.3 Disposição das medições do ensaio de esclerômetro e *Martinet Baronnie*

Anexo A.4.1 – Massa volúmica aparente no estado fresco, resultados individuais

Tabela A.4.1.1 Resultados de massa volúmica aparente individuais das argamassas industriais, no estado fresco

| Argamassa | Modelo | Massa Volúmica (kg/m ³) | Média (kg/m ³) | Desvio padrão (kg/m ³) | CV (%) | |
|-------------|-------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|--------|------|
| Industriais | G ^{EPS} | Tijolo | 545,4 | 476,6 | 80,5 | 0,17 |
| | | Provete | 361,1 | | | |
| | | Parede | 488,2 | | | |
| | | | 511,8 | | | |
| | H ^{GC/T} | Tijolo | 704,0 | 675,7 | 72,4 | 0,11 |
| | | Provete | 551,1 | | | |
| | | Parede | 715,0 | | | |
| | | | 677,3 | | | |
| | I ^{GC} | Tijolo | 748,1 | 778,3 | 41,9 | 0,05 |
| | | Provete | 767,2 | | | |
| | | Parede | 792,9 | | | |
| | | | 739,4 | | | |
| | | 843,7 | | | | |

Legenda: CV – Coeficiente de Variação

Tabela A.4.1.2 Resultados de massa volúmica aparente individuais das argamassas doseadas em laboratório, no estado fresco

| Argamassa | Modelo | Massa Volúmica (kg/m ³) | Média (kg/m ³) | Desvio padrão (kg/m ³) | CV (%) | |
|--------------------------------|----------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|--------|------|
| Doseadas em laboratório | A ^{con} | Tijolo | 1919,8 | 1885,7 | 60,0 | 0,03 |
| | | Provete | 1855,2 | | | |
| | | Parede | 1951,8 | | | |
| | | | 1781,1 | | | |
| | | | 1901,0 | | | |
| | | | 1905,4 | | | |
| | B ^{GC} | Tijolo | 552,9 | 560,4 | 63,9 | 0,11 |
| | | Provete | 514,0 | | | |
| | | Parede | 636,0 | | | |
| | | | 641,4 | | | |
| | | | 490,7 | | | |
| | | | 527,6 | | | |
| | C ^{AE} | Tijolo | 777,4 | 787,8 | 24,5 | 0,03 |
| | | Provete | 799,7 | | | |
| | | Parede | 814,9 | | | |
| | | | 759,3 | | | |
| | D ^{Aero/AE} | Tijolo | 874,8 | 818,8 | 48,9 | 0,06 |
| | | Provete | 800,2 | | | |
| | | Parede | 838,7 | | | |
| | | | 761,4 | | | |
| | E ^{GC/AE} | Tijolo | 603,7 | 651,6 | 39,0 | 0,06 |
| | | Provete | 708,0 | | | |
| | | Parede | 668,0 | | | |
| | | | 642,9 | | | |
| F ^{AE/GC} | Tijolo | 686,0 | 704,6 | 46,2 | 0,07 | |
| | Provete | 785,5 | | | | |
| | Parede | 695,9 | | | | |
| | | 670,4 | | | | |
| | | 685,0 | | | | |

Legenda: CV – Coeficiente de Variação

Anexo A.4.2 – Consistência por espalhamento, resultados individuais

Tabela A.4.2.1 Média do diâmetro dos ensaios de espalhamento por produção de argamassa industrial

| Argamassa | Modelo | Espalhamento (mm) | Média (mm) | Desvio padrão (mm) | CV (%) | |
|--------------------|-------------------|-------------------|------------|--------------------|--------|------|
| Industriais | G ^{EPS} | Tijolo | 133,4 | 135,6 | 7,9 | 0,06 |
| | | Provete | 147,0 | | | |
| | | Parede | 128,5 | | | |
| | | | 133,6 | | | |
| | H ^{GC/T} | Tijolo | 126,6 | 123,6 | 5,1 | 0,04 |
| | | Provete | 121,1 | | | |
| | | Parede | 119,4 | | | |
| | | | 130,6 | | | |
| | | | 120,4 | | | |
| | I ^{GC} | Tijolo | 134,8 | 142,3 | 10,6 | 0,07 |
| | | Provete | 154,7 | | | |
| | | Parede | 132,1 | | | |
| | | | 147,0 | | | |
| | | | 143,0 | | | |

Legenda: CV – Coeficiente de variação

Tabela A.4.2.2 Media do diâmetro dos ensaios de espalhamento por produção de argamassa doseada em laboratório

| Argamassa | Modelo | Espalhamento (mm) | Média (mm) | Desvio padrão (mm) | CV (%) | |
|-------------------------|----------------------|-------------------|------------|--------------------|--------|------|
| Doseadas em laboratório | A ^{con} | Tijolo | 131,3 | 147,9 | 20,3 | 0,14 |
| | | Provete | 178,1 | | | |
| | | Parede | 123,3 | | | |
| | | | 163,8 | | | |
| | | | 147,1 | | | |
| | | | 144,0 | | | |
| | B ^{GC} | Tijolo | 134,0 | 139,0 | 9,8 | 0,07 |
| | | Provete | 151,9 | | | |
| | | Parede | 137,7 | | | |
| | | | 143,5 | | | |
| | | | 143,6 | | | |
| | | | 123,2 | | | |
| | C ^{AE} | Tijolo | 144,6 | 144,1 | 16,2 | 0,11 |
| | | Provete | 160,2 | | | |
| | | Parede | 121,9 | | | |
| | | | 149,9 | | | |
| | D ^{Aero/AE} | Tijolo | 187,3 | 189,1 | 20,8 | 0,11 |
| | | Provete | 161,7 | | | |
| | | Parede | 196,2 | | | |
| | | | 211,2 | | | |
| | E ^{GC/AE} | Tijolo | 143,5 | 139,6 | 15,9 | 0,11 |
| Provete | | 151,8 | | | | |
| Parede | | 119,8 | | | | |
| | | 154,7 | | | | |
| | | 128,4 | | | | |
| F ^{AE/GC} | Tijolo | 140,0 | 138,2 | 11,2 | 0,08 | |
| | Provete | 129,2 | | | | |
| | Parede | 133,4 | | | | |
| | | 154,8 | | | | |
| | | 133,5 | | | | |

Legenda: CV – Coeficiente de variação

Anexo A.4.3 – Massa volúmica aparente no estado endurecido, resultados individuais

Tabela A.4.3.1 Resultados de massa volúmica aparente individuais das argamassas doseadas em laboratório, no estado endurecido

| Provete | A ^{con} | | | | | | B ^{GC} | | | | | |
|---------|--------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|--------|----------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|--------|
| | Massa (g) | Volume (m ³) | Mv (kg/m ³) | Média (kg/m ³) | DP (kg/m ³) | CV (%) | Massa (g) | Volume (m ³) | Mv (kg/m ³) | Média (kg/m ³) | DP (kg/m ³) | CV (%) |
| 1 | 450,7 | 0,00027 | 1675,68 | 1690,25 | 23,0 | 1,3 | 113,3 | 0,00025 | 454,01 | 443,12 | 12,8 | 2,9 |
| 2 | 450,5 | 0,00026 | 1716,77 | | | | 107,1 | 0,00025 | 429,05 | | | |
| 3 | 440,39 | 0,00026 | 1678,32 | | | | 111,4 | 0,00025 | 446,31 | | | |
| Provete | C ^{AE} | | | | | | D ^{Aero/AE} | | | | | |
| | Massa (g) | Volume (m ³) | Mv (kg/m ³) | Média (kg/m ³) | DP (kg/m ³) | CV (%) | Massa (g) | Volume (m ³) | Mv (kg/m ³) | Média (kg/m ³) | DP (kg/m ³) | CV (%) |
| 1 | 187,7 | 0,00026 | 733,20 | 721,81 | 20,3 | 2,8 | 164,4 | 0,00025 | 658,85 | 651,62 | 13,9 | 2,1 |
| 2 | 183,2 | 0,00026 | 698,32 | | | | 162,7 | 0,00026 | 635,55 | | | |
| 3 | 192,6 | 0,00026 | 733,92 | | | | 169,1 | 0,00026 | 660,47 | | | |
| Provete | E ^{GC/AE} | | | | | | F ^{AE/GC} | | | | | |
| | Massa (g) | Volume (m ³) | Mv (kg/m ³) | Média (kg/m ³) | DP (kg/m ³) | CV (%) | Massa (g) | Volume (m ³) | Mv (kg/m ³) | Média (kg/m ³) | DP (kg/m ³) | CV (%) |
| 1 | 155,9 | 0,00026 | 609,06 | 622,84 | 14,9 | 2,4 | 171,9 | 0,00026 | 671,76 | 693,14 | 24,5 | 3,5 |
| 2 | 159,4 | 0,00025 | 638,78 | | | | 176,1 | 0,00026 | 687,77 | | | |
| 3 | 158,9 | 0,00026 | 620,66 | | | | 184,3 | 0,00026 | 719,88 | | | |

Legenda: Mv – Massa volúmica aparente; DP – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação

Tabela A.4.3.2 Resultados de massa volúmica aparente individuais das argamassas industriais, no estado endurecido

| Provete | G ^{EPS} | | | | | | H ^{GC/T} | | | | | |
|---------|------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|--------|-------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|--------|
| | Massa (g) | Volume (m ³) | Mv (kg/m ³) | Média (kg/m ³) | DP (kg/m ³) | CV (%) | Massa (g) | Volume (m ³) | Mv (kg/m ³) | Média (kg/m ³) | DP (kg/m ³) | CV (%) |
| 1 | 101,63 | 0,00026 | 387,31 | 387,40 | 2,6 | 0,7 | 135,40 | 0,00024 | 571,02 | 563,92 | 7,5 | 1,3 |
| 2 | 100,98 | 0,00026 | 384,83 | | | | 138,78 | 0,00025 | 556,01 | | | |
| 3 | 102,35 | 0,00026 | 390,05 | | | | 140,96 | 0,00025 | 564,74 | | | |
| Provete | I ^{GC} | | | | | | | | | | | |
| | Massa (g) | Volume (m ³) | Mv (kg/m ³) | Média (kg/m ³) | DP (kg/m ³) | CV (%) | | | | | | |
| 1 | 157,88 | 0,00024 | 666,72 | 668,89 | 5,0 | 0,7 | | | | | | |
| 2 | 159,75 | 0,00024 | 674,62 | | | | | | | | | |
| 3 | 161,81 | 0,00024 | 665,34 | | | | | | | | | |

Legenda: Mv – Massa volúmica aparente; DP – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação

Anexo A.4.4 – Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, resultados individuais (método directo)

Tabela A.4.4.1 Resultados individuais da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas nos provetes normalizados

| Provetes | 1 | | | 2 | | | 3 | | | V Média (m/s) | DP (m/s) | CV (%) |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------|----------|--------|
| | V1 (m/s) | V2 (m/s) | V3 (m/s) | V1 (m/s) | V2 (m/s) | V3 (m/s) | V1 (m/s) | V2 (m/s) | V3 (m/s) | | | |
| A ^{con} | 2888 | 2852 | 2925 | 3008 | 2941 | 2980 | 2968 | 2968 | 2941 | 2941 | 48,0 | 0,02 |
| B ^{GC} | 1184 | 1189 | 1195 | 1189 | 1204 | 1202 | 1171 | 1167 | 1166 | 1185 | 14,4 | 0,01 |
| C ^{AE} | 2273 | 2273 | 2282 | 2232 | 2225 | 2219 | 2289 | 2305 | 2299 | 2266 | 32,7 | 0,01 |
| D ^{Aero/AE} | 1631 | 1634 | 1634 | 1559 | 1559 | 1555 | 1573 | 1570 | 1563 | 1586 | 35,4 | 0,02 |
| E ^{GC/AE} | 1745 | 1735 | 1732 | 1776 | 1790 | 1770 | 1756 | 1770 | 1770 | 1760 | 19,7 | 0,01 |
| F ^{AE/GC} | 2003 | 2003 | 2008 | 2020 | 2015 | 2015 | 2075 | 2073 | 2075 | 2032 | 32,3 | 0,02 |
| G ^{EPS} | 1354 | 1359 | 1355 | 1402 | 1402 | 1395 | 1456 | 1460 | 1456 | 1404 | 44,1 | 0,03 |
| H ^{GC/T} | 1286 | 1283 | 1226 | 1239 | 1225 | 1227 | 1307 | 1313 | 1286 | 1266 | 36,2 | 0,03 |
| I ^{GC} | 1323 | 1326 | 1329 | 1343 | 1346 | 1346 | 1320 | 1317 | 1320 | 1330 | 11,8 | 0,01 |

Legenda: V1, V2 e V3 – Velocidade de propagação da onda ultra-sónica no provete; DP – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação.

Anexo A.4.5 – Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, resultados individuais (método indirecto – cálculo das médias)

Tabela A.4.5.1 Resultados individuais do tempo de transição e da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas nos tijolos, nas argamassas doseadas em laboratório

| Argamassa | A ^{con} | | | | | B ^{GC} | | | | |
|----------------|--------------------|---------|---------------|---------------|----------|----------------------|---------|---------------|---------------|----------|
| | Distancia (mm) | T (µs) | V (m/s) | V Média (m/s) | DP (m/s) | CV (%) | T (µs) | V (m/s) | V Média (m/s) | DP (m/s) |
| 60 | 14,4 | 4166,7 | 3688,6 | 294,9 | 8,0 | 12,9 | 4651,2 | 2143,5 | 1211,0 | 56,5 |
| 120 | 31,1 | 3858,5 | | | | 80,2 | 1496,3 | | | |
| 180 | 50,1 | 3592,8 | | | | 108,9 | 1652,9 | | | |
| 240 | 67,7 | 3545,1 | | | | 150,9 | 1590,5 | | | |
| 180 | 53,7 | 3352,0 | | | | 119,9 | 1501,3 | | | |
| 120 | 35,2 | 3409,1 | | | | 91,7 | 1308,6 | | | |
| 60 | 15,4 | 3896,1 | | | | 21,4 | 2803,7 | | | |
| Argamassa | C ^{AE} | | | | | D ^{Aero/AE} | | | | |
| Distancia (mm) | T (µs) | V (m/s) | V Média (m/s) | DP (m/s) | CV (%) | T (µs) | V (m/s) | V Média (m/s) | DP (m/s) | CV (%) |
| 60 | 19,9 | 3015,1 | 2823,8 | 629,6 | 22,3 | 12,4 | 4838,7 | 2239,8 | 1457,1 | 65,1 |
| 120 | 49,6 | 2419,4 | | | | 111,9 | 1072,4 | | | |
| 180 | 86,6 | 2078,5 | | | | 135,7 | 1326,5 | | | |
| 240 | 89,4 | 2684,6 | | | | 141,2 | 1699,7 | | | |
| 180 | 72,1 | 2496,5 | | | | 120,1 | 1498,8 | | | |
| 120 | 39,4 | 3045,7 | | | | 81,7 | 1468,8 | | | |
| 60 | 14,9 | 4026,8 | | | | 15,9 | 3773,6 | | | |
| Argamassa | E ^{GC/AE} | | | | | F ^{AE/GC} | | | | |
| Distancia (mm) | T (µs) | V (m/s) | V Média (m/s) | DP (m/s) | CV (%) | T (µs) | V (m/s) | V Média (m/s) | DP (m/s) | CV (%) |
| 60 | 11,4 | 5263,2 | 2620,5 | 1514,3 | 57,8 | 15,4 | 3896,1 | 2702,5 | 1141,7 | 41,3 |
| 120 | 65,7 | 1826,5 | | | | 52,4 | 2290,1 | | | |
| 180 | 113,4 | 1587,3 | | | | 94,1 | 1912,9 | | | |
| 240 | 137,4 | 1746,7 | | | | 113,7 | 2110,8 | | | |
| 180 | 113,7 | 1583,1 | | | | 93,2 | 1931,3 | | | |
| 120 | 59,4 | 2020,2 | | | | 50,9 | 2357,6 | | | |
| 60 | 13,9 | 4316,5 | | | | 12,4 | 4838,7 | | | |

Legenda: T – tempo de propagação da onda ultra-sónica; V – velocidade da onda ultra-sónica; V_{média} – Velocidade média da onda ultra-sónica; DP – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação.

Tabela A.4.5.2 Resultados individuais do tempo de transição e da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas nos tijolos, nas argamassas industriais

| Argamassa | G ^{EPS} | | | | | H ^{GC/T} | | | | |
|----------------|------------------|---------|--------------------------|----------|--------|-------------------|---------|--------------------------|----------|--------|
| Distancia (mm) | T (µs) | V (m/s) | V _{Média} (m/s) | DP (m/s) | CV (%) | T (µs) | V (m/s) | V _{Média} (m/s) | DP (m/s) | CV (%) |
| 60 | 18,4 | 3260,9 | 1711,8 | 697,1 | 40,7 | 18,9 | 3174,6 | 1926,5 | 619,7 | 32,2 |
| 120 | 101,9 | 1177,6 | | | | 67,2 | 1785,7 | | | |
| 180 | 123,7 | 1455,1 | | | | 115,7 | 1555,7 | | | |
| 240 | 161,4 | 1487,0 | | | | 139,7 | 1718,0 | | | |
| 180 | 122,4 | 1470,6 | | | | 119,6 | 1505,0 | | | |
| 120 | 80,9 | 1483,3 | | | | 82,9 | 1447,5 | | | |
| 60 | 36,4 | 1648,4 | | | | 26,1 | 2298,9 | | | |
| Argamassa | J ^{GC} | | | | | | | | | |
| Distancia (mm) | T (µs) | V (m/s) | V _{Média} (m/s) | DP (m/s) | CV (%) | | | | | |
| 60 | 25,6 | 2343,8 | 1994,9 | 258,5 | 13,0 | | | | | |
| 120 | 60,9 | 1970,4 | | | | | | | | |
| 180 | 104,1 | 1729,1 | | | | | | | | |
| 240 | 126,6 | 1895,7 | | | | | | | | |
| 180 | 102,2 | 1761,3 | | | | | | | | |
| 120 | 63,1 | 1901,7 | | | | | | | | |
| 60 | 25,4 | 2362,2 | | | | | | | | |

Legenda: T – tempo de propagação da onda ultra-sónica; V – velocidade da onda ultra-sónica; V_{média} – Velocidade média da onda ultra-sónica; DP – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação.

Tabela A.4.5.3 Resultados individuais do tempo de transição e da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas nos protótipos de parede, nas argamassas industriais

| Argamassa | G ^{EPS} | | | | | | | | | |
|----------------|-------------------|---------|--------------------------|----------|--------|--------|---------|--------------------------|----------|--------|
| Posição | Cima | | | | | Baixo | | | | |
| Distancia (mm) | T (µs) | V (m/s) | V _{Média} (m/s) | DP (m/s) | CV (%) | T (µs) | V (m/s) | V _{Média} (m/s) | DP (m/s) | CV (%) |
| 60 | 22,9 | 2620,1 | 1592,9 | 507,7 | 31,9 | 37,2 | 1612,9 | 1539,6 | 354,0 | 23,0 |
| 120 | 94,4 | 1271,2 | | | | 91,9 | 1305,8 | | | |
| 180 | 135,9 | 1324,5 | | | | 135,6 | 1327,4 | | | |
| 240 | 173,6 | 1382,5 | | | | 157,2 | 1526,7 | | | |
| 180 | 136,2 | 1321,6 | | | | 134,6 | 1337,3 | | | |
| 120 | 92,2 | 1301,5 | | | | 87,7 | 1368,3 | | | |
| 60 | 31,1 | 1929,3 | | | | 26,1 | 2298,9 | | | |
| Argamassa | H ^{GC/T} | | | | | | | | | |
| Posição | Cima | | | | | Baixo | | | | |
| Distancia (mm) | T (µs) | V (m/s) | V _{Média} (m/s) | DP (m/s) | CV (%) | T (µs) | V (m/s) | V _{Média} (m/s) | DP (m/s) | CV (%) |
| 60 | 26,7 | 2247,2 | 1399,3 | 383,3 | 27,4 | 29,6 | 2027,0 | 1414,6 | 396,6 | 28,0 |
| 120 | 90,6 | 1324,5 | | | | 84,1 | 1426,9 | | | |
| 180 | 143,2 | 1257,0 | | | | 210 | 857,1 | | | |
| 240 | 194,7 | 1232,7 | | | | 165,1 | 1453,7 | | | |
| 180 | 157,9 | 1140,0 | | | | 147,1 | 1223,7 | | | |
| 120 | 100,4 | 1195,2 | | | | 106,4 | 1127,8 | | | |
| 60 | 42,9 | 1398,6 | | | | 33,6 | 1785,7 | | | |
| Argamassa | J ^{GC} | | | | | | | | | |
| Posição | Cima | | | | | Baixo | | | | |
| Distancia (mm) | T (µs) | V (m/s) | V _{Média} (m/s) | DP (m/s) | CV (%) | T (µs) | V (m/s) | V _{Média} (m/s) | DP (m/s) | CV (%) |
| 60 | 17,9 | 3352,0 | 2207,0 | 581,9 | 26,4 | 17,9 | 3352,0 | 2070,4 | 679,1 | 32,8 |
| 120 | 56,7 | 2116,4 | | | | 75,9 | 1581,0 | | | |
| 180 | 99,9 | 1801,8 | | | | 106,7 | 1687,0 | | | |
| 240 | 129,1 | 1859,0 | | | | 134,4 | 1785,7 | | | |
| 180 | 98,8 | 1821,9 | | | | 99,9 | 1801,8 | | | |
| 120 | 63,9 | 1877,9 | | | | 74,7 | 1606,4 | | | |
| 60 | 22,9 | 2620,1 | | | | 22,4 | 2678,6 | | | |

Legenda: T – tempo de propagação da onda ultra-sónica; V – velocidade da onda ultra-sónica; V_{média} – Velocidade média da onda ultra-sónica; DP – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação.

Tabela A.4.5.4 Resultados individuais do tempo de transição e da velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas nos protótipos de parede, nas argamassas doseadas em laboratório

| Argamassa | A ^{con} | | | | | | | | | |
|----------------|----------------------|---------------|--------------------------|----------|--------|-------------|---------------|--------------------------|----------|--------|
| Posição | Cima | | | | | Baixo | | | | |
| Distancia (mm) | T (μs) | V (m/s) | V _{Média} (m/s) | DP (m/s) | CV (%) | T (μs) | V (m/s) | V _{Média} (m/s) | DP (m/s) | CV (%) |
| 60 | 23,4 | 2564,1 | 2710,4 | 700,5 | 25,8 | 24,4 | 2459,0 | 2527,4 | 183,8 | 7,3 |
| 120 | 53,1 | 2259,9 | | | | 51,1 | 2348,3 | | | |
| 180 | 86,4 | 2083,3 | | | | 70,7 | 2545,9 | | | |
| 240 | 105,2 | 2281,4 | | | | 103,2 | 2325,6 | | | |
| 180 | 64,9 | 2773,5 | | | | 64,2 | 2803,7 | | | |
| 120 | 42,2 | 2843,6 | | | | 48,6 | 2469,1 | | | |
| 60 | 14,4 | 4166,7 | | | | 21,9 | 2739,7 | | | |
| Argamassa | B ^{GC} | | | | | | | | | |
| Posição | Cima | | | | | Baixo | | | | |
| Distancia (mm) | T (μs) | V (m/s) | V _{Média} (m/s) | DP (m/s) | CV (%) | T (μs) | V (m/s) | V _{Média} (m/s) | DP (m/s) | CV (%) |
| 60 | 26,1 | 2298,9 | 1489,6 | 375,4 | 25,2 | 25,7 | 2334,6 | 1341,1 | 458,8 | 34,2 |
| 120 | 102,7 | 1168,5 | | | | 112,1 | 1070,5 | | | |
| 180 | 124,9 | 1441,2 | | | | 156,6 | 1149,4 | | | |
| 240 | 194,4 | 1234,6 | | | | 203 | 1182,3 | | | |
| 180 | 130,4 | 1380,4 | | | | 167,2 | 1076,6 | | | |
| 120 | 85,7 | 1400,2 | | | | 108,4 | 1107,0 | | | |
| 60 | 39,9 | 1503,8 | | | | 40,9 | 1466,9 | | | |
| Argamassa | C ^{AE} | | | | | | | | | |
| Posição | Cima | | | | | Baixo | | | | |
| Distancia (mm) | T (μs) | V (m/s) | V _{Média} (m/s) | DP (m/s) | CV (%) | T (μs) | V (m/s) | V _{Média} (m/s) | DP (m/s) | CV (%) |
| 60 | 18,9 | 3174,6 | 2506,3 | 364,1 | 14,5 | 18,4 | 3260,9 | 2433,8 | 645,8 | 26,5 |
| 120 | 45,6 | 2631,6 | | | | 59,9 | 2003,3 | | | |
| 180 | 76,4 | 2356,0 | | | | 77,7 | 2316,6 | | | |
| 240 | 104,1 | 2305,5 | | | | 113,6 | 2112,7 | | | |
| 180 | 90,4 | 1991,2 | | | | 88,6 | 2031,6 | | | |
| 120 | 46,6 | 2575,1 | | | | 64,4 | 1863,4 | | | |
| 60 | 23,9 | 2510,5 | | | | 17,4 | 3448,3 | | | |
| Argamassa | D ^{Aero/AE} | | | | | | | | | |
| Posição | Cima | | | | | Baixo | | | | |
| Distancia (mm) | T (μs) | V (m/s) | V _{Média} (m/s) | DP (m/s) | CV (%) | T (μs) | V (m/s) | V _{Média} (m/s) | DP (m/s) | CV (%) |
| 60 | 26,7 | 2247,2 | 1838,3 | 455,5 | 24,8 | 17,9 | 3351,9 | 2292,0 | 1040,6 | 45,4 |
| 120 | 81,4 | 1474,2 | | | | 63,6 | 1886,8 | | | |
| 180 | 120,1 | 1498,8 | | | | 111,9 | 1608,6 | | | |
| 240 | 154,2 | 1556,4 | | | | 160,4 | 1496,3 | | | |
| 180 | 109,9 | 1637,9 | | | | 111,1 | 1620,2 | | | |
| 120 | 67,6 | 1775,2 | | | | 62,7 | 1913,9 | | | |
| 60 | 22,4 | 2678,6 | | | | 14,4 | 4166,7 | | | |
| Argamassa | E ^{GC/AE} | | | | | | | | | |
| Posição | Cima | | | | | Baixo | | | | |
| Distancia (mm) | T (μs) | V (m/s) | V _{Média} (m/s) | DP (m/s) | CV (%) | T (μs) | V (m/s) | V _{Média} (m/s) | DP (m/s) | CV (%) |
| 60 | 21,9 | 2739,7 | 1960,7 | 640,0 | 32,6 | 20,4 | 2941,2 | 1638,2 | 658,2 | 40,2 |
| 120 | 58,2 | 2061,9 | | | | 85,1 | 1410,1 | | | |
| 180 | 113,4 | 1587,3 | | | | 157,2 | 1145,0 | | | |
| 240 | 168,1 | 1427,7 | | | | 210 | 1142,9 | | | |
| 180 | 122,4 | 1470,6 | | | | 130,4 | 1380,4 | | | |
| 120 | 80,2 | 1496,3 | | | | 88,9 | 1349,9 | | | |
| 60 | 20,4 | 2941,2 | | | | 28,6 | 2097,9 | | | |
| Argamassa | F ^{AE/GC} | | | | | | | | | |
| Posição | Cima | | | | | Baixo | | | | |
| Distancia (mm) | T (μs) | V (m/s) | V _{Média} (m/s) | DP (m/s) | CV (%) | T (μs) | V (m/s) | V _{Média} (m/s) | DP (m/s) | CV (%) |
| 60 | 18,9 | 3174,6 | 2276,6 | 594,5 | 26,1 | 36,1 | 1662,1 | 1696,6 | 313,2 | 18,5 |
| 120 | 51,1 | 2348,3 | | | | 86,4 | 1388,9 | | | |
| 180 | 113,2 | 1590,1 | | | | 126,1 | 1427,4 | | | |
| 240 | 131,6 | 1823,7 | | | | 142,7 | 1681,9 | | | |
| 180 | 97,6 | 1844,3 | | | | 105,4 | 1707,8 | | | |
| 120 | 54,2 | 2214,0 | | | | 72,1 | 1664,4 | | | |
| 60 | 20,4 | 2941,2 | | | | 25,6 | 2343,8 | | | |

Legenda: T – tempo de propagação da onda ultra-sônica; V – velocidade da onda ultra-sônica; V_{média} – Velocidade média da onda ultra-sônica; DP – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação.

Anexo A.4.6 – Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, resultados individuais no tijolo (método indirecto – método das dromocrónicas (declive))

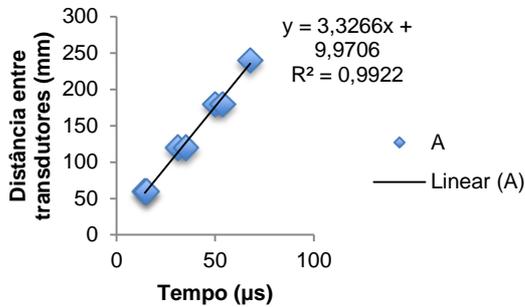


Figura A.4.6.1 Velocidade aparente de propagação das ondas ultra-sónicas pelo declive da recta ajustada aos pontos distância/tempo da argamassa Acon aplicada no tijolo

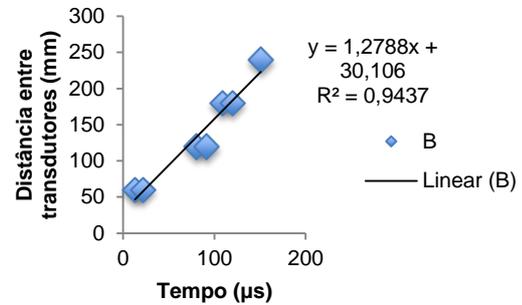


Figura A.4.6.2 Velocidade aparente de propagação das ondas ultra-sónicas pelo declive da recta ajustada aos pontos distância/tempo da argamassa B^{GC} aplicada no tijolo

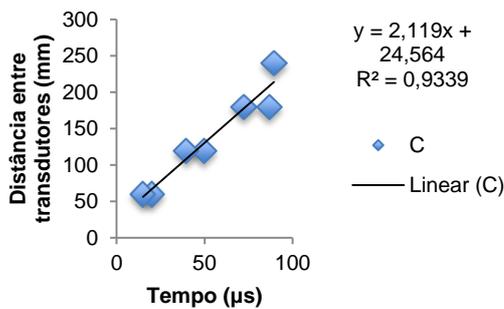


Figura A.4.6.3 Velocidade aparente de propagação das ondas ultra-sónicas pelo declive da recta ajustada aos pontos distância/tempo da argamassa C^{AE} aplicada no tijolo

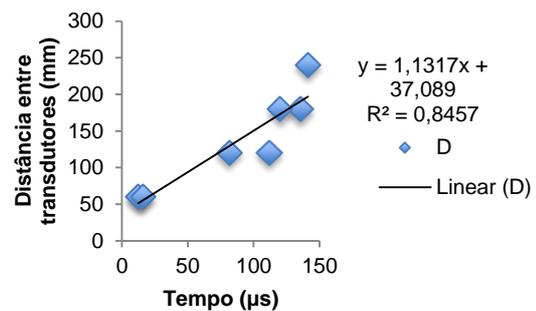


Figura A.4.6.4 Velocidade aparente de propagação das ondas ultra-sónicas pelo declive da recta ajustada aos pontos distância/tempo da argamassa D^{Aero/AE} aplicada no tijolo

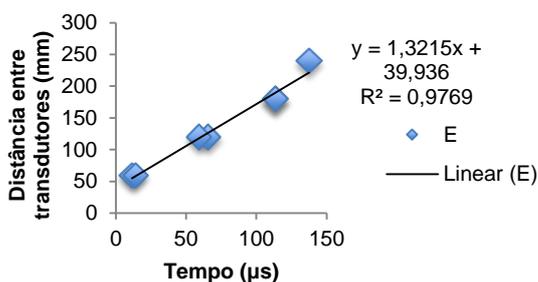


Figura A.4.6.5 Velocidade aparente de propagação das ondas ultra-sónicas pelo declive da recta ajustada aos pontos distância/tempo da argamassa E^{GCAE} aplicada no tijolo

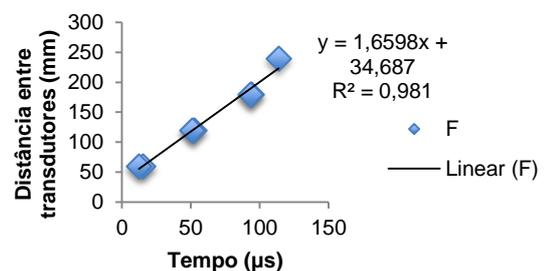


Figura A.4.6.6 Velocidade aparente de propagação das ondas ultra-sónicas pelo declive da recta ajustada aos pontos distância/tempo da argamassa F^{AEGC} aplicada no tijolo

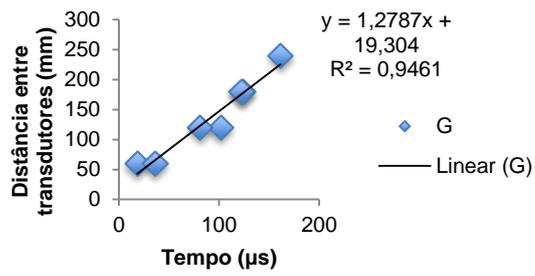


Figura A.4.6.7 Velocidade aparente de propagação das ondas ultra-sónicas pelo declive da recta ajustada aos pontos distância/tempo da argamassa G^{EPS} aplicada no tijolo

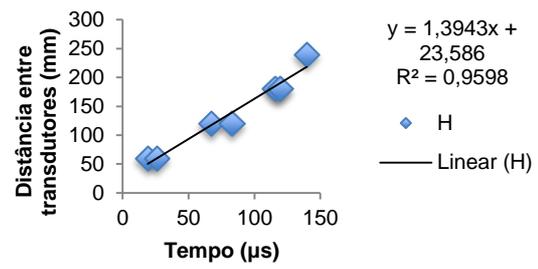


Figura A.4.6.8 Velocidade aparente de propagação das ondas ultra-sónicas pelo declive da recta ajustada aos pontos distância/tempo da argamassa H^{GC/T} aplicada no tijolo

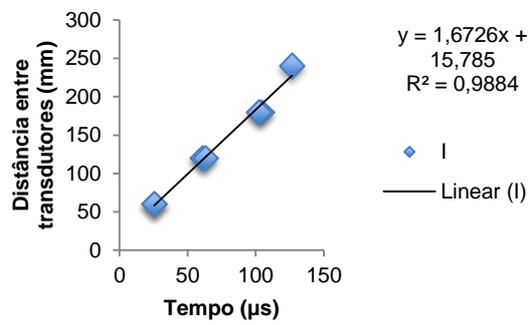


Figura A.4.6.9 Velocidade aparente de propagação das ondas ultra-sónicas pelo declive da recta ajustada aos pontos distância/tempo da argamassa IGC aplicada no tijolo

Anexo A.4.7 – Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, resultados individuais na parede (método indirecto – método das dromocrónicas (declive))

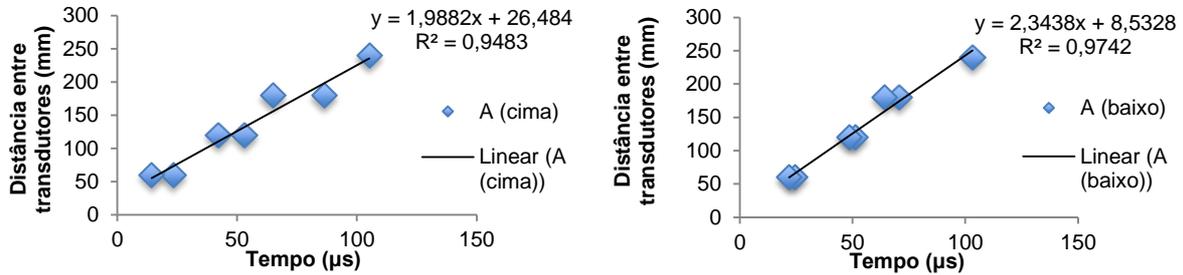


Figura A.4.7.1 Velocidades aparentes de propagação das ondas ultra-sónicas pelos declives das rectas ajustadas aos pontos distância/tempo medidos em cima e em baixo do protótipo de parede, no gráfico à esquerda e à direita, respectivamente, da argamassa A^{con}

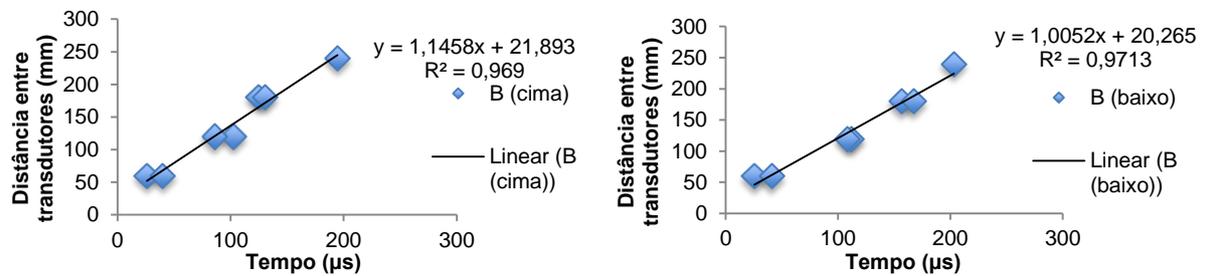


Figura A.4.7.2 Velocidades aparentes de propagação das ondas ultra-sónicas pelos declives das rectas ajustadas aos pontos distância/tempo medidos em cima e em baixo do protótipo de parede, no gráfico à esquerda e à direita, respectivamente, da argamassa B^{GC}

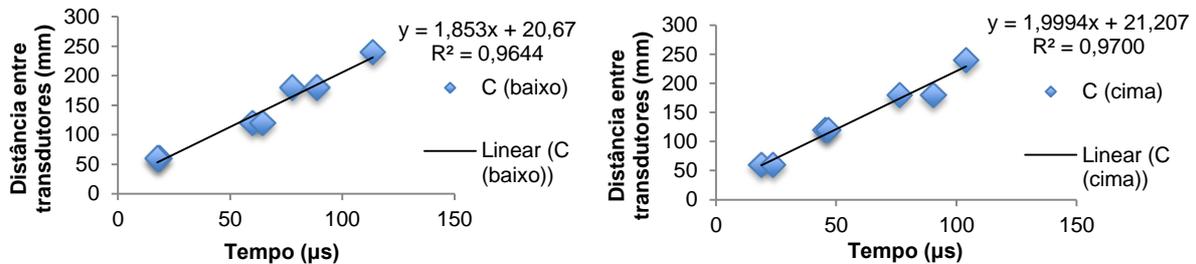


Figura A.4.7.3 Velocidades aparentes de propagação das ondas ultra-sónicas pelos declives das rectas ajustadas aos pontos distância/tempo medidos em cima e em baixo do protótipo de parede, no gráfico à esquerda e à direita, respectivamente, da argamassa C^{AE}

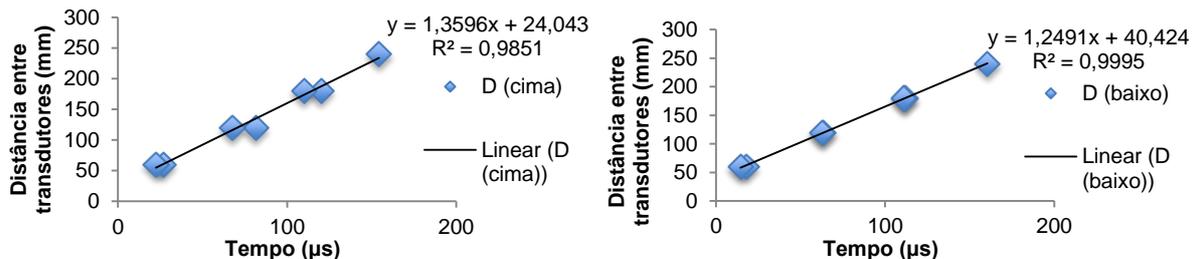


Figura A.4.7.4 Velocidades aparentes de propagação das ondas ultra-sónicas pelos declives das rectas ajustadas aos pontos distância/tempo medidos em cima e em baixo do protótipo de parede, no gráfico à esquerda e à direita, respectivamente, da argamassa D^{Aero/AE}

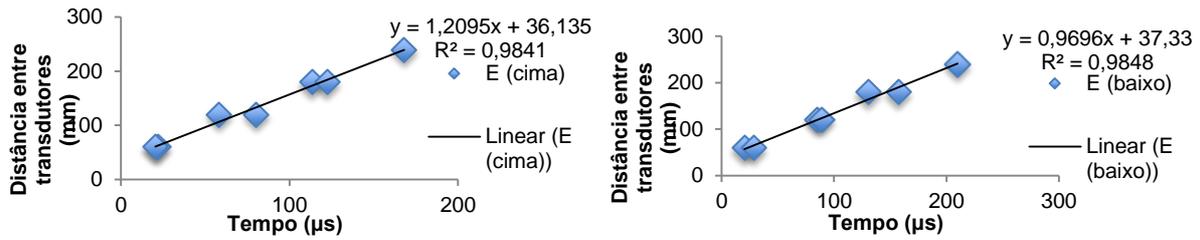


Figura A.4.7.5 Velocidades aparentes de propagação das ondas ultra-sónicas pelos declives das rectas ajustadas aos pontos distância/tempo medidos em cima e em baixo do protótipo de parede, no gráfico à esquerda e à direita, respectivamente, da argamassa E^{GC/AE}

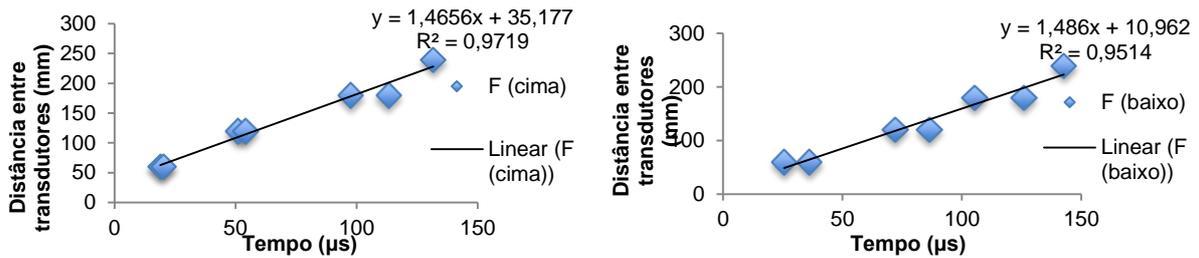


Figura A.4.7.6 Velocidades aparentes de propagação das ondas ultra-sónicas pelos declives das rectas ajustadas aos pontos distância/tempo medidos em cima e em baixo do protótipo de parede, no gráfico à esquerda e à direita, respectivamente, da argamassa F^{AE/GC}

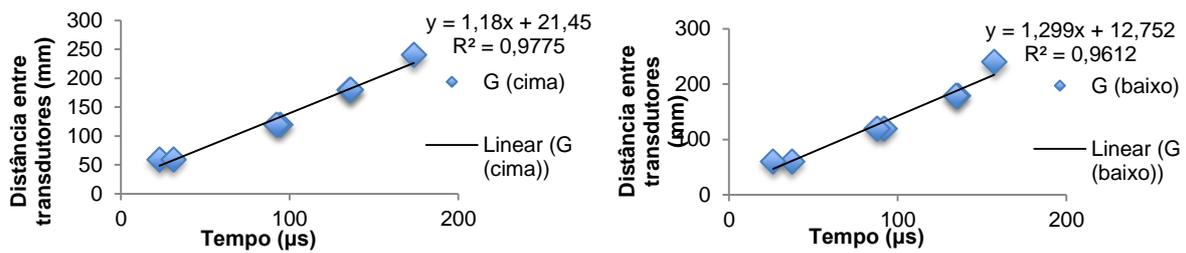


Figura A.4.7.7 Velocidades aparentes de propagação das ondas ultra-sónicas pelos declives das rectas ajustadas aos pontos distância/tempo medidos em cima e em baixo do protótipo de parede, no gráfico à esquerda e à direita, respectivamente, da argamassa G^{EPS}

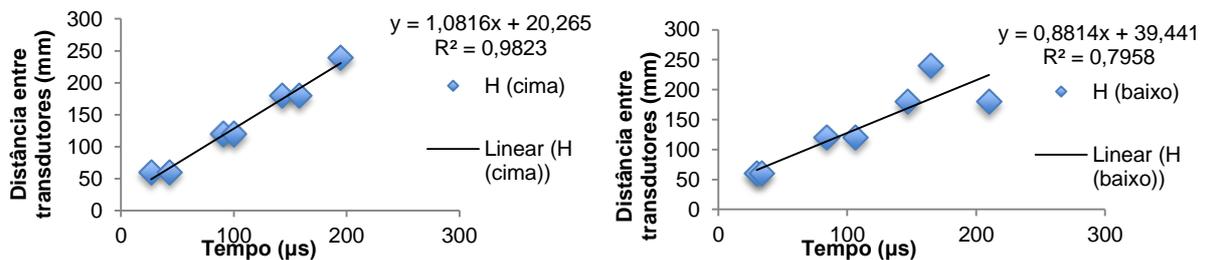


Figura A.4.7.8 Velocidades aparentes de propagação das ondas ultra-sónicas pelos declives das rectas ajustadas aos pontos distância/tempo medidos em cima e em baixo do protótipo de parede, no gráfico à esquerda e à direita, respectivamente, da argamassa H^{ECT}

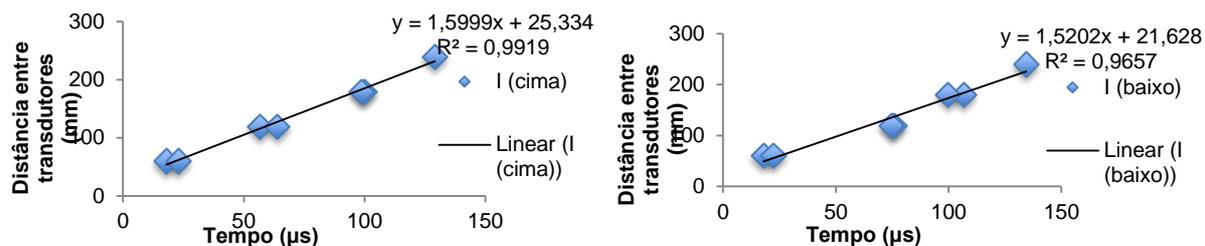


Figura A.4.7.9 Velocidades aparentes de propagação das ondas ultra-sónicas pelos declives das rectas ajustadas aos pontos distância/tempo medidos em cima e em baixo do protótipo de parede, no gráfico à esquerda e à direita, respectivamente, da argamassa I^{GC}

Anexo A.4.8 – Tensão de aderência ao suporte

Tabela A.4.8.1 Resultados individuais do ensaio da aderência ao suporte das argamassa doseadas em laboratório aplicadas em tijolo

| Argamassa | A ^{con} | | | | | | |
|-----------|----------------------|------------|--------------|---------------------|-------------|---------------------|--------|
| Ensaio | Força (KN) | Área (dm2) | Tensão (MPa) | Tipologia de rotura | Média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | CV (%) |
| 1 | - | - | - | nulo | 0,24 | 0,12 | 51,6 |
| 2 | 0,553 | 0,1722 | 0,32 | adesivo | | | |
| 3 | 0,245 | 0,164 | 0,15 | adesivo | | | |
| Argamassa | B ^{GC} | | | | | | |
| Ensaio | Força (KN) | Área (dm2) | Tensão (MPa) | Tipologia de rotura | Média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | CV (%) |
| 1 | 0,379 | 0,156 | 0,24 | 70%adesivo | 0,20 | 0,04 | 20,3 |
| 2 | 0,328 | 0,160 | 0,21 | coesivo | | | |
| 3 | 0,257 | 0,160 | 0,16 | 80%adesivo | | | |
| Argamassa | C ^{AE} | | | | | | |
| Ensaio | Força (KN) | Área (dm2) | Tensão (MPa) | Tipologia de rotura | Média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | CV (%) |
| 1 | 0,149 | 0,156 | 0,10 | adesivo | 0,11 | 0,01 | 11,9 |
| 2 | 0,167 | 0,160 | 0,10 | adesivo | | | |
| 3 | 0,188 | 0,156 | 0,12 | adesivo | | | |
| Argamassa | D ^{Aero/AE} | | | | | | |
| Ensaio | Força (KN) | Área (dm2) | Tensão (MPa) | Tipologia de rotura | Média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | CV (%) |
| 1 | 0,087 | 0,172 | 0,05 | adesivo | 0,05 | 0,03 | 57,6 |
| 2 | 0,032 | 0,160 | 0,02 | adesivo | | | |
| 3 | 0,119 | 0,156 | 0,08 | adesivo | | | |
| Argamassa | E ^{GC/AE} | | | | | | |
| Ensaio | Força (KN) | Área (dm2) | Tensão (MPa) | Tipologia de rotura | Média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | CV (%) |
| 1 | 0,106 | 0,152 | 0,07 | adesivo | 0,07 | 0,02 | 28,0 |
| 2 | 0,072 | 0,16 | 0,05 | adesivo | | | |
| 3 | 0,129 | 0,160 | 0,08 | adesivo | | | |
| Argamassa | F ^{AE/GC} | | | | | | |
| Ensaio | Força (KN) | Área (dm2) | Tensão (MPa) | Tipologia de rotura | Média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | CV (%) |
| 1 | 0,18 | 0,156 | 0,12 | adesivo | 0,09 | 0,02 | 19,5 |
| 2 | 0,136 | 0,16 | 0,09 | adesivo | | | |
| 3 | 0,135 | 0,164 | 0,08 | adesivo | | | |

Legenda: CV – Coeficiente de variação

Tabela A.4.8.2 Resultados individuais do ensaio da aderência ao suporte das argamassa industriais aplicadas em tijolo

| G ^{EPS} | | | | | | | |
|------------------|------------|------------|--------------|---------------------|-------------|---------------------|--------|
| Ensaio | Força (KN) | Área (dm2) | Tensão (MPa) | Tipologia de rotura | Média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | CV (%) |
| 1 | 0,248 | 0,160 | 0,16 | coesivo | 0,14 | 0,02 | 11,8 |
| 2 | 0,23 | 0,1599 | 0,14 | coesivo | | | |
| 3 | 0,186 | 0,152 | 0,12 | coesivo | | | |
| H ^{GCT} | | | | | | | |
| Ensaio | Força (KN) | Área (dm2) | Tensão (MPa) | Tipologia de rotura | Média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | CV (%) |
| 1 | 0,54 | 0,168 | 0,32 | coesivo | 0,30 | 0,03 | 9,0 |
| 2 | 0,451 | 0,168 | 0,27 | coesivo | | | |
| 3 | 0,468 | 0,156 | 0,30 | coesivo | | | |
| J ^{GC} | | | | | | | |
| Ensaio | Força (KN) | Área (dm2) | Tensão (MPa) | Tipologia de rotura | Média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | CV (%) |
| 1 | 0,265 | 0,152 | 0,17 | coesivo | 0,29 | 0,10 | 34,6 |
| 2 | 0,529 | 0,148 | 0,36 | coesivo | | | |
| 3 | 0,486 | 0,144 | 0,34 | coesivo | | | |

Legenda: CV – Coeficiente de variação

Tabela A.4.8.3 Resultados individuais não nulos do ensaio da aderência ao suporte das argamassa aplicadas em protótipos de parede

| B ^{GC} | | | | | | | |
|------------------|------------|------------|--------------|---------------------|-------------|---------------------|--------|
| Ensaio | Força (KN) | Área (dm2) | Tensão (MPa) | Tipologia de rotura | Média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | CV (%) |
| 1 | 0,013 | 0,141 | 0,01 | coesivo | 0,02 | 0,01 | 59,7 |
| 2 | 0,032 | 0,141 | 0,02 | adesivo | | | |
| 0,01 | 0,144 | 0,01 | coesivo | adesivo | | | |
| G ^{EPS} | | | | | | | |
| Ensaio | Força (KN) | Área (dm2) | Tensão (MPa) | Tipologia de rotura | Média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | CV (%) |
| 1 | 0,190 | 0,155 | 0,12 | adesivo | 0,08 | 0,04 | 42,4 |
| 2 | 0,124 | 0,156 | 0,08 | adesivo | | | |
| 3 | 0,08 | 0,156 | 0,05 | 90%adesivo | | | |
| H ^{GCT} | | | | | | | |
| Ensaio | Força (KN) | Área (dm2) | Tensão (MPa) | Tipologia de rotura | Média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | CV (%) |
| 1 | 0,157 | 0,156 | 0,10 | adesivo | 0,10 | 0,00 | 0,0 |
| 2 | - | - | - | nulo | | | |
| 3 | 0,169 | 0,168 | 0,10 | adesivo | | | |
| J ^{GC} | | | | | | | |
| Ensaio | Força (KN) | Área (dm2) | Tensão (MPa) | Tipologia de rotura | Média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | CV (%) |
| 1 | 0,588 | 0,168 | 0,35 | 70% adesivo | 0,29 | 0,05 | 18,0 |
| 2 | 0,345 | 0,132 | 0,26 | 50%adesivo | | | |
| 3 | 0,382 | 0,148 | 0,26 | 50%adesivo | | | |

Legenda: CV – Coeficiente de variação

Anexo A.4.9 – Índice esclerométrico

Tabela A.4.9.1 Resultados individuais do índice esclerométrico na argamassas aplicadas em protótipos de parede

| Argamassa | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | Média | DP | CV (%) |
|----------------------|------|-------|------|-------|------|-------|------|--------|
| A ^{con} | 100 | 132 | 125 | 124,5 | 105 | 117,3 | 13,9 | 11,9 |
| B ^{GC} | 86 | 92 | 97 | 97 | 95 | 93,4 | 4,6 | 4,9 |
| C ^{AE} | 80 | 94,5 | 95 | 100 | 86 | 91,1 | 8,0 | 8,8 |
| D ^{Aero/AE} | 75,5 | 79 | 75 | 76,5 | 79,5 | 77,1 | 2,0 | 2,7 |
| E ^{GC/AE} | 83 | 97 | 97,5 | 91 | 83 | 90,3 | 7,1 | 7,9 |
| F ^{AE/GC} | 86 | 101 | 90,5 | 90 | 95 | 92,5 | 5,7 | 6,2 |
| G ^{EPS} | 82 | 86 | 83 | 82 | 82 | 83 | 1,7 | 2,1 |
| H ^{GC/T} | 90 | 98 | 97,5 | 97 | 100 | 96,5 | 3,8 | 3,9 |
| I ^{GC} | 94,5 | 103,5 | 100 | 103,5 | 99,5 | 100,2 | 3,7 | 3,7 |

Legenda: E – Ensaio; DP – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação.

Tabela A.4.9.2 Resultados individuais do índice esclerométrico na argamassas aplicadas em tijolo

| Argamassa | E1 | E2 | E3 | Média | Desvio padrão | Coeficiente de variação (%) |
|----------------------|------|------|-------|-------|---------------|-----------------------------|
| A ^{con} | 106 | 117 | 115,5 | 112,8 | 6,0 | 5,3 |
| B ^{GC} | 79 | 76,5 | 77 | 77,5 | 1,3 | 1,7 |
| C ^{AE} | 81 | 85 | 82,5 | 82,8 | 2,0 | 2,4 |
| D ^{Aero/AE} | 77 | 81 | 77,5 | 78,5 | 2,2 | 2,8 |
| E ^{GC/AE} | 75 | 74 | 73,5 | 74,2 | 0,8 | 1,0 |
| F ^{AE/GC} | 75 | 76,5 | 73,5 | 75,0 | 1,5 | 2,0 |
| G ^{EPS} | 79 | 76 | 83 | 79,3 | 3,5 | 4,4 |
| H ^{GC/T} | 81 | 79 | 80 | 80,0 | 1,0 | 1,3 |
| I ^{GC} | 75,5 | 83 | 74 | 77,5 | 4,8 | 6,2 |

Legenda: E – Ensaio.

Anexo A.4.10 – Resistência *Martinet Baronnie*

Tabela A.4.10.1 Resultados individuais da mossa provocada pelo equipamento de *Martinet Baronnie* na argamassas aplicadas em protótipos de parede

| Argamas sa | E1 (cm) | E2 (cm) | E3 (cm) | E4 (cm) | E5 (cm) | Média (cm) | Desvio padrão (cm) | Coeficiente de variação (%) |
|----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------------|-----------------------|--------------------------------|
| A ^{con} | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,5 | 0,7 | 0,52 | 0,1 | 21,1 |
| B ^{GC} | 2,3 | 2 | 2,1 | 1,8 | 2 | 2,04 | 0,2 | 8,9 |
| C ^{AE} | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,6 | 1,2 | 1,4 | 0,2 | 14,3 |
| D ^{Aero/AE} | 2,1 | 2 | 1,9 | 2,2 | 2,1 | 2,06 | 0,1 | 5,5 |
| E ^{GC/AE} | 1,8 | 1,9 | 1,4 | 2 | 2 | 1,82 | 0,2 | 13,7 |
| F ^{AE/GC} | 1,5 | 1,5 | 1,4 | 1,8 | 1,2 | 1,48 | 0,2 | 14,6 |
| G ^{EPS} | 2,3 | 2,5 | 2,6 | 2,5 | 2,5 | 2,48 | 0,1 | 4,4 |
| H ^{GC/T} | 1,5 | 1,4 | 1 | 0,8 | 1,2 | 1,18 | 0,3 | 24,3 |
| I ^{GC} | 1,7 | 1,7 | 1,8 | 1,6 | 1,8 | 1,72 | 0,1 | 4,9 |

Legenda: E – Ensaio.

Tabela A.4.10.2 Resultados individuais da massa provocada pelo equipamento de *Martinet Baronnie* na argamassas aplicadas em tijolo

| Argamassa | E1 (cm) | E2 (cm) | E3 (cm) | Média (cm) | Desvio Padrão (cm) | Coefficiente de Variação (%) |
|----------------------|---------|---------|---------|------------|--------------------|------------------------------|
| A ^{con} | 0,5 | 0,7 | 0,8 | 0,67 | 0,2 | 22,9 |
| B ^{GC} | 2 | 2 | 2,5 | 2,17 | 0,3 | 13,3 |
| C ^{AE} | 1,9 | 1,5 | 1,5 | 1,63 | 0,2 | 14,1 |
| D ^{Aero/AE} | 1,5 | 2 | 1,7 | 1,73 | 0,3 | 14,5 |
| E ^{GC/AE} | 3 | 2,5 | 2,5 | 2,67 | 0,3 | 10,8 |
| F ^{AE/GC} | 2 | 2,2 | 2 | 2,07 | 0,1 | 5,6 |
| G ^{EPS} | 3 | 2,5 | 2,5 | 2,67 | 0,3 | 10,8 |
| H ^{GC/T} | 1,5 | 1,5 | 1,7 | 1,57 | 0,1 | 7,4 |
| I ^{GC} | 2 | 2 | 1,8 | 1,93 | 0,1 | 6,0 |

Legenda: E – Ensaio.

Anexo A.4.11 – Módulo de elasticidade dinâmico

Tabela A.4.11.1 Resultados individuais do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico nas argamassas produzidas

| Argamassa | Provete | Massa (g) | Flexão (kHz) | Torção (kHz) | Módulo de Elasticidade Dinâmico (MPa) |
|----------------------|---------|-----------|--------------|--------------|---------------------------------------|
| A ^{con} | A1 | 450,69 | 3,79 | 3,8 | 13681,59 |
| | A2 | 450,48 | 3,83 | 3,84 | 13965,40 |
| | A3 | 440,39 | 3,67 | 3,65 | 12535,73 |
| B ^{GC} | B1 | 113,32 | 1,32 | 1,82 | 418,21 |
| | B2 | 107,09 | 1,29 | 1,79 | 376,90 |
| | B3 | 111,4 | 1,33 | 1,85 | 416,53 |
| C ^{AE} | C1 | 187,70 | 2,73 | 3,73 | 2970,17 |
| | C2 | 183,24 | 2,62 | 3,66 | 2656,50 |
| | C3 | 192,58 | 2,73 | 3,75 | 3042,85 |
| D ^{Aero/AE} | D1 | 164,45 | 1,69 | 2,51 | 985,08 |
| | D2 | 162,7 | 1,78 | 2,49 | 1088,42 |
| | D3 | 169,08 | 1,84 | 2,55 | 1211,00 |
| E ^{GC/AE} | E1 | 155,92 | 2,00 | 2,74 | 1323,21 |
| | E2 | 159,44 | 2,00 | 2,77 | 1349,38 |
| | E3 | 158,89 | 2,00 | 2,75 | 1347,07 |
| F ^{AE/GC} | F1 | 171,97 | 2,33 | 3,24 | 2011,55 |
| | F2 | 176,07 | 2,41 | 3,28 | 2173,72 |
| | F3 | 184,29 | 2,41 | 3,32 | 2267,59 |
| G ^{EPS} | G1 | 101,63 | 1,51 | 2,09 | 490,36 |
| | G2 | 100,98 | 1,56 | 2,09 | 525,14 |
| | G3 | 102,35 | 1,61 | 2,19 | 564,02 |
| H ^{GC/T} | H1 | 135,40 | 1,45 | 2,01 | 602,21 |
| | H2 | 138,78 | 1,34 | 1,86 | 526,99 |
| | H3 | 140,96 | 1,34 | 1,88 | 534,12 |
| I ^{GC} | I1 | 157,88 | 1,61 | 2,16 | 874,06 |
| | I2 | 159,75 | 1,59 | 2,13 | 863,05 |
| | I3 | 161,81 | 1,59 | 2,13 | 874,18 |

Anexo A.4.12 – Resistência à tração por flexão

Tabela A.4.12.1 Resultados individuais do ensaio da resistência à tração por flexão nas argamassas produzidas

| Argamassa | Provete | Ft (KN) | l (m) | b (m) | d(m) | Rt (MPa) | Média (MPa) | DP (MPa) |
|----------------------|---------|---------|-------|-------|------|----------|-------------|----------|
| A ^{con} | A1 | 0,872 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 2,04 | 2,36 | 0,19 |
| | A2 | 0,983 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 2,30 | | |
| | A3 | 1,034 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 2,42 | | |
| B ^{GC} | B1 | 0,158 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 0,37 | 0,36 | 0,01 |
| | B2 | 0,157 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 0,37 | | |
| | B3 | 0,15 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 0,35 | | |
| C ^{AE} | C1 | 0,435 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 1,02 | 0,99 | 0,06 |
| | C2 | 0,393 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 0,92 | | |
| | C3 | 0,442 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 1,04 | | |
| D ^{Aero/AE} | D1 | 0,131 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 0,31 | 0,37 | 0,06 |
| | D2 | 0,184 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 0,43 | | |
| | D3 | 0,152 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 0,36 | | |
| E ^{GC/AE} | E1 | 0,315 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 0,74 | 0,74 | 0,02 |
| | E2 | 0,307 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 0,72 | | |
| | E3 | 0,321 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 0,75 | | |
| F ^{AE/GC} | F1 | 0,334 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 0,78 | 0,87 | 0,09 |
| | F2 | 0,364 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 0,85 | | |
| | F3 | 0,412 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 0,97 | | |
| G ^{EPS} | G1 | 0,281 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 0,66 | 0,65 | 0,02 |
| | G2 | 0,267 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 0,63 | | |
| | G3 | 0,28 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 0,66 | | |
| H ^{GC/T} | H1 | 0,361 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 0,85 | 0,69 | 0,13 |
| | H2 | 0,273 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 0,64 | | |
| | H3 | 0,253 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 0,59 | | |
| I ^{GC} | I1 | 0,319 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 0,75 | 0,70 | 0,04 |
| | I2 | 0,292 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 0,68 | | |
| | I3 | 0,283 | 0,1 | 0,04 | 0,04 | 0,66 | | |

Legenda: Ft – carga máxima aplicada; l – distancia entre os apoios da maquina; b – largura do provete; d – espessura do provete; Rt – resistência à tração por flexão; DP – Desvio padrão.

Anexo A.4.13 – Resistência à compressão

Tabela A.4.13.1 Resultados individuais do ensaio da resistência à compressão nas argamassas produzidas

| Argamassa | Provete | Fc (KN) | Ac (m ²) | Rc (MPa) | Média (MPa) | DP (MPa) |
|----------------------------|---------|---------|----------------------|----------|-------------|----------|
| A^{con} | A1 | 10,52 | 0,0016 | 6,58 | 6,61 | 0,40 |
| | A2 | 9,96 | 0,0016 | 6,23 | | |
| | A3 | 11,24 | 0,0016 | 7,03 | | |
| B^{GC} | B1 | 0,95 | 0,0016 | 0,59 | 0,61 | 0,05 |
| | B2 | 0,93 | 0,0016 | 0,58 | | |
| | B3 | 1,07 | 0,0016 | 0,67 | | |
| C^{AE} | C1 | 4,02 | 0,0016 | 2,51 | 2,39 | 0,11 |
| | C2 | 3,69 | 0,0016 | 2,31 | | |
| | C3 | 3,78 | 0,0016 | 2,36 | | |
| D^{Aero/AE} | D1 | 2,53 | 0,0016 | 1,58 | 1,32 | 0,23 |
| | D2 | 2,00 | 0,0016 | 1,25 | | |
| | D3 | 1,82 | 0,0016 | 1,14 | | |
| E^{GC/AE} | E1 | 2,61 | 0,0016 | 1,63 | 1,75 | 0,11 |
| | E2 | 2,96 | 0,0016 | 1,85 | | |
| | E3 | 2,84 | 0,0016 | 1,78 | | |
| F^{AE/GC} | F1 | 3,41 | 0,0016 | 2,13 | 2,22 | 0,25 |
| | F2 | 4,00 | 0,0016 | 2,50 | | |
| | F3 | 3,25 | 0,0016 | 2,03 | | |
| G^{EPS} | G1 | 1,35 | 0,0016 | 0,84 | 0,92 | 0,08 |
| | G2 | 1,46 | 0,0016 | 0,91 | | |
| | G3 | 1,59 | 0,0016 | 0,99 | | |
| H^{GC/T} | H1 | 2,37 | 0,0016 | 1,48 | 1,30 | 0,16 |
| | H2 | 1,94 | 0,0016 | 1,21 | | |
| | H3 | 1,94 | 0,0016 | 1,21 | | |
| I^{GC} | I1 | 2,29 | 0,0016 | 1,43 | 1,56 | 0,16 |
| | I2 | 2,78 | 0,0016 | 1,74 | | |
| | I3 | 2,4 | 0,0016 | 1,50 | | |

Legenda: Fc – carga de compressão máxima aplicada; Ac – área da secção comprimida; Rc – resistência à compressão; DP – Desvio Padrão.

Tabela A.4.13.2 Resultados individuais do ensaio da resistência à compressão nas amostras recolhidas da argamassa aplicada nos protótipos de parede

| Argamassa | Amostra | Fc (KN) | Ac (m2) | Rc (MPa) | Média (MPa) | DP (MPa) |
|----------------------------|---------|---------|---------|----------|-------------|----------|
| A^{con} | PA1 | 7,69 | 0,0016 | 4,81 | 5,50 | 1,21 |
| | PA2 | 7,67 | 0,0016 | 4,79 | | |
| | PA3 | 11,04 | 0,0016 | 6,90 | | |
| B^{GC} | PB1 | 1,39 | 0,0016 | 0,87 | 0,84 | 0,07 |
| | PB2 | 1,21 | 0,0016 | 0,76 | | |
| | PB3 | 1,41 | 0,0016 | 0,88 | | |
| C^{AE} | PC1 | 3,42 | 0,0016 | 2,14 | 2,88 | 0,65 |
| | PC2 | 5,05 | 0,0016 | 3,16 | | |
| | PC3 | 5,35 | 0,0016 | 3,34 | | |
| D^{Aero/AE} | PD1 | 1,54 | 0,0016 | 0,96 | 0,91 | 0,12 |
| | PD2 | 1,60 | 0,0016 | 1,00 | | |
| | PD3 | 1,23 | 0,0016 | 0,77 | | |
| E^{GC/AE} | PE1 | 1,69 | 0,0016 | 1,06 | 1,06 | 0,13 |
| | PE2 | 1,49 | 0,0016 | 0,93 | | |
| | PE3 | 1,92 | 0,0016 | 1,20 | | |
| F^{AE/GC} | PF1 | 2,38 | 0,0016 | 1,49 | 1,70 | 0,20 |
| | PF2 | 2,78 | 0,0016 | 1,74 | | |
| | PF3 | 3,01 | 0,0016 | 1,88 | | |
| G^{EPS} | PG1 | 1,12 | 0,0016 | 0,70 | 0,79 | 0,08 |
| | PG2 | 1,3 | 0,0016 | 0,81 | | |
| | PG3 | 1,36 | 0,0016 | 0,85 | | |
| H^{GC/T} | PH1 | 3,1 | 0,0016 | 1,94 | 1,97 | 0,06 |
| | PH2 | 3,26 | 0,0016 | 2,04 | | |
| | PH3 | 3,11 | 0,0016 | 1,94 | | |
| I^{GC} | PI1 | 4,11 | 0,0016 | 2,57 | 2,89 | 0,36 |
| | PI2 | 5,25 | 0,0016 | 3,28 | | |
| | PI3 | 4,49 | 0,0016 | 2,81 | | |

Legenda: Fc – carga de compressão máxima aplicada; Ac – área da secção comprimida; Rc – resistência à compressão; DP – Desvio padrão.