

# **Influência da pasta ligante nas propriedades das argamassas térmicas no estado endurecido**

**Andreia Valente Ferreira Borges**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

## **Engenharia Civil**

### **Orientadores**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Inês dos Santos Flores Barbosa Colen

Prof. Dr. Jorge Manuel Calição Lopes de Brito

### **Júri**

Presidente: Prof. Dr. João Pedro Ramôa Ribeiro Correia

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Inês dos Santos Flores Barbosa Colen

Vogal: Dr.<sup>a</sup> Maria do Rosário da Silva Veiga

**Julho de 2016**



## Agradecimentos

A presente dissertação constitui o final do meu percurso no IST e não poderia deixar de expressar o meu agradecimento a todas as pessoas que me acompanharam ao longo desta etapa.

À professora Inês Flores-Colen e ao professor Jorge de Brito, orientadores científicos desta dissertação, pelo apoio e incentivo demonstrados ao longo deste trabalho, pela partilha de informação sobre o tema e pela disponibilidade para a discussão de resultados e revisão do texto.

Aos Eng<sup>os</sup>. António Soares, Sofia Real, Jorge Pontes e Tiago Barroqueiro, pelos conhecimentos partilhados, amizade e companheirismo nas muitas horas passadas no laboratório.

Aos Srs. Leonel Silva e João Lopes, técnicos do Laboratório de Construção do IST, pelo apoio e colaboração prestados na realização do trabalho experimental.

A todos os meus colegas de projecto, em especial ao Rui Carrajola, cuja dissertação foi desenvolvida em paralelo com a minha. Sem a sua boa disposição e espírito de entreatajuda, a campanha experimental não teria sido a mesma.

Às empresas Secil, Weber, Amorim, Gyptec e EDP pelo fornecimento dos materiais utilizados neste trabalho.

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

A todos os meus amigos, os de sempre e os que fui ganhando ao longo deste percurso, por todo o ânimo, motivação e bons momentos passados juntos. Um agradecimento especial ao Pedro: sem ele, nem esta dissertação nem a minha vida estariam completas.

Por último, um agradecimento especial à minha família, em particular à minha mãe, por todo o apoio, compreensão, carinho e paciência demonstrados ao longo do curso e de toda a minha vida.

## Resumo

Nas últimas décadas, tem existido uma preocupação crescente com o conforto térmico e eficiência energética dos edifícios. Esta preocupação foi materializada em regulamentos (RCCTE e, actualmente, REH), o que criou a necessidade de encontrar novas soluções de revestimento de fachadas termicamente mais eficientes. É neste sentido que surgem as argamassas de desempenho térmico melhorado, resultantes da substituição, total ou parcial, de areia por agregados isolantes. O grande desafio na concepção destas argamassas prende-se com a dificuldade em conciliar uma baixa condutibilidade térmica com uma resistência mecânica adequada.

Com esta dissertação, pretende-se estudar a influência da pasta ligante, em associação com diferentes agregados isolantes, nas propriedades no estado endurecido de argamassas com desempenho térmico melhorado. Como tal, foram produzidas em laboratório vinte argamassas com agregados isolantes (granulado de cortiça expandida, argila expandida ou uma mistura dos dois agregados) e diferentes pastas ligantes, onde o cimento foi substituído por percentagens crescentes de cinzas volantes (isoladamente ou em conjunto com cal aérea hidratada). Nestas argamassas, foram também utilizados adjuvantes (um introdutor de ar e um retentor de água). Adicionalmente, foram produzidas cinco argamassas de areia para fins comparativos.

Foram realizados ensaios de porosidade e massa volúmica aparente, módulo de elasticidade dinâmico, coeficiente de *Poisson*, resistência à tracção por flexão, resistência à compressão, velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, arrancamento por tracção (*pull-off*), esclerómetro pendular, absorção de água por capilaridade, secagem, absorção de água sob baixa pressão (tubo de *Karsten*) e condutibilidade térmica.

Todas as argamassas apresentaram baixa massa volúmica aparente e elevada porosidade aparente. A redução no teor de cimento originou argamassas com menor condutibilidade térmica, tendo provocado também uma perda de propriedades mecânicas. Esta tendência foi transversal a todas as argamassas, excepto as de argila expandida, que demonstraram ser menos susceptíveis a alterações na pasta ligante. Assim, as argamassas que apresentaram um melhor compromisso entre baixa condutibilidade térmica e melhores propriedades mecânicas são as constituídas por argila expandida e até 35% de cinzas volantes como substituto parcial do cimento.

**Palavras-chave:** argamassas térmica; granulado de cortiça expandida; argila expandida; cinzas volantes; cal aérea hidratada; desempenho mecânico e físico.

## Abstract

In recent decades, there has been a growing concern regarding the thermal comfort and energetic efficiency of buildings. This concern was expressed in standards (RCCTE and, currently, REH), which have caused a demand for new coating solutions with higher thermal efficiency. Mortars with an improved thermal performance, which are a result of a partial or total replacement of sand with insulating aggregates, are one such solution. The biggest challenge in developing these mortars consists in achieving a lower thermal conductivity, while still retaining an appropriate mechanical strength.

The aim of this study is to analyse the influence of binders, in association with different insulating aggregates, on the behaviour at the hardened state of mortars with improved thermal performance. Therefore, twenty mortars were produced with insulating aggregates (expanded clay, granulated cork or a mixture of both) and different binder contents, where cement was replaced with increasing amounts of fly ash (or fly ash in combination with aerial lime). An air entrainment agent and a binding agent were incorporated in the mixes as well. Additionally, five sand mortars were produced for comparative purposes.

The tests performed include bulk density, open porosity, dynamic elasticity modulus, *Poisson* coefficient, compressive and flexural strengths, ultrasonic pulse velocity, adhesion to the substrate, rebound index, capillary water absorption coefficient, drying index, water absorption under low pressure and thermal conductivity.

All mortars presented low bulk density and high open porosity. The reduction of cement binder content led to lower thermal conductivity and a decrease of the mechanical properties. This trend was observed in all mortars, yet in clay mortars it was less evident. Thus, clay mortars with up to 35% fly ash as partial substitute of cement seem to be the best compromise between a low thermal conductivity and better mechanical properties.

**Keywords:** thermal mortar; granulated cork; expanded clay; fly ash; aerial lime; mechanical and physical performance.

# Índice geral

Agradecimentos.....	I
Resumo .....	II
Abstract .....	III
Índice de figuras .....	VII
Índice de tabelas .....	X
Abreviaturas .....	XI
Simbologia.....	XII
1. Introdução.....	1
1.1 Considerações iniciais .....	1
1.2. Objectivos e metodologia da dissertação.....	1
1.3. Estrutura da dissertação.....	2
2. Estado da arte .....	3
2.1 Considerações gerais .....	3
2.2 Argamassas térmicas ou de desempenho térmico melhorado .....	3
2.2.1 Exigências funcionais das argamassas de revestimento .....	3
2.2.2 Revestimentos de desempenho térmico melhorado .....	4
2.2.3 Características das argamassas de desempenho térmico melhorado.....	5
2.3 Constituintes das argamassas.....	5
2.3.1 Agregados de cortiça e argila expandidas.....	5
2.3.2 Pasta ligante .....	8
2.3.3 Adjuvantes .....	13
2.4 Estudos já realizados sobre a influência de ligantes e agregados.....	14
2.5 Síntese do capítulo .....	17
3. Campanha experimental .....	21
3.1 Considerações gerais .....	21
3.2 Descrição geral do plano de ensaios .....	21
3.2.1 Fase 1 - Campanha preliminar .....	21
3.2.2 Fase 2 - Campanha experimental.....	22
3.3 Ensaios de caracterização dos materiais .....	22
3.3.1 Análise granulométrica.....	22

3.3.2 Baridade.....	24
3.4 Produção de argamassas.....	25
3.5 Preparação e moldagem .....	26
3.6 Armazenamento e cura .....	27
3.7 Ensaio de caracterização das argamassas .....	28
3.7.1 Porosidade aparente e massa volúmica aparente .....	28
3.7.2 Módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de <i>Poisson</i> .....	29
3.7.3 Resistência à tracção por flexão .....	30
3.7.4 Resistência à compressão .....	31
3.7.5 Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas.....	31
3.7.6 Ensaio de arrancamento por tracção ( <i>pull-off</i> ) .....	33
3.7.7 Índice esclerométrico .....	34
3.7.8 Absorção de água por capilaridade .....	34
3.7.9 Índice de secagem .....	35
3.7.10 Permeabilidade à água líquida sob baixa pressão (tubo de <i>Karsten</i> ) .....	36
3.7.11 Coeficiente de condutibilidade térmica .....	37
3.8 Síntese do capítulo .....	38
4. Apresentação e discussão dos resultados.....	41
4.1 Considerações gerais .....	41
4.2 Fase 1 - Campanha preliminar .....	41
4.2.1 Massa volúmica aparente .....	41
4.2.2 Módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de <i>Poisson</i> .....	42
4.2.3 Resistência à tracção por flexão .....	43
4.2.4 Resistência à compressão.....	44
4.2.5 Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas.....	45
4.2.6 Coeficiente de condutibilidade térmica .....	45
4.3 Fase 2 - Campanha experimental .....	46
4.3.1 Porosidade aparente e massa volúmica aparente .....	46
4.3.2 Módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de <i>Poisson</i> .....	50
4.3.3 Resistência à tracção por flexão .....	53
4.3.4 Resistência à compressão.....	56

4.3.5 Velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas.....	60
4.3.6 Ensaio de arrancamento por tracção ( <i>pull-off</i> ) .....	64
4.3.7 Índice esclerométrico .....	66
4.3.8 Absorção de água por capilaridade .....	67
4.3.9 Índice de secagem .....	69
4.3.10 Permeabilidade à água líquida sob baixa pressão (tubo de <i>Karsten</i> ) .....	71
4.3.11 Coeficiente de condutibilidade térmica .....	72
4.4 Síntese dos resultados .....	77
5. Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	83
5.1 Considerações finais .....	83
5.2 Conclusões gerais .....	83
5.3 Propostas de desenvolvimentos futuros.....	85
Referências bibliográficas .....	87
Anexos.....	A-1
Anexo A1 - Massa volúmica aparente (Fase 1) .....	A-2
Anexo A2 - Módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de <i>Poisson</i> (Fase 1) .....	A-2
Anexo A3 - Resistência à tracção por flexão (Fase 1).....	A-3
Anexo A4 - Resistência à compressão (Fase 1).....	A-3
Anexo A5 - Velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas (Fase 1).....	A-4
Anexo A6 - Coeficiente de condutibilidade térmica (Fase 1) .....	A-4
Anexo A7 - Porosidade aparente e massa volúmica aparente (Fase 2) .....	A-5
Anexo A8 - Módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de <i>Poisson</i> (Fase 2) .....	A-11
Anexo A9 - Resistência à tracção por flexão (Fase 2).....	A-15
Anexo A10 - Resistência à compressão (Fase 2).....	A-19
Anexo A11 - Velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas (Fase 2).....	A-22
Anexo A12 - Ensaio de arrancamento por tracção (Fase 2).....	A-29
Anexo A13 - Índice esclerométrico (Fase 2) .....	A-30
Anexo A14 - Permeabilidade à água líquida sob baixa pressão - tubo de <i>Karsten</i> (Fase 2) ..	A-31
Anexo A15 - Coeficiente de condutibilidade térmica (Fase 2) .....	A-32



## Índice de figuras

Figura 2.1 - Estrutura microscópica da cortiça observada por MEV (Silva et al., 2005) .....	6
Figura 2.2 - Granulado de cortiça expandida [W1] .....	6
Figura 2.3 - Grânulos de argila expandida [W2] .....	8
Figura 2.4 - Pormenor da estrutura porosa de um grânulo de argila expandida [W2].....	8
Figura 2.5 - Clínquer (Gomes et al., 2013) .....	9
Figura 2.6 - Cal viva [W3].....	10
Figura 2.7 - Cal hidratada [W3] .....	10
Figura 3.1 - Areia.....	24
Figura 3.2 - Argila expandida .....	24
Figura 3.3 - Granulado de cortiça expandida .....	24
Figura 3.4 - Determinação da baridade .....	25
Figura 3.5 - Cimento.....	25
Figura 3.6 - Cinzas volantes.....	25
Figura 3.7 - Cal aérea hidratada .....	25
Figura 3.8 - Amassadura mecânica .....	26
Figura 3.9 - Molde para provetes normalizados e compactação da argamassa .....	27
Figura 3.10 - Molde para provetes prismáticos 80x70x25 mm .....	27
Figura 3.11 - Cofragem e humedecimento do tijolo .....	27
Figura 3.12 - Colocação de provetes no exsiccador.....	28
Figura 3.13 - Realização do ensaio.....	28
Figura 3.14 - Equipamento GrindoSonic MK5 .....	29
Figura 3.15 - Modo de vibração à flexão.....	30
Figura 3.16 - Modo de vibração à torção .....	30
Figura 3.17 - Prensa para ensaios de resistência mecânica .....	30
Figura 3.18 - Spider 8.....	30
Figura 3.19 - Prensa para ensaios de resistência à tracção por flexão .....	30
Figura 3.20 - Prensa para ensaios de resistência à compressão.....	31
Figura 3.21 - Equipamento PUNDIT .....	32
Figura 3.22 - Realização do ensaio (método directo) .....	32
Figura 3.23 - Método indirecto (esquema da norma EN 12504-4) .....	33
Figura 3.24 - Realização do ensaio (método indirecto) .....	33
Figura 3.25 - Realização de entalhes com a máquina de corte.....	33
Figura 3.26 - Pormenor das pastilhas e máquina de arrancamento.....	33
Figura 3.27 - Realização do ensaio.....	33
Figura 3.28 - Alisamento da superfície .....	34
Figura 3.29 - Realização do ensaio com esclerómetro pendular do tipo PT .....	34
Figura 3.30 - Colocação de provetes no tabuleiro .....	35
Figura 3.31 - Tabuleiro coberto para evitar a evaporação da água.....	35
Figura 3.32 - Secagem dos provetes .....	36

Figura 3.33 - Tubos de <i>Karsten</i> .....	37
Figura 3.34 - Ensaio em provete .....	38
Figura 3.35 - Ensaio em modelo argamassa-tijolo.....	38
Figura 4.1 - Massa volúmica aparente (Fase 1) .....	41
Figura 4.2 - Módulo de elasticidade dinâmico (Fase 1).....	42
Figura 4.3 - Coeficiente de <i>Poisson</i> (Fase 1).....	42
Figura 4.4 - Resistência à tracção por flexão (Fase 1) .....	43
Figura 4.5 - Resistência à compressão (Fase 1) .....	44
Figura 4.6 - Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas (Fase 1) .....	45
Figura 4.7 - Coeficiente de condutibilidade térmica medido aos 28 dias e em provetes no estado seco .....	46
Figura 4.8 - Variação na porosidade aparente relativamente às argamassas de cimento ( $CI^{100AE}$ , $CI^{60GC}_{40AE}$ , $CI^{60AE}_{40GC}$ e $CI^{100A}$ , respectivamente).....	48
Figura 4.9 - Variação na porosidade aparente relativamente às argamassas de areia ( $CI^{100A}$ , $CICV20^{100A}$ , $CICV35^{100A}$ , $CICV50^{100A}$ e $CICV10CA40^{100A}$ , respectivamente) .....	48
Figura 4.10 - Variação na massa volúmica aparente, calculado pelo método geométrico, relativamente às argamassas de cimento ( $CI^{100GC}$ , $CI^{100AE}$ , $CI^{60GC}_{40AE}$ , $CI^{60AE}_{40GC}$ e $CI^{100A}$ , respectivamente) .....	49
Figura 4.11 - Variação na massa volúmica aparente, calculado pelo método geométrico, relativamente às argamassas de areia ( $CI^{100A}$ , $CICV20^{100A}$ , $CICV35^{100A}$ , $CICV50^{100A}$ e $CICV10CA40^{100A}$ , respectivamente).....	49
Figura 4.12 - Variação no módulo de elasticidade dinâmico relativamente às argamassas de cimento ( $CI^{100GC}$ , $CI^{100AE}$ , $CI^{60GC}_{40AE}$ , $CI^{60AE}_{40GC}$ e $CI^{100A}$ , respectivamente).....	51
Figura 4.13 - Variação no coeficiente de <i>Poisson</i> relativamente às argamassas de cimento ( $CI^{100GC}$ , $CI^{100AE}$ , $CI^{60GC}_{40AE}$ , $CI^{60AE}_{40GC}$ e $CI^{100A}$ , respectivamente).....	51
Figura 4.14 - Variação no módulo de elasticidade dinâmico relativamente às argamassas de areia ( $CI^{100A}$ , $CICV20^{100A}$ , $CICV35^{100A}$ , $CICV50^{100A}$ e $CICV10CA40^{100A}$ , respectivamente).....	52
Figura 4.15 - Variação no coeficiente de <i>Poisson</i> relativamente às argamassas de areia ( $CI^{100A}$ , $CICV20^{100A}$ , $CICV35^{100A}$ , $CICV50^{100A}$ e $CICV10CA40^{100A}$ , respectivamente) .....	52
Figura 4.16 - Relação entre a porosidade aparente e o módulo de elasticidade dinâmico.....	53
Figura 4.17 - Relação entre a massa volúmica aparente e o módulo de elasticidade dinâmico	53
Figura 4.18 - Variação na resistência à tracção relativamente às argamassas de cimento ( $CI^{100GC}$ , $CI^{100AE}$ , $CI^{60GC}_{40AE}$ , $CI^{60AE}_{40GC}$ e $CI^{100A}$ , respectivamente) .....	55
Figura 4.19 - Variação na resistência à tracção relativamente às argamassas de areia ( $CI^{100A}$ , $CICV20^{100A}$ , $CICV35^{100A}$ , $CICV50^{100A}$ e $CICV10CA40^{100A}$ , respectivamente) .....	55
Figura 4.20 - Variação na resistência à compressão relativamente às argamassas de cimento ( $CI^{100GC}$ , $CI^{100AE}$ , $CI^{60GC}_{40AE}$ , $CI^{60AE}_{40GC}$ e $CI^{100A}$ , respectivamente).....	57
Figura 4.21 - Variação na resistência à compressão relativamente às argamassas de areia ( $CI^{100A}$ , $CICV20^{100A}$ , $CICV35^{100A}$ , $CICV50^{100A}$ e $CICV10CA40^{100A}$ , respectivamente).....	58
Figura 4.22 - Relação entre a porosidade aparente e a resistência à compressão .....	59

Figura 4.23 - Relação entre a massa volúmica aparente e a resistência à compressão .....	59
Figura 4.24 - Relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão	59
Figura 4.25 - Variação na velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas relativamente às argamassas de cimento (CI <sup>100GC</sup> , CI <sup>100AE</sup> , CI <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub> , CI <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub> e CI <sup>100A</sup> , respectivamente) .....	61
Figura 4.26 - Variação na velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas relativamente às argamassas de areia (CI <sup>100A</sup> , CICV20 <sup>100A</sup> , CICV35 <sup>100A</sup> , CICV50 <sup>100A</sup> e CICV10CA40 <sup>100A</sup> , respectivamente) .....	62
Figura 4.27 - Relação entre a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas obtida pelo método directo e indirecto (cálculo das médias e método das dromocrónicas) .....	63
Figura 4.28 - Relação entre a porosidade aparente e a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas .....	64
Figura 4.29 - Relação entre a massa volúmica aparente e a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas .....	64
Figura 4.30 - Relação entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas e a resistência à compressão .....	64
Figura 4.31 - Relação entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas e o módulo de elasticidade dinâmico .....	64
Figura 4.32 - Tensão de aderência ao suporte .....	65
Figura 4.33 - Índice esclerométrico .....	66
Figura 4.34 - Curvas de absorção de água por capilaridade .....	68
Figura 4.35 - Variação no coeficiente de capilaridade relativamente às argamassas de cimento (CI <sup>100AE</sup> , CI <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub> , CI <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub> e CI <sup>100A</sup> , respectivamente) .....	69
Figura 4.36 - Variação no coeficiente de capilaridade relativamente às argamassas de areia (CI <sup>100A</sup> , CICV20 <sup>100A</sup> , CICV35 <sup>100A</sup> , CICV50 <sup>100A</sup> e CICV10CA40 <sup>100A</sup> , respectivamente) .....	69
Figura 4.37 - Curvas de secagem .....	71
Figura 4.38 - Coeficientes de absorção de água sob baixa pressão aos 60 min .....	72
Figura 4.39 - Variação do coeficiente de condutibilidade térmica relativamente às argamassas de cimento (CI <sup>100GC</sup> , CI <sup>100AE</sup> , CI <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub> , CI <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub> e CI <sup>100A</sup> , respectivamente) .....	74
Figura 4.40 - Variação do coeficiente de condutibilidade térmica relativamente às argamassas de areia (CI <sup>100A</sup> , CICV20 <sup>100A</sup> , CICV35 <sup>100A</sup> , CICV50 <sup>100A</sup> e CICV10CA40 <sup>100A</sup> , respectivamente) .....	74
Figura 4.41 - Relação entre o coeficiente de condutibilidade térmica e a massa volúmica aparente .....	76
Figura 4.42 - Relação entre o coeficiente de condutibilidade térmica e a resistência à compressão .....	76
Figura 4.43 - Relação entre o coeficiente de condutibilidade térmica e módulo de elasticidade dinâmico .....	76
Figura 4.44 - Relação entre o coeficiente de condutibilidade térmica e a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas .....	76

## Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Requisitos para argamassas térmicas .....	5
Tabela 2.2 - Principais constituintes do clínquer .....	9
Tabela 2.3 - Características dos principais constituintes do clínquer .....	9
Tabela 2.4 - Características das argamassas de cimento e cal aérea .....	12
Tabela 2.5 - Características de argamassas estudadas por outros autores .....	18
Tabela 3.1 - Argamassas em estudo na campanha preliminar .....	22
Tabela 3.2 - Argamassas produzidas na campanha experimental .....	23
Tabela 3.3 - Ensaio de caracterização dos materiais .....	23
Tabela 3.4 - Distribuição granulométrica das curvas utilizadas (% de volume) .....	24
Tabela 3.5 - Baridade média dos agregados e ligantes constituintes das argamassas .....	25
Tabela 3.6 - Constituintes dos ligantes utilizados .....	25
Tabela 3.7 - Ensaio realizado em cada uma das fases e provetes utilizados .....	27
Tabela 3.8 - Número de ensaios realizados .....	39
Tabela 4.1 - Massa volúmica aparente (Fase 1) .....	41
Tabela 4.2 - Módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de <i>Poisson</i> (Fase 1) .....	42
Tabela 4.3 - Resistência à tracção por flexão (Fase 1) .....	43
Tabela 4.4 - Resistência à compressão (Fase 1) .....	44
Tabela 4.5 - Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas - método directo (Fase 1) .....	45
Tabela 4.6 - Coeficientes de condutibilidade térmica aos 28 dias e em provetes secos (Fase 1) .....	46
Tabela 4.7 - Porosidade aparente e massa volúmica aparente (Fase 2) .....	47
Tabela 4.8 - Módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de <i>Poisson</i> (Fase 2) .....	50
Tabela 4.9 - Resistência à tracção por flexão (Fase 2) .....	54
Tabela 4.10 - Resistência à compressão (Fase 2) .....	57
Tabela 4.11 - Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas - método directo e indirecto (Fase 2) .....	60
Tabela 4.12 - Tensão de aderência .....	65
Tabela 4.13 - Índice esclerométrico .....	66
Tabela 4.14 - Coeficiente de absorção de água por capilaridade .....	67
Tabela 4.15 - Índice de secagem .....	70
Tabela 4.16 - Volume de água absorvido aos 60 min e coeficiente de absorção de água sob baixa pressão .....	72
Tabela 4.17 - Coeficientes de condutibilidade térmica aos 28 dias, em provetes secos e em modelos argamassa-tijolo (Fase 2) .....	73
Tabela 4.18 - Síntese dos resultados (Fases 1 e 2) .....	80

## **Abreviaturas**

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CEN - *Comité Européen de Normalisation*

EN - *European Standard*

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

RILEM - *Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions*

## **Simbologia**

### **Fase 1 - Campanha preliminar**

A<sub>CI</sub> - argamassa com 100% cimento; 100% areia; sem adjuvantes

B<sub>CI</sub> - argamassa com 100% cimento; 100% areia; 0,075% éter de celulose

D<sub>CI</sub> - argamassa com 100% cimento; 100% areia; 0,075% éter de celulose e 0,05% tensioactivo

I<sub>CI<sub>CV</sub>50</sub> - argamassa com 50% cimento e 50% de cinzas volantes; 100% areia; 0,075% éter de celulose e 0,05% tensioactivo

### **Fase 2 - Campanha experimental**

CI<sup>100GC</sup> - argamassa com 100% cimento; 100% granulado de cortiça expandida

CI<sup>100AE</sup> - argamassa com 100% cimento; 100% argila expandida

CI<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub> - argamassa com 100% cimento; 60% granulado de cortiça expandida e 40% argila expandida

CI<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub> - argamassa com 100% cimento; 60% argila expandida e 40% granulado de cortiça expandida

CI<sup>100A</sup> - argamassa com 100% cimento; 100% areia

CICV20<sup>100GC</sup> - argamassa com 80% cimento e 20% cinzas volantes; 100% granulado de cortiça expandida

CICV20<sup>100AE</sup> - argamassa com 80% cimento e 20% cinzas volantes; 100% argila expandida

CICV20<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub> - argamassa com 80% cimento e 20% cinzas volantes; 60% granulado de cortiça expandida e 40% argila expandida

CICV20<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub> - argamassa com 80% cimento e 20% cinzas volantes; 60% argila expandida e 40% granulado de cortiça expandida

CICV20<sup>100A</sup> - argamassa com 80% cimento e 20% cinzas volantes; 100% areia

CICV35<sup>100GC</sup> - argamassa com 65% cimento e 35% cinzas volantes; 100% granulado de cortiça expandida

CICV35<sup>100AE</sup> - argamassa com 65% cimento e 35% cinzas volantes; 100% argila expandida

CICV35<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub> - argamassa com 65% cimento e 35% cinzas volantes; 60% granulado de cortiça expandida e 40% argila expandida

CICV35<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub> - argamassa com 65% cimento e 35% cinzas volantes; 60% argila expandida e 40% granulado de cortiça expandida

CICV35<sup>100A</sup> - argamassa com 65% cimento e 35% cinzas volantes; 100% areia

CICV50<sup>100GC</sup> - argamassa com 50% cimento e 50% cinzas volantes; 100% granulado de cortiça expandida

CICV50<sup>100AE</sup> - argamassa com 50% cimento e 50% cinzas volantes; 100% argila expandida

CICV50<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub> - argamassa com 50% cimento e 50% cinzas volantes; 60% granulado de cortiça expandida e 40% argila expandida

CICV50<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub> - argamassa com 50% cimento e 50% cinzas volantes; 60% argila expandida e 40% granulado de cortiça expandida

CICV50<sup>100A</sup> - argamassa com 50% cimento e 50% cinzas volantes; 100% areia

CICV10CA40<sup>100GC</sup> - argamassa com 50% cimento, 10% cinzas volantes e 40% cal aérea; 100% granulado de cortiça expandida

CICV10CA40<sup>100AE</sup> - argamassa com 50% cimento, 10% cinzas volantes e 40% cal aérea; 100% argila expandida

CICV10CA40<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub> - argamassa com 50% cimento, 10% cinzas volantes e 40% cal aérea; 60% granulado de cortiça expandida e 40% argila expandida

CICV10CA40<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub> - argamassa com 50% cimento, 10% cinzas volantes e 40% cal aérea; 60% argila expandida e 40% granulado de cortiça expandida

CICV10CA40<sup>100A</sup> - argamassa com 50% cimento, 10% cinzas volantes e 40% cal aérea; 100% areia





# 1. Introdução

## 1.1 Considerações iniciais

Actualmente, exige-se mais aos revestimentos de paredes do que apenas a função de protecção do edifício face a acções externas. As crescentes preocupações ambientais, transversais a toda a Sociedade, materializam-se na área da construção numa necessidade de atingir um conforto térmico e qualidade do ar interior com o menor consumo de energia possível. Neste sentido, o desenvolvimento de revestimentos com características térmicas melhoradas, com recurso a materiais sustentáveis, assume extrema importância.

Em Portugal, as preocupações energéticas e de sustentabilidade deram origem a legislação sobre o tema em 1990, com a entrada em vigor do RCCTE (Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios), substituído em 2013 pelo REH (Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (Decreto-Lei nº 118/2013)). Este regulamento impõe requisitos de conforto térmico não só aos edifícios novos, mas também aos reabilitados, com o objectivo de aumentar o conforto interior e a durabilidade da envolvente, minimizando, ao mesmo tempo, o consumo de energia (Veiga, 2010).

É neste enquadramento que surgem as argamassas de desempenho térmico melhorado. Estas resultam da substituição da areia, total ou parcialmente, por agregados isolantes. No entanto, tal substituição, apesar de benéfica do ponto de vista do isolamento térmico, tem como consequência uma perda de resistência mecânica. Assim, o desafio será desenvolver argamassas com um bom desempenho térmico, mas também com características mecânicas que permitam o cumprimento das suas normais funções enquanto revestimento (Veiga, 2012).

O efeito da introdução de agregados isolantes em argamassas tem sido alvo de vários estudos, mas o mesmo não se verifica com os ligantes. Neste sentido foi realizada uma campanha experimental que visa estudar a influência da pasta ligante, em associação com diferentes agregados isolantes, nas propriedades no estado endurecido de argamassas com desempenho térmico melhorado. Nesta campanha, o ligante mais corrente, o cimento, foi substituído por diferentes percentagens de cinzas volantes, isoladamente ou em conjunto com cal aérea. Também a areia foi totalmente substituída por granulado de cortiça expandida, argila expandida ou por uma mistura dos dois materiais.

A presente dissertação insere-se num projecto financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), intitulado *NANORENDER - Performance of silica nanoaerogel-based renders*, tendo sido desenvolvida em paralelo com outra, onde foram estudadas as mesmas argamassas, mas no estado fresco.

## 1.2. Objectivos e metodologia da dissertação

Com a presente dissertação, pretende-se avaliar a influência da pasta ligante, em associação com diferentes agregados isolantes, nas propriedades no estado endurecido de argamassas com

desempenho térmico melhorado.

Assim, os objectivos desta dissertação são:

- numa fase preliminar, perceber a influência dos adjuvantes utilizados (éter de celulose e tensioactivo) em algumas propriedades das argamassas (resistência à tracção por flexão, resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, coeficiente de *Poisson*, velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, massa volúmica aparente e condutibilidade térmica);
- avaliar a influência de diferentes percentagens de incorporação de cinzas volantes (isoladamente ou em conjunto com cal aérea) no desempenho térmico, mecânico e físico de argamassas leves, através de ensaios de condutibilidade térmica, resistência à tracção por flexão, resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, coeficiente de *Poisson*, velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, arrancamento por tracção (*pull-off*), esclerómetro pendular, porosidade e massa volúmica aparentes, absorção de água por capilaridade, secagem e absorção de água sob baixa pressão (tubo de *Kars-ten*);
- analisar o efeito dos agregados utilizados (granulado de cortiça expandida e argila expandida) nas propriedades referidas no ponto anterior e perceber o comportamento de cada um face às alterações na pasta ligante.

### **1.3. Estrutura da dissertação**

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, sendo o primeiro destinado a uma introdução ao tema em estudo e apresentação da metodologia e objectivos.

No capítulo 2, são referidas as exigências funcionais de argamassas de revestimento e, em particular, as características requeridas a argamassas de desempenho térmico melhorado. São também descritos os materiais constituintes das argamassas produzidas e ainda apresentados estudos de outros autores sobre a influência de ligantes e agregados nas suas propriedades mecânicas e físicas.

No capítulo 3, é detalhado o trabalho experimental desenvolvido, começando pela caracterização dos materiais utilizados e seguindo-se a descrição das duas fases em que se dividiu o trabalho: campanha preliminar (fase 1) e campanha experimental (fase 2).

No capítulo 4, são apresentados e analisados os resultados obtidos nas campanhas preliminar e experimental. Os resultados são também comparados, quando possível, com os determinados por outros autores. São ainda discutidas correlações entre os vários ensaios.

No capítulo 5, são resumidas as conclusões resultantes das campanhas laboratoriais e, com base nestas, sugeridas algumas propostas para desenvolvimentos futuros.

A dissertação termina com a listagem das referências bibliográficas, normas e regulamentos consultados. Em anexo, são expostos os resultados individuais de cada ensaio.

## **2. Estado da arte**

### **2.1 Considerações gerais**

No presente capítulo, é feita uma apresentação sobre argamassas de desempenho térmico melhorado. Primeiramente, são enumeradas as exigências a que qualquer argamassa de revestimento deve obedecer, passando-se em seguida a uma descrição geral sobre revestimentos de desempenho térmico melhorado e sobre as características exigidas a uma argamassa térmica. Em seguida, são descritos os constituintes deste tipo de argamassa, com destaque para os utilizados na presente campanha experimental e, por fim, são apresentados alguns estudos de caracterização física e mecânica já realizados sobre argamassas térmicas.

### **2.2 Argamassas térmicas ou de desempenho térmico melhorado**

#### **2.2.1 Exigências funcionais das argamassas de revestimento**

Os revestimentos têm um papel muito importante no desempenho de paredes, já que constituem a camada de protecção face às acções climáticas, mecânicas e ambientais a que estas estão expostas (Frade *et al.*, 2012). No caso de revestimentos exteriores, a impermeabilização constitui um dos aspectos mais importantes, já que a penetração de água nas paredes afecta a condutibilidade térmica dos materiais isolantes aí existentes, reduzindo o isolamento térmico do edifício e, conseqüentemente, aumentando o consumo de energia e a probabilidade de ocorrência de condensações (Veiga, 1998).

Assim sendo, de forma a cumprir adequadamente a sua função, as argamassas de revestimento devem respeitar alguns requisitos, tais como (Veiga, 1998):

- trabalhabilidade;
- resistência à fendilhação;
- capacidade de impermeabilização em zona não fendilhada;
- permeabilidade ao vapor de água;
- aderência ao suporte;
- resistência aos choques;
- compatibilidade com o suporte;
- aspecto estético;
- durabilidade.

Para além destes, os requisitos de conforto térmico estão cada vez mais exigentes, associados a uma necessidade de melhoria da qualidade do ambiente interior e à eficiência energética dos edifícios (Labrincha *et al.*, 2006).

Em Portugal, o isolamento térmico é utilizado na construção de edifícios desde a década de 1950, mas apenas no início da década de 1990 entra em vigor o primeiro RCCTE (Regulamento

das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios). Este foi actualizado em 2006 e substituído em 2013 pelo REH (Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (Decreto-Lei nº 118/2013)). Este regulamento impõe requisitos de conforto térmico aos edifícios novos e remodelados, de forma a minimizar o consumo de energia e, ao mesmo tempo, aumentar o conforto interior e a durabilidade da envolvente (Veiga, 2010).

### **2.2.2 Revestimentos de desempenho térmico melhorado**

A transferência de calor entre o exterior e interior de um edifício ocorre quando existe uma diferença de temperatura entre os dois espaços, e sempre do ambiente mais quente para o mais frio. Esta transferência pode dar-se por condução, convecção ou radiação e ainda por evaporação e condensação do vapor de água, se se verificarem fenómenos de transferência de massa (água). O modo segundo o qual se processa a transferência de calor entre um edifício e a sua envolvente é determinado pelas características físicas e construtivas do mesmo, consistindo, geralmente, numa combinação dos modos referidos (Labrincha *et al.*, 2006).

A condutibilidade térmica é uma propriedade característica de um material homogéneo, sendo definida como a quantidade de calor, por unidade de tempo, que atravessa uma camada de espessura e área unitárias desse material, por unidade de diferença de temperatura entre as suas duas faces (Labrincha *et al.*, 2006).

Na selecção de um material isolante, deve-se ter em conta o seu custo, resistência à compressão, permeabilidade ao vapor de água e, mais importante, o seu coeficiente de condutibilidade térmica, já que o desempenho energético de um edifício está muito dependente da condutibilidade térmica dos materiais utilizados (Ng & Low, 2010; Abdou & Budaiwi, 2013). Esta depende da massa volúmica, temperatura, teor de humidade e porosidade de cada material (Al-Ajlan, 2006; Franco, 2007).

Os sistemas de isolamento pelo exterior têm como vantagens a não redução da área interior, correcção de pontes térmicas (o que reduz as condensações), protecção da estrutura e alvenaria contra choques térmicos (aumentando assim a sua durabilidade), e ainda a melhoria no desempenho térmico no Verão, ao tirar partido da inércia térmica das paredes exteriores (Veiga, 2010; 2012).

Segundo Veiga (2012), os revestimentos de isolamento térmico pelo exterior dividem-se em:

- revestimentos compósitos de isolamento térmico pelo exterior (ETICS);
- revestimentos constituídos por painéis isolantes fixados directamente ao suporte (*Vêtu-res*);
- revestimentos de fachada ventilada com isolante na caixa-de-ar;
- revestimentos aderentes constituídos por argamassas térmicas.

As argamassas térmicas, sendo mais fáceis de aplicar do que os ETICS, são, em princípio, menos eficientes pois, para a mesma espessura, têm maior condutibilidade térmica. Assim, para se conseguir a mesma resistência térmica, será necessário aplicar uma argamassa com maior espessura, o que poderá acarretar problemas de aderência e coesão e diminuir a resistência ao choque. Assim, o grande desafio consiste em encontrar argamassas térmicas com menores coeficientes de condutibilidade térmica e, ao mesmo tempo, maior resistência mecânica, de modo a que as suas normais funções de revestimento não sejam comprometidas (Veiga, 2012).

### 2.2.3 Características das argamassas de desempenho térmico melhorado

As argamassas térmicas são constituídas por agregados isolantes e devem ter massas volúmicas inferiores a 600 kg/m<sup>2</sup> e ser aplicadas com uma espessura mínima de 40 mm. Normalmente, são complementadas por uma camada de acabamento armada com rede de fibra de vidro (Veiga, 2012). São referenciadas na norma europeia EN 998-1 (CEN, 2010) onde têm a designação de argamassas de revestimento de isolamento térmico, estando divididas em duas classes de isolamento, T1 ou T2, conforme o seu coeficiente de condutibilidade térmica é inferior a 0,1 ou 0,2 W/(m·K), respectivamente. Para além desta condição, uma argamassa térmica deve ter ainda uma resistência à compressão entre 0,4 e 5 MPa, coeficiente de absorção de água por capilaridade inferior a 0,40 kg/m<sup>2</sup>.min<sup>0,5</sup> e coeficiente de permeabilidade ao vapor de água inferior a 15 (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Requisitos para argamassas térmicas (EN 998-1, CEN 2010)

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

## 2.3 Constituintes das argamassas

### 2.3.1 Agregados de cortiça e argila expandidas

Os agregados mais comuns em argamassas são areias siliciosas, podendo contudo ser utilizadas areias de outros tipos (calcárias, graníticas ou basálticas) ou ainda resultantes de subprodutos da exploração e preparação de rochas (Faria, 2012). Em Portugal, as areias correntes provêm do leito de rios ou areeiros, tendo granulometrias muito variáveis, que vão desde alguns micrómetros até 5 mm (Veiga, 1998).

Apesar da predominância da areia, outros agregados têm vindo a ser estudados e incorporados em argamassas, com o objectivo de melhorar as características das mesmas. Uma outra vantagem prende-se com a possibilidade de reciclagem de resíduos provenientes de várias indústrias,

o que, aliado a um menor consumo energético e de recursos naturais, torna a produção de argamassas mais sustentável. Como exemplo de agregados alternativos, tem-se os resíduos de cortiça e granulado de EPS que, em percentagens elevadas, conferem à argamassa um melhor desempenho térmico (Faria, 2012; Gonçalves *et al.*, 2012).

As argamassas de desempenho térmico melhorado caracterizam-se precisamente pela substituição total ou parcial da areia por agregados isolantes. Um isolante térmico é um material cuja relação resistência térmica / espessura é superior à de materiais de construção correntes. Logo, um bom isolante térmico deve apresentar elevada porosidade, isto é, ter uma percentagem de matéria sólida, mais condutora, tão baixa quanto possível (Labrincha *et al.*, 2006). O granulado de cortiça expandida e a argila expandida, os dois agregados isolantes utilizados nesta campanha experimental, enquadram-se nesta descrição.

#### i) **Granulado de cortiça expandida**

A cortiça é um material natural e renovável proveniente do sobreiro (*Quercus suber L.*), árvore que se encontra predominantemente em Portugal, Espanha e Argélia. Portugal é o maior produtor de cortiça, com uma área de sobreiros de mais de 720 mil hectares e uma produção anual de 175000 toneladas, o que corresponde a 52% da produção mundial. Actualmente, as principais aplicações deste material são rolhas para garrafas, pavimentos, sistemas de isolamento e aplicações aeronáuticas (Fonseca & Parresol, 2001; Gil, 2007; Panesar & Shindman, 2012).

Estima-se que cerca de 75% da cortiça existente é desperdiçada como resultado da produção de rolhas. Parte desta é aproveitada pela indústria da construção sob a forma de aglomerados de cortiça, mas grande parte continua a ser desperdiçada devido à elevada massa volúmica e/ou reduzidas dimensões dos grânulos (Karade *et al.*, 2006).

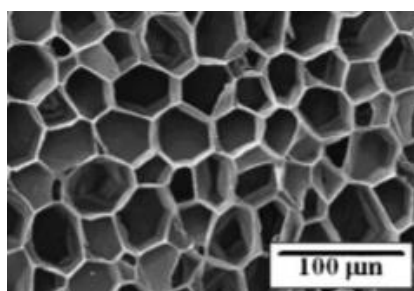


Figura 2.1 - Estrutura microscópica da cortiça observada por MEV (Silva *et al.*, 2005)



Figura 2.2 - Granulado de cortiça expandida [W1]

A cortiça é constituída por células, geralmente hexagonais, dispostas de forma compacta e regular que comunicam entre si por microcanais que atravessam a parede celular (Figura 2.1). As paredes das células apenas constituem cerca de 10 a 15% do volume total, sendo o restante espaço ocupado por ar. É esta característica, juntamente com o pequeno tamanho das células (entre 30-40  $\mu\text{m}$  de

largura e 35-45  $\mu\text{m}$  de altura), que justifica as propriedades isolantes deste material, já que a transferência de calor por condução depende apenas da quantidade de material sólido da estrutura das células, enquanto a convecção e radiação dependem do tamanho das mesmas (Gil, 2007).

Quanto à sua composição química, a cortiça é constituída maioritariamente por suberina (cerca de 40%) e lenhina (22%), sendo o primeiro composto responsável pela compressibilidade e elasticidade da cortiça e o segundo pela estrutura das paredes celulares. Em menores percentagens, estão também presentes polissacáridos (evitam o colapso das células, conferindo-lhes rigidez), ceróides (repelem a água, o que contribui para a baixa permeabilidade), taninos (responsáveis pela cor e proteção do material) e cinzas (Brás *et al.*, 2013; Gil, 2007).

Os granulados de cortiça expandida (Figura 2.2), obtidos por retrituração de partes rejeitadas ou placas defeituosas de aglomerado expandido, são utilizados como isolamento térmico, no enchimento de espaços vazios entre paredes, tectos e coberturas, e também como agregados em argamassas e betões leves. Segundo a norma NP 114 (IPQ, 1994), os granulados são definidos como fragmentos de cortiça de dimensões entre 0,25 e 22,4 mm, sendo caracterizados por uma massa volúmica de 70 a 80  $\text{kg/m}^3$  e um coeficiente de condutibilidade térmica de 0,048  $\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$  (Gil, 2007).

A utilização de cortiça em betões e argamassas melhora o seu comportamento térmico e diminui a massa volúmica, o que afecta o seu comportamento mecânico. Para além da influência da massa volúmica, as propriedades mecânicas são também condicionadas pela interacção da cortiça com o processo de hidratação do cimento (Panesar & Shindman, 2012).

## **ii) Argila expandida**

A argila expandida (Figura 2.3) é produzida a partir de grânulos de argila, previamente formados por moldagem ou fragmentação, cozidos a elevadas temperaturas (cerca de 1000 a 1250  $^\circ\text{C}$ ). Durante a cozedura, são libertados gases, o que leva à formação de pequenos poros (Figura 2.4) no interior do material (Ferreira *et al.*, 2007). Parte destes poros está ligada aos vazios entre grânulos, o que resulta numa porosidade aberta relativamente alta, entre 50 e 70%, e, conseqüentemente, em valores elevados de absorção acústica (Asdrubali & Horoshenkov, 2002).

Para além da elevada porosidade, este agregado é caracterizado por uma baixa massa volúmica (300 a 700  $\text{kg/m}^3$ ), pH neutro, alta resistência térmica e resistência mecânica relativamente elevada, aliadas a um custo reduzido (Bartolini *et al.*, 2010; Vašina *et al.*, 2006; Kalhori *et al.*, 2013).

A argila expandida possui das maiores resistências à compressão entre os agregados leves, o que a torna interessante para a indústria da construção. De facto, este material começou a ser incorporado em betões logo após a I Guerra Mundial (Ozguven & Gunduz, 2012).



Figura 2.3 - Grânulos de argila expandida [W2]



Figura 2.4 - Pormenor da estrutura porosa de um grânulo de argila expandida [W2]

### 2.3.2 Pasta ligante

Os ligantes podem ser classificados como hidráulicos ou aéreos. Ligantes hidráulicos são aqueles que têm a capacidade de fazer presa, endurecer e manter as suas propriedades ao longo do tempo, tanto em contacto com o ar como com água. Por outro lado, os ligantes aéreos apenas manifestam as mesmas características em contacto com o ar (Coutinho, 1988).

Em argamassas os ligantes mais comuns são os cimentos e as cals, dividindo-se estas em cals aéreas ou hidráulicas. Em camadas de acabamento de rebocos interiores o gesso é também utilizado (Faria, 2012).

Nesta campanha experimental, foram utilizados um ligante hidráulico (cimento), um aéreo (cal aérea hidratada) e ainda uma pozolana (cinzas volantes). A sua caracterização será apresentada nos capítulos seguintes.

#### i) Cimento

Os cimentos correntes classificam-se de acordo com a norma EN 197-1 (CEN, 2011), sendo distinguidos pelas respectivas composições e por requisitos físicos e mecânicos.

O cimento de uso mais corrente é o Portland, produzido a temperaturas entre 1300 e 1500 °C a partir de uma mistura de calcário e margas (rochas calcárias que contêm argila). Existem também outros tipos, como o cimento branco (que possibilita a obtenção de argamassas pigmentadas) e cimentos pozolânicos, onde uma parte do clínquer (Figura 2.5) é substituída por pozolanas, nomeadamente cinzas volantes (Faria, 2012).

O processo de fabrico do cimento *Portland* consiste na cozedura em forno rotativo das matérias primas em proporções adequadas (a relação em massa entre a quantidade de argila e de calcário deve ser, aproximadamente, um para quatro). Parte do material funde-se no interior do forno, dando origem a partículas com cerca de 10 a 30 mm, o designado clínquer, que, misturado com gesso e outras adições, forma o cimento Portland (Gomes *et al.*, 2013).





Figura 2.5 - Clínquer (Gomes *et al.*, 2013)

Quimicamente, o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) das rochas calcárias decompõe-se em óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), enquanto a argila presente nas margas se decompõe numa mistura de sílica (dióxido de silício,  $\text{SiO}_2$ ), alumina (óxido de alumínio,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (Gomes *et al.*, 2013). São as reacções entre estes compostos durante o processo de cozedura que originam o clínquer, cujos principais constituintes estão enumerados na Tabela 2.2.

A presa e endurecimento do cimento acontecem devido a um conjunto de reacções químicas desencadeadas pela mistura de água (reacções de hidratação) e que se prolongam no tempo. A hidratação dos silicatos de cálcio começa rapidamente com a hidratação do  $\text{C}_3\text{S}$  e continua mais lentamente devido à hidratação do  $\text{C}_2\text{S}$ , sendo estes os compostos que conferem ao cimento a sua resistência mecânica (Arandigoyen & Alvarez, 2007). As características dos principais constituintes do clínquer encontram-se resumidas na Tabela 2.3.

Tabela 2.2 - Principais constituintes do clínquer (Coutinho, 1988)

Designação	Constituição química	Abreviatura	Quantidade (%)
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	20 a 65
Silicato bicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	10 a 55
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	0 a 15
Aluminoferrato tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	5 a 15

Tabela 2.3 - Características dos principais constituintes do clínquer (Silva, 2010)

Designação	Velocidade de hidratação	Desenvolvimento de resistência mecânica	Resistência ao ataque químico
Silicato tricálcico	Elevada	Rápido e prolongado	Pequena
Silicato bicálcico	Moderada	Lento e muito prolongado	Moderada
Aluminato tricálcico	Muito elevada	Muito rápido e de curta duração	Muito pequena
Aluminoferrato tetracálcico	Elevada	Lento e pouco significativo	Elevada

Actualmente, as argamassas de cimento têm um uso generalizado na construção, tendo substituído as argamassas de cal, devido à sua maior resistência mecânica e menor tempo de presa e endurecimento. Contudo, intervenções de reabilitação em que são usadas argamassas de cimento tendem a não ser bem sucedidas e provocar até uma aceleração no processo de degradação, o que leva a crer que argamassas apenas com este ligante não são indicadas para a reabilitação de edifícios antigos. Entre as desvantagens associadas a esta aplicação, contam-se

a incompatibilidade com paredes de alvenaria de pedra, um elevado teor de sais solúveis e uma baixa deformabilidade quando comparadas com argamassas de cal (Arandigoyen & Alvarez, 2007).

De um ponto de vista ambiental, os cimentos têm um maior impacto do que as cals, devido à energia associada à sua produção, fruto das elevadas temperaturas e processo de moagem necessários. A indústria cimenteira tem vindo a desenvolver esforços no sentido de alterar esta situação, através da utilização de combustíveis alternativos (Faria, 2012).

## ii) Cal aérea hidratada

Segundo a NP EN 459-1 (IPQ, 2011), as cals dividem-se em aéreas ou hidráulicas, podendo as primeiras ser classificadas como cals cálcicas (CL) ou dolomíticas (DL), e as segundas como cals hidráulicas naturais (NHL), cals hidráulicas (HL) ou formuladas (FL).

As cals aéreas são provenientes de rocha calcária pura ou de calcários magnesianos, enquanto as cals hidráulicas naturais provêm de calcários com alguma argila. As cals hidráulicas e formuladas são geralmente produzidas a temperaturas mais elevadas do que as anteriores, podendo conter algumas adições (como gesso, fíleres ou clínquer de cimento *Portland*). A diferença entre temperaturas de cozedura torna as cals aéreas ou hidráulicas naturais mais sustentáveis do que as cals hidráulicas ou formuladas e os cimentos, já que estes necessitam de menor energia na sua produção (Faria, 2012).

A produção de cal aérea pode ser dividida em duas fases: calcinação e hidratação ou extinção. Após a amassadura, a argamassa de cal endurece por evaporação da água e por processos de carbonatação.



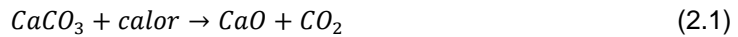
Figura 2.6 - Cal viva [W3]



Figura 2.7 - Cal hidratada [W3]

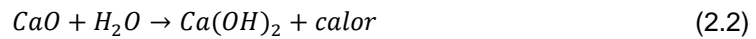
- Calcinação

A calcinação consiste na dissociação do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), presente em rochas calcárias, em óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). A rocha calcária, após britagem, é cozida em fornos contínuos verticais ou rotativos a temperaturas entre 850 e 1100 °C, ocorrendo a descarbonatação da matéria prima e a formação de cal viva (óxido de cálcio - Figura 2.6) (Silva, 2010).



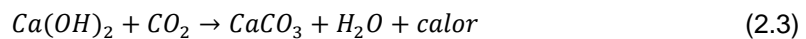
- Hidratação ou extinção

No entanto, o produto de cal utilizado como ligante é a cal hidratada (também designada por cal apagada ou extinta - Figura 2.7), resultante da reacção da cal viva com a água. Esta reacção é muito rápida, exotérmica e expansiva, sendo que o volume final de cal hidratada pode chegar a três vezes o volume inicial de óxido de cálcio (Silva, 2010).



- Carbonatação

Após a amassadura e aplicação da argamassa, o hidróxido de cálcio faz presa e endurece como resultado da evaporação e da reacção de carbonatação. Esta consiste na reacção da cal hidratada com o dióxido de carbono da atmosfera e tem como resultado carbonato de cálcio (constituinte das rochas calcárias e interveniente no processo de calcinação) (Silva, 2010).



A carbonatação, tal como a hidratação, é uma reacção exotérmica, decorrendo de forma muito lenta, o que explica os elevados tempos de presa e endurecimento das argamassas de cal. Ocorre a partir da superfície exterior para a interior, sendo necessário que a argamassa seja suficientemente porosa de modo a permitir a evaporação da água para o exterior e a penetração do dióxido de carbono para o interior (Silva, 2010).

A velocidade de carbonatação e, conseqüentemente, o endurecimento da cal são influenciados por diversos factores, nomeadamente a humidade relativa do ar, temperatura e velocidade do vento (que condicionam a evaporação da água), a concentração de dióxido de carbono na atmosfera, a espessura da camada aplicada e a porosidade da argamassa (Silva, 2010).

Após séculos de utilização em construção, hoje em dia as argamassas de cal foram substituídas por argamassas de cimento, estando a sua aplicação limitada a intervenções de reabilitação a edifícios onde este tipo de argamassa estava já presente. Os ligantes a utilizar nestas intervenções devem ser compatíveis com os materiais originais, do ponto de vista químico, físico (nomeadamente, ao nível dos processos que envolvem o transporte de água) e mecânico (a resistência e deformabilidade da nova argamassa deve ser semelhante à original), o que torna as argamassas de cal aérea atractivas em termos de reabilitação do património (Arandigoyen & Alvarez, 2007).

Contudo, as características destas argamassas, que levaram à sua substituição pelo cimento, continuam a estar presentes e ditam o seu afastamento das novas construções. As argamassas de cal aérea possuem elevados tempos de presa e endurecimento, baixa resistência mecânica, elevada absorção de água por capilaridade e alterações volumétricas devidas à retracção, o que pode provocar o aparecimento de fendas e, conseqüentemente, aumentar a permeabilidade e diminuir a aderência ao suporte (Seabra *et al.*, 2009).

As características das argamassas de cimento e cal aérea são resumidas na Tabela 2.4.

No sentido de combinar as melhores características de um e outro ligante surgem as argamassas bastardas de cimento e cal aérea, utilizadas ao nível da reabilitação de edifícios. Estas argamassas tornam-se interessantes deste ponto de vista, já que possuem propriedades hidráulicas, logo apresentando resistências superiores às argamassas de cal, mas não tão elevadas como as de cimento. O seu endurecimento é também mais rápido, o que torna mais fácil a sua aplicação (Arandigoyen & Alvarez, 2007).

Tabela 2.4 - Características das argamassas de cimento e cal aérea

<b>Cimento</b>	Elevada resistência mecânica Elevada rigidez Elevada retracção
<b>Cal aérea</b>	Presença e endurecimento lentos Baixa resistência mecânica Elevada absorção de água por capilaridade Elevada porosidade Deformabilidade Elevada permeabilidade ao vapor de água

### iii) Cinzas volantes

As pozolanas são materiais que, em presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio dos ligantes, originando compostos hidratados (Charola *et al.*, 2005). Podem ter origem natural (resultando da moagem de lavas vulcânicas meteorizadas) ou artificial (como é o caso das cinzas volantes, cinzas de casca de arroz ou outros cereais, resíduos de vidro, resíduos cerâmicos ou argilas) (Faria, 2012).

As cinzas volantes resultam da queima de combustível em centrais termoeléctricas (Fanghui *et al.*, 2015). Podem ser usadas em substituição do cimento para melhorar as suas propriedades mecânicas e diminuir a taxa de hidratação, a reactividade entre os álcalis e os agregados e ainda a permeabilidade do betão e argamassas. Contudo, os seus efeitos na condutibilidade térmica têm sido pouco estudados (Demirboga, 2003a).

As cinzas volantes têm propriedades pozolânicas devido à presença de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) amorfas, que reagem com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) produzido pela hidratação do cimento, formando-se silicato de cálcio (CSH) e aluminato de cálcio (CSH), responsáveis por um aumento na resistência e durabilidade. No entanto, a adição de cinzas volantes tende a diminuir a resistência mecânica a baixas idades. O efeito desta adição depende essencialmente da finura das cinzas utilizadas e da quantidade de cimento substituída (Fanghui *et al.*, 2015).

A introdução de cinzas volantes em argamassas como substitutos parciais dos ligantes (cimentos ou cais) tem também benefícios ambientais; ao diminuir a quantidade de ligante, reduz-se o con-

sumo de recursos minerais naturais e também o consumo de energia associado ao seu processamento. Sendo as cinzas volantes resultantes de processos industriais, acresce o benefício da utilização de um recurso que, caso contrário, iria para aterro (Faria, 2012).

Quando utilizadas em argamassas de cimento levam à fixação do hidróxido de cálcio livre, o que aumenta a durabilidade da argamassa. Se forem adicionadas a argamassas de cais aéreas, alteram o seu processo de cura, que passa a ocorrer não só por carbonatação, mas também por hidratação, tal como em argamassas de ligantes hidráulicos (Faria, 2012).

### **2.3.3 Adjuvantes**

Os adjuvantes são substâncias adicionadas durante a amassadura com o objectivo de melhorar algumas propriedades de betões e argamassas, tanto no estado fresco, como no estado endurecido. A sua dosagem não deve ultrapassar 5% da massa de ligante (Coutinho, 1973).

De entre a multiplicidade de adjuvantes existentes, os mais úteis para argamassas de revestimento são os promotores de aderência, hidrófugos, introdutores de ar, plastificantes, retentores de água e fungicidas. No entanto, devido à precisão necessária na sua dosagem, apenas são utilizados em argamassas pré-doseadas e muito raramente em argamassas correntes de obra (Veiga, 1998).

#### **i) Introdutores de ar**

Os introdutores de ar são materiais orgânicos, geralmente em pó ou em solução que, ao serem adicionados a betão ou argamassas, levam à formação de bolhas de ar de forma aproximadamente esférica e com diâmetros entre 10 µm e 1 mm, com o objectivo de melhorar a sua trabalhabilidade (Veiga, 1998; Bauer, 2005).

Quimicamente, são considerados tensoactivos, isto é, materiais fortemente adsorvidos nas interfaces ar/líquido e sólido/líquido. As suas moléculas possuem uma extremidade polar, que tem tendência a se adsorver na superfície das partículas de cimento e uma extremidade apolar (hidrofóbica). Desta forma, as partículas de cimento passam a ter um comportamento hidrofóbico. A formação de bolhas de ar é maioritariamente causada pelas moléculas que não foram adsorvidas, mas algumas que se tenham ligado ao cimento podem também contribuir para esta formação, criando um “efeito de ponte” entre partículas de cimento. As pastas nestas condições apresentam uma maior viscosidade e plasticidade e, conseqüentemente, maior trabalhabilidade, quando comparadas com pastas sem ar incorporado (Veiga, 1998; Bauer, 2005).

Para além da melhor trabalhabilidade, a introdução de ar em argamassas também reduz o seu módulo de elasticidade, exsudação e massa volúmica, o que contribui para melhorar o seu comportamento à fendilhação. As bolhas de ar provocam também um corte na capilaridade, o que se traduz numa melhor impermeabilização do revestimento e numa maior resistência ao gelo-degelo e à acção de sais, nomeadamente sulfatos (Veiga, 1998; Bauer, 2005).

Contudo, a utilização deste tipo de adjuvante apresenta algumas desvantagens. O aumento do teor de ar reduz a tensão de aderência a um substrato, devido à redução da superfície de contacto entre este e a argamassa. Segundo Alves (2002), o aumento do teor de ar em argamassas de revestimento provocou uma redução de até 55% no valor da tensão de arrancamento. Também as resistências à tracção e compressão são diminuídas, devido ao incremento na porosidade das argamassas (Veiga, 1998; Bauer, 2005).

A escolha da dosagem de introdutores de ar a utilizar, assim como o processo de amassadura, exigem alguns cuidados, já que o seu efeito depende de vários factores, tais como a finura do cimento, o seu teor de álcalis, a natureza e granulometria dos inertes e ainda o modo, tempo e velocidade de amassadura (Veiga, 1998).

#### ii) Retentores de água

Os retentores de água são materiais poliméricos, geralmente em pó, sendo os mais comumente utilizados os éteres de celulose, polímeros semi-sintéticos solúveis em água. Devido à sua natureza hidrofílica, as moléculas de água fixam-se às moléculas do adjuvante, o que explica o aumento da retenção de água e viscosidade associado à introdução destes produtos em argamassas. Para além do aumento na viscosidade, verifica-se também uma maior incorporação de ar na mistura, o que melhora a trabalhabilidade da mesma (Petit & Wirquin, 2013; Bauer, 2005).

A sua propriedade de retenção de água é particularmente importante ao prevenir a absorção de água resultante da aplicação de argamassas em suportes porosos. Evita-se assim uma insuficiente hidratação do cimento, que se traduziria na perda de propriedades mecânicas (Patural *et al.*, 2011; Veiga, 1998).

Ao reterem a água na argamassa até à reacção de presa, os adjuvantes levam a que esta decorra de forma gradual e completa. Reduzem ainda a segregação dos constituintes e melhoram a homogeneidade do produto endurecido (Paiva *et al.*, 2007; Patural *et al.*, 2011).

A principal desvantagem dos retentores de água consiste no atraso na hidratação do cimento (Khayat, 1998; Peschard *et al.*, 2004; Betioli *et al.*, 2009). Segundo Pourchez *et al.* (2006a; 2006b), este atraso pode ser da ordem de 10 minutos até várias horas.

## 2.4 Estudos já realizados sobre a influência de ligantes e agregados

Pela bibliografia consultada, é notória a maior relevância dada à substituição de agregados como forma de melhorar o desempenho térmico de argamassas. Apesar de existirem vários estudos sobre cinzas volantes ou cal aérea, estes focam-se geralmente noutras características, ignorando o efeito que estas possam ter na condutibilidade térmica de argamassas.

Na Tabela 2.5, estão resumidos, sempre que possível, os resultados dos estudos referidos de seguida.

### **i) Influência da pasta ligante**

Não foram encontrados estudos relativos a cinzas volantes ou cal aérea em argamassas com desempenho térmico melhorado. Como tal, os estudos apresentados são relativos a argamassas de areia.

Demirboga (2003a) avaliou a influência na condutibilidade térmica e resistência à compressão da introdução de cinzas volantes em argamassas de cimento. Para tal, quatro argamassas foram produzidas com uma proporção de 1:2:0,5 (ligante:areia:água) e com 0, 10, 20 e 30% de massa de cimento Portland substituída por cinzas volantes. Verificou-se que tanto a condutibilidade térmica como a resistência à compressão diminuíram com o aumento da quantidade de cinzas volantes como substituição do cimento. Para percentagens de substituição de 10, 20 e 30%, a redução no coeficiente de condutibilidade térmica foi de 14, 26 e 33%, e a redução na resistência aos 28 dias foi de 17, 38 e 40%, respectivamente. Contudo, aos 120 dias e para percentagens de 10 e 20% de substituição, ocorreu um ligeiro aumento na resistência.

Demirboga (2003b), num estudo semelhante ao de Demirboga (2003a), avaliou argamassas em que 50 e 70% da massa de cimento foi substituída por cinzas volantes. O autor registou uma diminuição de 47 e 54% no coeficiente de condutibilidade térmica e de 64 e 81% na resistência à compressão para as argamassas com 50 e 70% de cinzas volantes, respectivamente.

Vários autores analisaram a influência da substituição de cimento por cinzas volantes na resistência à compressão de argamassas de areia. Supit *et al.* (2014) registaram, aos 28 dias, reduções de 40, 54 e 74% com a inclusão de 50, 60 e 70% de cinzas volantes, respectivamente. Shaikh *et al.* (2014) mediram a resistência à compressão de argamassas com 50, 60 e 70% de cinzas volantes, aos 7 e as 28 dias. No primeiro caso, as reduções face à referência foram de 57, 60 e 80%, enquanto no segundo foram de 40, 47 e 74%; isto indica que, com o passar do tempo, a diferença na resistência destas argamassas face às constituídas apenas por cimento vai diminuindo.

A diferença na resistência entre misturas com substituição do cimento por cinzas volantes e a de referência diminui com o aumento da idade de cura. Para idades mais avançadas, a resistência destas misturas pode ser idêntica ou até mesmo superar a resistência apresentada pela referência. A idade em que tal acontecerá está dependente da quantidade, reactividade e finura das cinzas volantes, da relação água / ligante e das condições de cura, como a temperatura e humidade (Rashad, 2015).

Arandigoyen & Alvarez (2007) combinaram sete relações cimento / cal com 3 traços, perfazendo um total de 21 argamassas. Foram utilizados cimento CEM II-A/L 32,5 e cal aérea CL90. A porosidade manteve-se praticamente constante entre todas as argamassas (20 a 23%), o que vai contra estudos anteriores em que, quanto maior a percentagem de cal, maior a porosidade. Em relação à resistência mecânica, estes autores concluíram que, quando é adicionado cimento a argamassas da cal em percentagens até 40%, a resistência aumenta ligeiramente. Por outro lado, quando pequenas quantidades de cal são adicionadas a argamassas de cimento, ocorre

uma grande perda de resistência (a adição de 25% de cal provoca uma queda de 50% na resistência). Argamassas ricas em cal, apesar da sua baixa resistência, permitem maior deformabilidades antes da rotura, o que as torna interessantes para reabilitação.

## ii) Influência do agregado

Khan (2002) avaliou os factores que afectam a condutibilidade térmica de betões e argamassas. Ao estudar a condutibilidade térmica de argamassas com dois tipos de areia, o autor concluiu que os agregados com menor condutibilidade originam argamassas menos condutoras, e ainda que a condutibilidade térmica aumenta com um aumento do teor de humidade.

Silva *et al.* (2015) avaliaram as resistências à tracção por flexão e à compressão, módulo de elasticidade dinâmico e massa volúmica aparente de argamassas com substituição de agregados. Para tal, produziram, para além de uma argamassa de referência, uma argamassa com 100% de granulado de cortiça expandida, uma argamassa com 100% de argila expandida e duas com uma mistura destes dois agregados (com uma proporção de 60/40). Foi utilizado um traço volumétrico de 1:4 e cimento CEM II B/L 32,5 N. Verificou-se que a introdução de agregados isolantes levou a uma diminuição de todas as propriedades, mais acentuada nas argamassas com 100% de granulado de cortiça expandida.

Soares *et al.* (2015a) produziram argamassas de traço volumétrico 1:4 com substituição de areia por granulado de cortiça expandida ou argila expandida (substituições entre 20 e 30% em volume), assim como uma argamassa de referência. A incorporação de agregados isolantes provocou um aumento na porosidade aparente de cerca de 23% e uma diminuição na massa volúmica aparente de 13 a 16%. No entanto, apesar do aumento na porosidade, as argamassas de granulado de cortiça expandida e argila expandida apresentaram coeficientes de absorção por capilaridade idênticos à argamassa de referência. Verificou-se ainda uma diminuição no coeficiente de condutibilidade térmica de 34 e 28% face à de referência nas argamassa de granulado de cortiça expandida e argila expandida, respectivamente.

Afonso (2015) analisou várias propriedades mecânicas e físicas de argamassas com 100% de granulado de cortiça expandida ou 100% de argila expandida. O autor observou reduções em todas as propriedades mecânicas, assim como na massa volúmica aparente e na condutibilidade térmica, face à argamassa de referência. De facto, com coeficientes de 0,16 e 0,10 W/(m·K) para a argamassa de granulado de cortiça expandida e de argila expandida, respectivamente, estas enquadram-se na definição de argamassa térmica segundo a EN 998-1 (CEN, 2010).

Vale *et al.* (2014) e Melo (2014) estudaram o comportamento mecânico e físico de argamassas de desempenho térmico melhorado. Para além de uma argamassa de referência, foi produzida uma argamassa industrial e uma tradicional, ambas com granulado de cortiça como substituição do agregado de areia (70 a 80% de substituição). O ligante utilizado foi cimento Portland CEM II B/L 32,5 N e as argamassa tradicionais não continham adições ou adjuvantes. Os autores registaram um decréscimo nas características mecânicas e físicas, com excepção da porosidade aparente, da argamassa tradicional em relação à argamassa de referência. O coeficiente de condutibilidade térmica diminuiu 80% em relação à argamassa de referencia (de 1,34 para 0,27



W/m.K); ainda assim não foi o suficiente para esta ser considerada uma argamassa térmica segundo a EN 998-1 (CEN, 2010).

Frade *et al.* (2012) analisaram uma argamassa industrial com 70-80% de agregados de cortiça (substituição em volume), tendo obtido uma resistência à tracção de 3,3 MPa, resistência à compressão de 9,8 MPa, módulo de elasticidade de 1009,8 MPa, tensão de arrancamento de 0,34 MPa (rotura adesiva), massa volúmica aparente de 910 kg/m<sup>3</sup>, porosidade de 46,63%, coeficiente de absorção de água por capilaridade de 0,05 kg/m<sup>2</sup>.min<sup>0.5</sup> e coeficiente de condutibilidade térmica de 0,163 W/(m.K).

Brás *et al.* (2013) produziram argamassas em que uma percentagem crescente de areia (entre 10 e 80%) foi substituída por granulado de cortiça com granulometria 0,5/2. Foi utilizado cimento CEM II B-L 32,5 N e um superplastificante (PCE). Verificou-se uma diminuição na resistência mecânica e na condutibilidade térmica com o aumento da percentagem de cortiça. Para a maior dosagem de cortiça (80%), foram obtidos valores de resistência à tracção e à compressão de 1,7 e 3,9 MPa, respectivamente, o que se traduz numa redução de 67 e 84% face à argamassa de referência. Para a mesma argamassa, o coeficiente de condutibilidade térmica foi de 0,47 W/(m.K), o que constitui uma redução de 74%.

## 2.5 Síntese do capítulo

As argamassas de revestimento desempenham um papel muito importante na construção, ao constituírem a primeira barreira de protecção do edificado face a acções externas. Com a crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental, tem-se procurado soluções de revestimento que minimizem as necessidades de aquecimento e arrefecimento dos edifícios, minimizando assim o seu consumo de energia e impacte ambiental.

Neste sentido, surgem as argamassas de desempenho térmico melhorado, caracterizadas por um coeficiente de condutibilidade térmica inferior a 0,1 ou 0,2 W/(m.K), classificando-se como T1 ou T2, respectivamente. Estas resultam da substituição, total ou parcial, da areia por agregados isolantes, como o granulado de cortiça expandida ou a argila expandida. No entanto, apesar da melhoria em termos de comportamento térmico proporcionada por estas argamassas, o seu comportamento mecânico fica aquém do apresentado por argamassas com agregados tradicionais.

As propriedades de uma argamassa estão também dependentes dos ligantes utilizados na sua constituição e na presença ou não de adjuvantes. Estudos já realizados indicam existir uma perda nas propriedades mecânicas quando parte do cimento é substituído por cal aérea ou cinzas volantes. No entanto, como ficou patente na pesquisa bibliográfica efectuada, o efeito que alterações na pasta ligante possam ter sobre a condutibilidade térmica tem sido pouco estudado. Tanto quanto foi possível apurar, não existem estudos sobre a influência da pasta ligante em argamassas de desempenho térmico melhorado. Assim sendo, foi realizada uma campanha experimental, descrita no próximo capítulo, com o objectivo de contribuir para a investigação deste tema.

Tabela 2.5 - Características de argamassas estudadas por outros autores

Autores	Ligantes	Agregados	a/l	Traço	MV <sub>ap</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	P <sub>ap</sub> (%)	R <sub>t</sub> (MPa)	R <sub>c</sub> (MPa)	E <sub>d</sub> (MPa)	V <sub>us</sub> (m/s)	λ (W/m.K)	f <sub>u</sub> (MPa)	C (kg/m <sup>2</sup> . min <sup>0,5</sup> )	IS	C <sub>A</sub> (kg/m <sup>2</sup> . min <sup>0,5</sup> )
Demirboga (2003a)	CP	Areia	0,5	1:2	2040	-	-	45,4	-	-	1,186	-	-	-	-
	CP + 10% CV				2020	-	-	37,7	-	-	1,016	-	-	-	-
	CP + 20% CV				1950	-	-	28,3	-	-	0,879	-	-	-	-
	CP + 30% CV				1920	-	-	26,9	-	-	0,792	-	-	-	-
Demirboga (2003b)	CP + 50% CV	Areia	0,5	1:2	1830	-	-	16,2	-	-	0,625	-	-	-	-
	CP + 70% CV				1790	-	-	8,6	-	-	0,551	-	-	-	-
Silva <i>et al.</i> (2015)	CP + 10% CV CP + 20% CV CP + 30% CV	Areia	1	1:4	2020	-	-	37,7	-	-	1,016	-	-	-	-
		100% AE	1		1950	-	-	28,3	-	-	0,879	-	-	-	-
		100% GC	0,68		1920	-	-	26,9	-	-	0,792	-	-	-	-
		60% GC + 40% AE	0,68		668	-	0,96	2,04	1068	-	0,15	-	-	-	-
		40% GC + 60% AE	0,68		718	-	1,13	2,94	1907	-	1,16	-	-	-	-
Soares <i>et al.</i> (2015a)	CP	Areia	1	1:4	1827	26	-	-	-	-	1,51	-	1,0	0,34	-
		100% AE	1		1528	32	-	-	-	-	1,09	-	1,1	0,28	-
		100% GC	0,95		1582	31	-	-	-	-	1,00	-	1,0	0,24	-
Afonso (2015)	CEM II B/L 32,5 N	Areia	0,95	1:4	1952	23,6	-	10,73	14326	3146	1,54	-	-	-	-
		100% AE	0,55		825	58,1	-	1,66	1581	1938	0,16	-	-	-	-
		100% GC	0,85		408	30,7	-	0,39	250	922	0,10	-	-	-	-
Vale <i>et al.</i> (2014) / Melo (2014)	CEM II B/L 32,5 N	Areia	0,8	1:3	1885	25,6	3,43	16,14	15140	3285	1,340	0,31 (adesiva)	0,74	0,32	0,36
	CEM II B/L 32,5 N	80% GC + areia	0,7		855	37,5	1,15	2,08	1420	1674	0,270	0,11 (adesiva)	0,64	0,28	0,09
	CP	70-80% GC + areia	-	-	863	46,4	1,89	4,44	2110	1780	0,230	0,36 (adesiva)	0,13	0,10	0,45
Frade <i>et al.</i> (2012)	CP	70-80% GC + areia	-	-	910	46,6	3,3	9,8	1010	-	0,163	0,34 (adesiva)	0,05	-	-

Tabela 2.5 - Características de argamassas estudadas por outros autores (continuação)

Autores	Ligantes	Agregados	a/l	Traço	MV <sub>ap</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	P <sub>ap</sub> (%)	R <sub>t</sub> (MPa)	R <sub>c</sub> (MPa)	E <sub>d</sub> (MPa)	V <sub>us</sub> (m/s)	λ (W/m.K)	f <sub>u</sub> (MPa)	C (kg/m <sup>2</sup> . min <sup>0,5</sup> )	IS	C <sub>A</sub> (kg/m <sup>2</sup> . min <sup>0,5</sup> )
<b>Brás et al. (2013)</b>	CEM II B/L 32,5 N	10% GC + areia	0,6	-	-	-	4,1	15,4	-	-	1,470	-	-	-	-
		20% GC + areia	0,6		-	-	4,0	16,1	-	-	1,310	-	-	-	-
		50% GC + areia	0,6		-	-	2,9	6,0	-	-	0,740	-	-	-	-
		70% GC + areia	0,6		-	-	2,5	6,4	-	-	0,540	-	-	-	-
		70% GC + areia	0,7		-	-	1,8	4,4	-	-	0,480	-	-	-	-
		80% GC + areia	0,75		-	-	1,7	3,9	-	-	0,470	-	-	-	-

Legenda: CP - cimento Portland; CV - cinzas volantes; GC - granulado de cortiça; AE - argila expandida; MV<sub>ap</sub> - massa volúmica aparente; P<sub>ap</sub> - porosidade aparente; R<sub>t</sub> - resistência à tracção por flexão; R<sub>c</sub> - resistência à compressão; E<sub>d</sub> - módulo de elasticidade dinâmico; V<sub>us</sub> - Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas; λ - coeficiente de condutibilidade térmica; f<sub>u</sub> - tensão de aderência; C - coeficiente de absorção de água por capilaridade; IS - índice de secagem; C<sub>A</sub> - coeficiente de absorção de água (tubo de *Karsten*).



## **3. Campanha experimental**

### **3.1 Considerações gerais**

A presente campanha experimental tem como objectivo determinar a influência da pasta ligante e agregados nas propriedades mecânicas e físicas de argamassas térmicas.

Primeiramente, será feita uma descrição geral do plano de ensaios, onde se inclui uma apresentação das argamassas em estudo, seguida da caracterização dos materiais utilizados na produção das mesmas, assim como uma descrição do processo de produção, preparação, moldagem, armazenamento e cura. Por fim, apresenta-se os ensaios realizados. Estes dividem-se em ensaios mecânicos (resistência à compressão e à tração por flexão, módulo de elasticidade dinâmico, velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, tensão de aderência e índice esclerométrico) e físicos (massa volúmica aparente, porosidade aparente, índice de secagem, absorção de água por capilaridade, permeabilidade à água líquida e coeficiente de condutibilidade térmica).

### **3.2 Descrição geral do plano de ensaios**

O trabalho laboratorial foi dividido em duas fases com objectivos distintos. Na Fase 1, denominada de campanha preliminar, procurou-se estabelecer as percentagens de adjuvantes a incorporar nas formulações em estudo; na Fase 2 - Campanha experimental, foram analisadas as argamassas com agregados térmicos.

O traço volumétrico utilizado nas duas fases foi de 1:4, por ser o recomendado pelo LNEC (1968), citado por Soares *et al.* (2015b), para a camada de base de um revestimento de base cimentícia.

#### **3.2.1 Fase 1 - Campanha preliminar**

A campanha preliminar teve como ponto de partida 11 argamassas, todas com areia como agregado, seis delas com cimento e as restantes cinco com 50% de cimento e 50% de cinzas volantes como ligante. A argamassa  $A_{CI}$  não contém qualquer adjuvante e as argamassas  $B_{CI}$  e  $G_{CI}CV_{50}$  têm apenas éter de celulose. Mantendo fixa a percentagem deste adjuvante, às restantes argamassas foram adicionadas percentagens variáveis de tensioactivo. A Tabela 3.1 indica as constituições das argamassas em estudo nesta fase.

As percentagens a utilizar na Fase 2 foram determinadas através da realização de ensaios no estado fresco (ensaio de espalhamento e massa volúmica) e estão patentes no relatório ICIST DTC No. 33/2015. Chegou-se então a um valor de 0,075% de éter de celulose e 0,05% de tensioactivo, o que corresponde às argamassas  $D_{CI}$  e  $I_{CI}CV_{50}$ . Para além destas, foram também produzidas as argamassas  $A_{CI}$  e  $B_{CI}$  como argamassas de referência e de controlo.

Tabela 3.1 - Argamassas em estudo na campanha preliminar

Argamassa	Ligante em massa (%)		Agregado em volume (%)	Adjuvantes (% da massa de ligante)	
	CEM II 32,5 N	Cinzas volantes	Areia	Celulose	Tensioactivo
A <sub>Cl</sub>	100	-	100	0	0
B <sub>Cl</sub>				0	
C <sub>Cl</sub>				0,025	
D <sub>Cl</sub>				0,05	
E <sub>Cl</sub>				0,075	
F <sub>Cl</sub>				0,1	
G <sub>CICV50</sub>	50	50	100	0,075	0
H <sub>CICV50</sub>				0,025	
I <sub>CICV50</sub>				0,05	
J <sub>CICV50</sub>				0,075	
K <sub>CICV50</sub>				0,1	

### 3.2.2 Fase 2 - Campanha experimental

Nesta fase, foram produzidas 25 formulações de argamassas, nas quais se fez variar tanto os ligantes como os agregados utilizados. Estas podem ser divididas em cinco grupos, conforme os ligantes presentes e as suas percentagens (100% cimento; 80% cimento + 20% cinzas volantes; 65% cimento + 35% cinzas volantes; 50% cimento + 50% cinzas volantes; 50% cimento + 10% cinzas volantes + 40% cal). Dentro de cada grupo os agregados variam da mesma forma, isto é, três argamassas possuem apenas um agregado (granulado de cortiça expandida, argila expandida ou areia) e duas têm uma combinação de granulado de cortiça expandida e argila expandida (na proporção 60/40 de um e outro agregado). A constituição das argamassas produzidas encontra-se na Tabela 3.2.

## 3.3 Ensaios de caracterização dos materiais

### 3.3.1 Análise granulométrica

De forma a caracterizar os constituintes das argamassas a produzir foram realizados dois ensaios: a análise granulométrica e a determinação da baridade dos agregados e ligantes. As normas respectivas e os materiais submetidos a cada um dos ensaios encontram-se na Tabela 3.3.

A análise granulométrica de um agregado (EN 1015-1, CEN 1998) é efectuada empilhando uma série de peneiros, com aberturas sucessivamente menores. A abertura das malhas e a quantidade de material a peneirar dependem da máxima dimensão do agregado em estudo. O objectivo da análise é determinar a quantidade de material, em percentagem, que passa em cada peneiro, de modo a construir a curva granulométrica característica do agregado. Esta é de extrema importância, já que os agregados a utilizar na produção de argamassas devem ter uma granulometria extensa, isto é, ter partículas de várias dimensões, que dêem origem a uma boa compacidade.

Tabela 3.2 - Argamassas produzidas na campanha experimental

Argamassa	Ligante em massa (%)			Agregado em volume (%)			Adjuvantes (% da massa de ligante)	
	CEM II 32,5 N	CV	CA	GC	AE	Areia	Celulose	Tensioactivo
CI <sup>100GC</sup>	100	-	-	100			0,075	0,05
CI <sup>100AE</sup>					100			
CI <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>				60	40			
CI <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>				40	60			
CI <sup>100A</sup>						100		
CICV20 <sup>100GC</sup>	80	20	-	100				
CICV20 <sup>100AE</sup>					100			
CICV20 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>				60	40			
CICV20 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>				40	60			
CICV20 <sup>100A</sup>						100		
CICV35 <sup>100GC</sup>	65	35	-	100				
CICV35 <sup>100AE</sup>					100			
CICV35 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>				60	40			
CICV35 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>				40	60			
CICV35 <sup>100A</sup>						100		
CICV50 <sup>100GC</sup>	50	50	-	100				
CICV50 <sup>100AE</sup>					100			
CICV50 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>				60	40			
CICV50 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>				40	60			
CICV50 <sup>100A</sup>						100		
CICV10CA40 <sup>100GC</sup>	50	40	10	100				
CICV10CA40 <sup>100AE</sup>					100			
CICV10CA40 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>				60	40			
CICV10CA40 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>				40	60			
CICV10CA40 <sup>100A</sup>						100		

Legenda: CV - Cinzas volantes; CA - Cal aérea; GC - Granulado de cortiça expandida; AE - Argila expandida.

Tabela 3.3 - Ensaio de caracterização dos materiais

Ensaio	Norma	Materiais
<b>Análise granulométrica</b>	EN 1015-1 (1998)	Areia*, granulado de cortiça expandida e argila expandida*
<b>Baridade</b>	adaptado de NP EN 1097-3 (2002)	Areia*, granulado de cortiça expandida*, argila expandida*, cimento, cinzas volantes e cal

\* Ensaio já realizado no âmbito do projecto.

Neste trabalho, foram utilizados três agregados diferentes: areia (Figura 3.1), argila expandida (Figura 3.2) e granulado de cortiça expandida (Figura 3.3). Para as argamassas de areia, foi adoptada a curva granulométrica da “areia lavada 0/2 Mesquita”, constituída por seis fracções, e para as argamassas leves, foram utilizados agregados com granulometrias de fracções [0,5 a 1 mm] e [1 a 2 mm], a designada “curva 2” (Tabela 3.4). As referidas fracções foram obtidas por peneiração dos agregados, sendo

que no caso da argila expandida se procedeu a uma secagem prévia da mesma a uma temperatura de 100 °C, durante pelo menos 24 horas.



Figura 3.1 - Areia



Figura 3.2 - Argila expandida



Figura 3.3 - Granulado de cortiça expandida

Tabela 3.4 - Distribuição granulométrica das curvas utilizadas (% de volume)

Designação	< 0,063 mm	0,063 a 0,125 mm	0,125 a 0,250 mm	0,250 a 0,500 mm	0,500 a 1,000 mm	1,000 a 2,000 mm
Areia lavada 0/2 Mesquita	0,50	0,50	17,00	59,00	22,00	1,00
Curva 2	-	-	-	-	17,75	82,25

### 3.3.2 Baridade

A determinação da baridade (adaptado de NP EN 1097-3, IPQ 2002) permite a conversão do traço em volume para traço em massa, necessário para a dosagem de todos os constituintes da argamassa.

Procedimento:

- apenas para a argila expandida - seca-se o material na estufa, a uma temperatura de 100°C ± 5 °C, durante 24 h;
- com uma colher, deixa-se o material cair de uma altura de, aproximadamente, 5 cm para o interior de um recipiente com massa e volume conhecidos (o recipiente deve estar sobre um tabuleiro, para evitar perda de material) (Figura 3.4);
- retira-se o excesso de material e alisa-se a superfície;
- pesa-se o recipiente cheio.

A baridade é determinada segundo a equação (3.1),

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

onde,

$Ba$  - baridade (kg/m<sup>3</sup>);

$m_1$  - massa do recipiente (kg);

$m_2$  - massa do recipiente com o material (kg);

$V$  - volume do recipiente (m<sup>3</sup>).





Figura 3.4 - Determinação da baridade

Foi determinada a baridade dos agregados referidos, assim como dos ligantes: cimento *Portland* da classe CEM II/B-L 32,5 N (Figura 3.5), cinzas volantes (Figura 3.6) e cal aérea hidratada (Figura 3.7). Os valores obtidos encontram-se na Tabela 3.5. A composição de cada um dos ligantes está patente na Tabela 3.6.



Figura 3.5 - Cimento



Figura 3.6 - Cinzas volantes



Figura 3.7 - Cal aérea hidratada

Tabela 3.5 - Baridade média dos agregados e ligantes constituintes das argamassas

	Areia	Granulado de cortiça expandida	Argila expandida	Cimento	Cal aérea	Cinzas volantes
Baridade média (kg/m <sup>3</sup> )	1334	52	431	1060	583	1046

Tabela 3.6 - Constituintes dos ligantes utilizados

Ligantes	Composição
Cimento CEM II/B-L 32,5N	65% - 79% de clínquer 21% - 35% de calcário 0% - 5% de outros componentes
Cinzas volantes	SiO <sub>2</sub> ; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; CaO
Cal aérea	Ca(OH) <sub>2</sub> ≥ 93% MgO ≤ 3%

### 3.4 Produção de argamassas

As argamassas foram produzidas com base na norma NP EN 196-1 (IPQ, 2006), tendo esta sido adaptada ao método de produção que tem sido utilizado no projecto. Na Figura 3.8, é possível observar a

mistura mecânica na produção de uma argamassa.

Procedimento:

- pesa-se todos os constituintes da argamassa;
- introduz-se 80% da água na misturadora;
- introduz-se os agregados, ligantes e adjuvantes na misturadora;
- coloca-se a misturadora em funcionamento a uma velocidade lenta durante 60 segundos;
- retira-se o balde da misturadora e mistura-se manualmente com uma colher de pedreiro;
- adiciona-se os restantes 20% de água e coloca-se o balde na misturadora durante mais 60 segundos, à mesma velocidade.



Figura 3.8 - Amassadura mecânica

## 3.5 Preparação e moldagem

### i) Provetes prismáticos

Foram utilizados dois tipos de provetes prismáticos: os provetes normalizados, realizados em moldes de dimensões 40x40x160 mm (Figura 3.9), em conformidade com a norma NP EN 196-1 (IPQ, 2006) e ainda provetes com dimensões 80x70x25 mm, realizados em moldes normalizados adaptados (Figura 3.10). Antes da aplicação da argamassa, ambos os moldes são pincelados com óleo descofrante, para uma correcta desmoldagem dos provetes.

O procedimento adoptado foi o seguinte:

- encher o molde até metade da sua capacidade e, com um varão metálico, aplicar 25 pancadas;
- encher o resto do molde (deixando algum excesso) e repetir o passo anterior;
- com uma colher de pedreiro, retirar a argamassa em excesso e alisar a superfície dos provetes.

### ii) Modelos argamassa-tijolo

Por cada argamassa, foram produzidos dois modelos argamassa-tijolo, com uma espessura de argamassa de 4 cm (espessura mínima para argamassas térmicas) e com o suporte a ser cofrado e humedecido previamente à aplicação da argamassa, conforme ilustrado na Figura 3.11. O humedecimento do tijolo foi efectuado através de pulverização dupla de 20 ml de água, de acordo com o estudo de Arromba (2011) sobre a influência do suporte no desempenho de rebocos aplicados em suportes de tijolo e betão. Na Tabela 3.7, estão indicados quais os provetes utilizados em cada ensaio, para cada uma das fases.

Tabela 3.7 - Ensaio realizados em cada uma das fases e provetes utilizados

Ensaio	Fase 1		Fase 2		
	Provetes prismáticos 160x40x40 mm	Provetes prismáticos 80x70x25 mm	Provetes prismáticos 160x40x40 mm	Provetes prismáticos 80x70x25 mm	Modelos argamassa-tijolo
Resistência à tracção por flexão	X		X		
Resistência à compressão	X		X		
Módulo de elasticidade dinâmico	X		X		
Velocidade de propagação de ondas ultrasónicas	X		X		X
Tensão de aderência ( <i>pull-off</i> )					X
Índice esclerométrico					X
Massa volúmica aparente	X		X		
Porosidade aparente			X		
Absorção de água por capilaridade			X		
Índice de secagem			X		
Permeabilidade à água líquida sob baixa pressão (tubo de <i>Karsten</i> )					X
Condutibilidade térmica		X		X	X

### 3.6 Armazenamento e cura

Após a moldagem das argamassas, os moldes foram introduzidos em sacos de polietileno e colocados numa câmara com temperatura de  $20 \pm 2$  °C e humidade relativa de  $65 \pm 5\%$ . Passados 7 dias, os moldes foram retirados dos sacos e os provetes desmoldados. Quanto aos modelos argamassa-tijolo, o procedimento foi semelhante ao descrito para os moldes, mas a descofragem foi realizada aos 2 dias, permanecendo os tijolos em sacos de polietileno até aos 7 dias.



Figura 3.9 - Molde para provetes normalizados e compactação da argamassa



Figura 3.10 - Molde para provetes prismáticos 80x70x25 mm



Figura 3.11 - Cofragem e humedecimento do tijolo

## 3.7 Ensaios de caracterização das argamassas

### 3.7.1 Porosidade aparente e massa volúmica aparente

Para a determinação da porosidade aparente e massa volúmica aparente, foram ensaiados seis provetes por argamassa, aos 28 dias, sendo o procedimento adaptado de RILEM/PEM25 (RILEM 1980) para pedras, cerâmicos e argamassas.

O procedimento (adaptado de RILEM/PEM25 (RILEM 1980)) foi o seguinte:

- secar os provetes numa estufa a  $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  até estes atingirem massa constante, isto é, entre duas pesagens com 24 h de intervalo, a perda de massa não deve ser superior a 0,1% da massa total;
- colocar os provetes no exsiccador, contendo sílica-gel, durante 1 h;
- pesar os provetes ( $m_{\text{seco}}$ );
- colocar os provetes novamente no exsiccador, ligado a uma bomba de vácuo a uma pressão de 20 mm Hg durante 24 h (Figuras 3.12 e 3.13);
- introduzir água lentamente, para que os provetes fiquem completamente imersos em não menos de 15 min; o vácuo é mantido durante a introdução da água e nas 24 h seguintes;
- desliga-se a bomba, abre-se a torneira de água e os provetes permanecem imersos durante mais 24 h a pressão atmosférica;
- pesagem hidrostática: retira-se os provetes do exsiccador, colocando-os num suporte totalmente imerso e suspenso numa balança de precisão 0,001 g ( $m_{\text{imerso}}$ );
- retira-se os provetes, limpando-os com um pano absorvente para retirar a água em excesso e pesa-se novamente ( $m_{\text{saturado}}$ ).



Figura 3.12 - Colocação de provetes no exsiccador



Figura 3.13 - Realização do ensaio

A porosidade e a massa volúmica aparentes são calculadas, respectivamente, através das equações (3.2) e (3.3),

$$P_{ap} = \frac{m_{\text{saturado}} - m_{\text{seco}}}{m_{\text{saturado}} - m_{\text{imerso}}} \times 100 \quad (3.2)$$

$$MV_{ap} = \frac{m_{\text{seco}}}{m_{\text{saturado}} - m_{\text{imerso}}} \times 1000 \quad (3.3)$$

onde,

$P_{ap}$  - porosidade aparente (%);

$MV_{ap}$  - massa volúmica aparente (kg/m<sup>3</sup>);

$m_{saturado}$  - massa do provete saturado (g);

$m_{seco}$  - massa do provete seco (g);

$m_{imerso}$  - massa do provete em imersão (g).

A massa volúmica aparente foi ainda calculada pelo método geométrico, segundo a norma EN 1015-10 (CEN, 1999a). Foram obtidos seis valores por argamassa, através da medição e pesagem dos provetes e posterior aplicação da equação (3.4),

$$MV_{ap} = \frac{M}{V} \quad (3.4)$$

onde,

$MV_{ap}$  - massa volúmica aparente (kg/m<sup>3</sup>);

$M$  - massa do provete (kg);

$V$  - volume do provete (m<sup>3</sup>).

### 3.7.2 Módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de *Poisson*

Este ensaio mede a frequência fundamental de ressonância de provetes prismáticos, ao excitá-los mecanicamente com um martelo apropriado. As vibrações resultantes são transformadas em sinais eléctricos, analisados no equipamento GrindoSonic MK5 (Figura 3.14), que fornece a frequência fundamental de ressonância de cada provete. O procedimento adoptado baseia-se na norma ASTM E1876-1 (ASTM, 2006).



Figura 3.14 - Equipamento GrindoSonic MK5

Para cada argamassa, são ensaiados seis provetes normalizados e, por provete, são analisados dois modos de vibração:

- modo de vibração à flexão - necessário ao cálculo do módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de *Poisson* (Figura 3.15);
- modo de vibração à torção - necessário ao cálculo do coeficiente de *Poisson* (Figura 3.16).

O ensaio ocorre aos 28 dias de idade e o valor para cada modo de vibração corresponde ao valor obtido em três pancadas consecutivas. O *software* que acompanha o equipamento possibilita o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de *Poisson*.

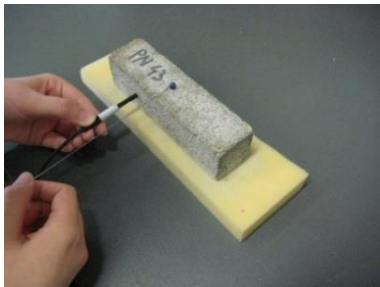


Figura 3.15 - Modo de vibração à flexão

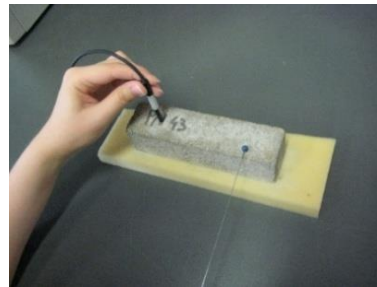


Figura 3.16 - Modo de vibração à torção

### 3.7.3 Resistência à tração por flexão

Neste ensaio, realizado aos 28 dias de idade, foram utilizados seis provetes prismáticos de dimensões 160x40x40 mm. O ensaio segue a norma EN 1015-11 (CEN, 1999b), sendo utilizada uma prensa da marca Seidner Form+Test (modelo 505/200/10 DM1) com uma célula de carga de 10 kN (Figura 3.17). Utiliza-se também um outro aparelho de aquisição de dados, Spider 8 (Figura 3.18), que, ligado simultaneamente à prensa, a um defletómetro e a um computador, permite observar em tempo real a evolução da força e dos deslocamentos. Na Figura 3.19, encontra-se um provete antes de ser ensaiado, com o defletómetro visível no lado esquerdo da imagem. Os provetes são colocados um a um na prensa e carregados até à rotura.



Figura 3.17 - Prensa para ensaios de resistência mecânica



Figura 3.18 - Spider 8



Figura 3.19 - Prensa para ensaios de resistência à tração por flexão

O valor da resistência à tração por flexão é obtido através da equação (3.5),

$$f_t = 1,5 \frac{F_t l}{b d^2} \quad (3.5)$$

onde,

$f_t$  - tensão de rotura à flexão (MPa);

$F_t$  - carga máxima aplicada (kN);

$l$  - distância entre os apoios da máquina (100 mm);

$b$  - largura do provete;

$d$  - espessura do provete.

### 3.7.4 Resistência à compressão

Os provetes utilizados neste ensaio foram as metades resultantes do ensaio de resistência à tracção por flexão. A norma para este ensaio é também a EN 1015-11 (CEN, 1999b) e são utilizados os mesmos equipamentos, Seidner Form+Test (modelo 505/200/10 DM1), desta feita com uma célula de carga de 200 kN, assim como o Spider 8 e o deflectómetro (Figura 3.20).



Figura 3.20 - Prensa para ensaios de resistência à compressão

O valor da resistência à compressão é obtido através da equação (3.6),

$$f_c = \frac{F_c}{A_c} \quad (3.6)$$

onde,

$f_c$  - tensão de rotura à compressão (MPa);

$F_c$  - carga máxima aplicada (kN);

$A_c$  - área da secção comprimida (mm<sup>2</sup>).

### 3.7.5 Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas

Neste ensaio, um impulso de vibrações longitudinais é produzido por um transdutor em contacto com uma superfície do provete. Esse impulso viaja através do comprimento do provete, onde um segundo transdutor o converte num sinal eléctrico, possibilitando a medição do tempo de propagação das ondas. Esta medição foi feita por um equipamento do modelo PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester*), tendo sido utilizados transdutores com uma frequência de 54 kHz (Figura 3.21). O procedimento utilizado baseia-se na norma EN 12504-4 (CEN, 2004), referente a betão, mas adaptado a argamassas.

São utilizados dois métodos de medição da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas: o directo e o indirecto. No método directo, os transdutores são colocados em faces opostas do provete a ser ensaiado, enquanto no método indirecto os transdutores são colocados na mesma face do material. Em ambos os casos, os ensaios foram realizados aos 28 dias.

#### i) Método directo

Este método foi adoptado para a medição em provetes normalizados (seis por argamassa), tendo sido cumprido o seguinte procedimento (adaptado de EN 12504-4 (CEN, 2004)):

- liga-se o aparelho e procede-se à calibração do mesmo;
- espalha-se o material condutor (pasta de dentes) nas faces dos provetes que ficam em contacto com os transdutores;
- realiza-se três medições por provete e regista-se o tempo de propagação das ondas, em  $\mu\text{s}$  (Figura 3.22).



Figura 3.21 - Equipamento PUNDIT



Figura 3.22 - Realização do ensaio (método directo)

Para determinar o tempo de propagação para cada provete, calcula-se a média dos três valores registados; este tempo médio é introduzido na equação (3.7),

$$V_{us} = \frac{L}{T} \quad (3.7)$$

onde,

$V_{us}$  - velocidade de propagação das ondas (km/s);

$L$  - distância percorrida pelas ondas (mm);

$T$  - tempo que a onda demora a percorrer o provete ( $\mu\text{s}$ ).

Obtém-se, assim, três valores de velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, um para cada provete. Calculando mais uma vez a média, determina-se a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas para cada argamassa.

## ii) Método indirecto

A medição da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas em argamassas aplicadas num substrato é feita através do método indirecto. Segundo o mesmo, o transmissor é colocado num ponto fixo sobre a superfície da argamassa, enquanto a posição do receptor vai variando ao longo de uma linha (Figura 3.23). Neste caso, as distâncias entre transmissor e receptor usadas foram de 60, 120, 180 e 240 mm, tendo sido realizadas três medições em cada ponto (Figura 3.24). Foram também realizados dois percursos, da esquerda para a direita e da direita para a esquerda, de modo a tentar minimizar a incerteza associada a este método.

Neste caso, os resultados foram calculados de duas formas: pela média dos valores de velocidade para cada distância (calculada da forma referida para o método directo) e pelo método das dromocrónicas (declive). Segundo este último método, para cada argamassa, é traçado um gráfico com as distâncias percorridas pelas ondas em função do tempo de cada percurso, correspondendo a velocidade média ao declive da linha de tendência.



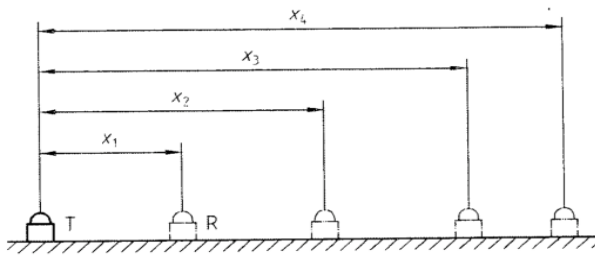


Figura 3.23 - Método indirecto (esquema da norma EN 12504-4)



Figura 3.24 - Realização do ensaio (método indirecto)

### 3.7.6 Ensaio de arrancamento por tracção (*pull-off*)

Este ensaio tem como objectivo a determinação da tensão de aderência entre a argamassa e um suporte, neste caso o tijolo, sendo o procedimento adaptado o da norma EN 1015-12 (CEN, 2000). O ensaio realiza-se aos 28 dias de idade, sendo necessários para o mesmo uma máquina de corte, um aparelho de arrancamento (foi utilizado o *58-C0215/T Pull-off digital tester, load capacity 16KN* da *Controls*), cola e pastilhas metálicas de secção quadrada (40x40 mm<sup>2</sup>).

O procedimento (adaptado de EN 1015-12 (CEN, 2000)) foi o seguinte:

- na véspera do dia do ensaio, realiza-se entalhes com a máquina de corte sobre o modelo argamassa-tijolo (Figura 3.25); os entalhes deverão ser tais que permitam a colocação de três pastilhas por tijolo (Figura 3.26);
- cola-se as pastilhas sobre as áreas delineadas pelos entalhes, tendo o cuidado de garantir que a cola em excesso não atravessa a zona de corte envolvente;
- no dia do ensaio, aplica-se uma força ortogonal às pastilhas, através do aparelho de arrancamento e regista-se a carga de cedência e respectiva tipologia de rotura (Figura 3.27).



Figura 3.25 - Realização de entalhes com a máquina de corte



Figura 3.26 - Pormenor das pastilhas e máquina de arrancamento



Figura 3.27 - Realização do ensaio

A tensão de aderência é calculada segundo a equação (3.8),

$$f_u = \frac{F_u}{A} \quad (3.8)$$

onde,

$f_u$  - tensão de aderência (MPa);

$F_u$  - carga de cedência (kN);

$A$  - área da secção de uma pastilha (mm<sup>2</sup>).

As várias tipologias de rotura, segundo a mesma norma, são:

- fractura padrão a - rotura adesiva - em que a rotura ocorre na interface entre a argamassa e o suporte; a tensão de aderência é calculada pela equação (3.8);
- fractura padrão b - rotura coesiva - em que a rotura se dá no interior da argamassa; a tensão de aderência é superior aos valores obtidos pela equação (3.8);
- fractura padrão c - rotura coesiva - em que a rotura ocorre no suporte; a tensão de aderência é superior aos valores obtidos pela equação (3.8).

### 3.7.7 Índice esclerométrico

O esclerómetro é um aparelho que permite obter *in situ* a dureza superficial do elemento analisado (Flores-Colen, 2009). Neste ensaio, é libertada uma massa que, ao embater na argamassa, ressalta. O ressalto é medido numa escala do aparelho e designado por índice esclerométrico. Quanto mais brando for o material, maior é a quantidade de energia absorvida e menor a altura do ressalto (Magalhães *et al.*, 2003).

O equipamento usado foi um *Schmidt Pendulum Hammer type PT* da *PROCEQ*. Foi escolhido um esclerómetro do tipo PT, por ser este o indicado para ensaiar materiais pouco resistentes e porosos, com resistências à compressão entre 0,2 e 5 MPa (gama de valores onde se inserem as argamassas deste estudo). Antes do ensaio, realizado aos 28 dias, deve-se proceder ao alisamento da superfície com uma pedra de carborundo (Figura 3.28), pois uma superfície rugosa poderá afectar os resultados. Para a realização dos ensaios, o tijolo é colocado na vertical e encostado a uma parede, accionando-se de seguida o pistão que vai largar a massa a embater na argamassa (Figura 3.29).



Figura 3.28 - Alisamento da superfície



Figura 3.29 - Realização do ensaio com esclerómetro pendular do tipo PT

### 3.7.8 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade é medida usando as metades provenientes do ensaio de resistência à tracção por flexão, o que totaliza seis provetes por argamassa. Após estes serem secos até

atingir uma massa constante, uma das bases do provete é imersa em água durante um determinado período de tempo, sendo depois medido o seu aumento em massa devido à absorção de água.

Procedimento (segundo a EN 1015-18 (CEN, 2002)):

- secar os provetes numa estufa a  $60 \pm 5$  °C até estes atingirem massa constante, isto é, entre 2 pesagens com 24 h de intervalo, a perda de massa não é superior a 0,2% da massa total;
- os provetes são pesados secos e colocados num tabuleiro (Figura 3.30). Para evitar fenómenos de evaporação (o nível de água deve manter-se constante durante todo o ensaio), o tabuleiro deve estar coberto (Figura 3.31);
- adicionar água até a base dos provetes ficar imersa no máximo 10 mm de água;
- aos 5, 10, 15, 30, 60, 90 min, 3h, 24h e 72h retirar os provetes do tabuleiro, limpar a face molhada com papel absorvente e pesá-los;
- voltar a colocar os provetes no tabuleiro e verificar e ajustar o nível de água.



Figura 3.30 - Colocação de provetes no tabuleiro



Figura 3.31 - Tabuleiro coberto para evitar a evaporação da água

O coeficiente de absorção de água é calculado segundo a equação (3.9),

$$C = 0,1 \times (M_2 - M_1) \quad (3.9)$$

onde,

$C$  - coeficiente de absorção de água ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$ );

$M_1$  - massa aos 10 min (g);

$M_2$  - massa aos 90 min (g).

O valor do coeficiente de absorção de água para cada argamassa é determinado pela média dos seis provetes analisados.

Este resultado corresponde ao declive da recta que une os pontos referentes às massas dos provetes aos 10 e 90 minutos, assumindo que é neste intervalo que se dá a fase de absorção rápida da água. No entanto, tal pode não acontecer, o que leva a que os resultados obtidos pela equação (3.9) não correspondam ao comportamento da argamassa. Assim sendo, o coeficiente de absorção de água também é determinado por análise directa dos declives dos gráficos de absorção de água em função do tempo.

### 3.7.9 Índice de secagem

Este ensaio mede a quantidade de água perdida pela argamassa ao longo do tempo. Foi realizado

após o ensaio de capilaridade, quando os provetes já se encontravam saturados. Estes foram colocados em tabuleiros com a face previamente em contacto com a água agora exposta ao ar (Figura 3.32). A duração do ensaio foi variável, dependendo da constituição de cada argamassa, dando-se o ensaio por concluído quando a variação da massa em relação à massa seca inicial fosse inferior a 2% ou quando a massa entre pesagens consecutivas estabilizasse.

Os dados obtidos permitem a elaboração de curvas de secagem que mostram a diminuição do teor de água ao longo do ensaio. Através destas curvas, é possível obter o índice de secagem ( $I_s$ ), que traduz a resistência à secagem do produto (NORMAL 29/88 (CNR-ICR, 1991)). Este índice é calculado pela equação (3.10):

$$I_s = \frac{\int_{t_i}^{t_f} f(w_t) dt}{w_{max} \times t_f} \quad (3.10)$$

onde,

$f(w_t)$  - teor de água em função do tempo;

$w_{max}$  - teor de água inicial (%);

$t_f$  - tempo final do ensaio.



Figura 3.32 - Secagem dos provetes

### 3.7.10 Permeabilidade à água líquida sob baixa pressão (tubo de *Karsten*)

O ensaio da permeabilidade à água sob baixa pressão encontra-se descrito na ficha do LNEC Fe Pa 39.1 (LNEC, 2002). Este é realizado aos 28 dias, num modelo argamassa-tijolo por argamassa, e em cada modelo são colocados 3 tubos de *Karsten* (Figura 3.33). Um tubo de *Karsten* é um tubo em forma de cachimbo, com um tubo graduado de 0 a 4 cm<sup>3</sup> e com uma abertura inferior circular, com uma área de 5,7 cm<sup>2</sup>, que é fixado ao revestimento a analisar. A altura total da coluna de água aplicada à superfície é de 9,8 cm, o que se traduz numa pressão de 961,38 Pa. O objectivo do ensaio é medir a quantidade de água absorvida em cada um dos tubos, em intervalos de tempo definidos.

Procedimento (segundo a ficha do LNEC Fe Pa 39.1(LNEC, 2002)):

- as superfícies dos bordos dos tubos que ficam em contacto com o revestimento são cobertas com um material isolante (silicone), evitando-se o excesso do mesmo, de modo a que a área de argamassa que fique em contacto com a água não seja diminuída;
- fixa-se os tubos às zonas ao modelo a ser ensaiado, aplicando alguma pressão;
- deixa-se o silicone secar à temperatura ambiente;

- enche-se os tubos com água até à graduação de 0 cm<sup>3</sup>;
- as leituras do abaixamento da água em cada um tubos são realizadas aos 5, 10, 15, 30 e 60 minutos após o primeiro enchimento dos mesmos;
- após cada leitura, os tubos devem ser novamente enchidos até à graduação de 0 cm<sup>3</sup>, se necessário.

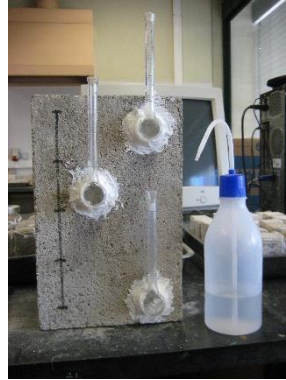


Figura 3.33 - Tubos de *Karsten*

Com os volumes de água obtidos em cada uma das medições, é possível produzir um gráfico do volume de água absorvido em função do tempo. Já o coeficiente de absorção de água sob baixa pressão é calculado através da equação (3.11) (PROCEQ, 2001 citado por Flores-Colen, 2009),

$$C_A = \frac{X \times 10^{-3}}{d^2 \times \left(\frac{\pi}{4} \times 10^{-6} \times \sqrt{t}\right)} \quad (3.11)$$

onde,

$C_A$  - coeficiente de absorção de água (kg/m<sup>2</sup>.min<sup>0,5</sup>);

$X$  - quantidade de água absorvida (ml);

$d$  - diâmetro da área de absorção (mm);

$t$  - duração do ensaio (min).

### 3.7.11 Coeficiente de condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica dos provetes foi medida através do equipamento ISOMET 2114, que mede o coeficiente de condutibilidade térmica através do contacto da argamassa com uma sonda de superfície que emite um impulso de calor. Este ensaio foi efectuado em quatro provetes com dimensões de 80x70x25 mm (Figura 3.34) e foram realizadas três medições num modelo argamassa-tijolo (Figura 3.35), por argamassa. Antes do seu início, deve-se escolher uma de três gamas de coeficientes de condutibilidade térmica (0,04-0,3 W/m.K; 0,3-2,0 W/m.K; 2,0-6,0 W/m.K), com base nas características da argamassa a ser analisada.

Primeiramente, a avaliação desta propriedade foi efectuada aos 28 dias de cura numa câmara a temperatura e humidade relativa constantes (20 ± 2 °C e 65 ± 5%, respectivamente), que foram as condições possíveis mais próximas da condição IIb do documento ISO 10456:2007 (23 °C; 50 % de humidade relativa). Posteriormente, efectuou-se a secagem dos provetes numa estufa a 60 °C para realizar o mesmo

ensaio, mas com os provetes no estado seco, a uma temperatura média de ensaio de 20 °C, o que constitui as condições possíveis que mais se aproximam da condição IIa do referido documento (23 °C; estado seco). Para realizar os ensaios de condutibilidade térmica no estado seco, os provetes foram envolvidos em película de celofane, de modo a impedir a absorção de humidade durante o ensaio.



Figura 3.34 - Ensaio em provete

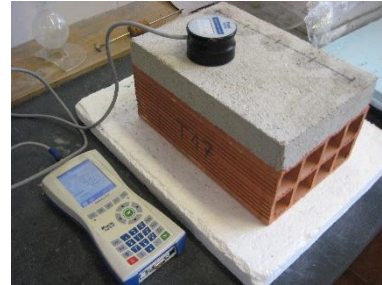


Figura 3.35 - Ensaio em modelo argamassa-tijolo

### 3.8 Síntese do capítulo

Na campanha preliminar, foram estudadas quatro argamassas, todas com areia como agregado. Para cada argamassa, foram produzidos três provetes normalizados e dois provetes prismáticos de 80x70x25 mm, com os quais se realizou ensaios de massa volúmica aparente, resistência à tracção e compressão, módulo de elasticidade dinâmico, módulo de distorção, coeficiente de *Poisson*, velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas e condutibilidade térmica.

Já na campanha experimental estiveram em estudo vinte e cinco argamassas, vinte das quais com agregados leves e cinco com areia, como referência. Por argamassa foram produzidos seis provetes prismáticos, quatro provetes prismáticos de 80x70x25 mm e três modelos argamassa-tijolo. Para além dos ensaios efectuados na campanha preliminar, foram ainda determinados a porosidade aparente, absorção por capilaridade, índice de secagem, permeabilidade à água líquida, tensão de aderência e índice esclerométrico.

Na Tabela 3.8, está sintetizado o número de ensaios efectuados. Não foram contabilizados os ensaios de capilaridade e secagem por estes consistirem em medições diárias por períodos de tempo variáveis. Seguidamente, no capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos referidos ensaios.

Tabela 3.8 - Número de ensaios realizados

		MV <sub>ap</sub> - método geométrico	MV <sub>ap</sub> - Pesagem hidrostática; P <sub>ap</sub>	R <sub>t</sub>	R <sub>c</sub>	E <sub>d</sub> ; ν	V <sub>us</sub>		λ		f <sub>u</sub>	IE	C <sub>A</sub>
							Provetes	Tijolos	Provetes	Tijolos			
Fase 1	A <sup>CP</sup> <sub>Cl</sub>	3	-	3	3	3	3	-	4	-	-	-	-
	B <sup>CP</sup> <sub>Cl</sub>	3	-	3	3	3	3	-	4	-	-	-	-
	D <sup>CP</sup> <sub>Cl</sub>	3	-	3	3	3	3	-	4	-	-	-	-
	J <sup>CP</sup> <sub>CICV50</sub>	3	-	3	3	3	3	-	4	-	-	-	-
Fase 2	CI <sup>100GC</sup>	6	6	6	6	6	6	1	8	3	3	2	3
	CI <sup>100AE</sup>	6	6	6	6	6	6	1	8	3	3	2	3
	CI <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	6	6	6	6	6	6	-	8	-	-	-	-
	CI <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	6	6	6	6	6	6	-	8	-	-	-	-
	CI <sup>100A</sup>	6	6	6	6	6	6	1	8	3	3	2	3
	CICV20 <sup>100GC</sup>	6	6	6	6	6	6	1	8	3	3	2	3
	CICV20 <sup>100AE</sup>	6	6	6	6	6	6	1	8	3	3	2	3
	CICV20 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	6	6	6	6	6	6	-	8	-	-	-	-
	CICV20 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	6	6	6	6	6	6	-	8	-	-	-	-
	CICV20 <sup>100A</sup>	6	6	6	6	6	6	1	8	3	3	2	3
	CICV35 <sup>100GC</sup>	6	6	6	6	6	6	-	8	-	-	-	-
	CICV35 <sup>100AE</sup>	6	6	6	6	6	6	-	8	-	-	-	-
	CICV35 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	6	6	6	6	6	6	-	8	-	-	-	-
	CICV35 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	6	6	6	6	6	6	-	8	-	-	-	-
	CICV35 <sup>100A</sup>	6	6	6	6	6	6	1	8	3	3	2	3
	CICV50 <sup>100GC</sup>	6	6	6	6	6	6	1	8	3	3	2	3
	CICV50 <sup>100AE</sup>	6	6	6	6	6	6	1	8	3	3	2	3
	CICV50 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	6	6	6	6	6	6	-	8	-	-	-	-
	CICV50 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	6	6	6	6	6	6	-	8	-	-	-	-
	CICV50 <sup>100A</sup>	6	6	6	6	6	6	1	8	3	3	2	3
	CICV10CA40 <sup>100GC</sup>	6	6	6	6	6	6	1	8	3	3	2	3
	CICV10CA40 <sup>100AE</sup>	6	6	6	6	6	6	1	8	3	3	2	3
	CICV10CA40 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	6	6	6	6	6	6	-	8	-	-	-	-
	CICV10CA40 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	6	6	6	6	6	6	-	8	-	-	-	-
CICV10CA40 <sup>100A</sup>	6	6	6	6	6	6	1	8	3	3	2	3	
<b>Total</b>		162	150	162	162	162	162	13	216	39	39	26	39

Legenda: MV<sub>ap</sub> - Massa volúmica aparente; P<sub>ap</sub> - Porosidade aparente; R<sub>t</sub> - Resistência à tracção; R<sub>c</sub> - Resistência à compressão; E<sub>d</sub> - Módulo de elasticidade dinâmico; ν - Coeficiente de Poisson; V<sub>us</sub> - Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas; λ - Coeficiente de condutibilidade térmica; f<sub>u</sub> - Tensão de aderência; IE - Índice esclerométrico; C<sub>A</sub> - Coeficiente de absorção de água.





## 4. Apresentação e discussão dos resultados

### 4.1 Considerações gerais

No presente capítulo, são apresentados os resultados obtidos na Fase 1 - campanha preliminar e Fase 2 - campanha experimental. Na Fase 1, o objectivo passa pela determinação da influência dos adjuvantes utilizados em argamassas de areia, enquanto na Fase 2 é avaliada a influência de diferentes ligantes e agregados nas características mecânicas e físicas de argamassas de desempenho térmico melhorado. Da discussão de resultados, fazem parte correlações entre os vários ensaios realizados e também uma comparação com resultados obtidos por outros autores.

### 4.2 Fase 1 - Campanha preliminar

#### 4.2.1 Massa volúmica aparente

Na Tabela 4.1 e na Figura 4.1, podem ser observados os valores médios obtidos para a massa volúmica aparente, aos 28 dias, determinada pelo método geométrico. Os resultados individuais de cada ensaio encontram-se no Anexo A1.

Tabela 4.1 - Massa volúmica aparente (Fase 1)

	<b>MV<sub>ap</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>DP (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>CV (%)</b>
<b>A<sub>Cl</sub></b>	1849	10	1
<b>B<sub>Cl</sub></b>	1791	5	0
<b>D<sub>Cl</sub></b>	1653	3	0
<b>I<sub>Cl</sub>CV50</b>	1588	15	1

Legenda: MV<sub>ap</sub> - massa volúmica aparente média (obtida pelo método geométrico); DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

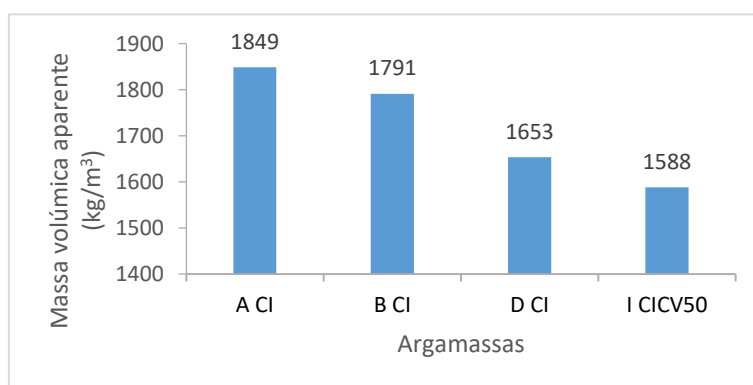


Figura 4.1 - Massa volúmica aparente (Fase 1)

A massa volúmica aparente da argamassa A<sub>Cl</sub> é de 1849 kg/m<sup>3</sup> e da argamassa B<sub>Cl</sub> é de 1791 kg/m<sup>3</sup>, isto é, a introdução de éter de celulose na argamassa B<sub>Cl</sub> não provocou alterações significativas na massa volúmica aparente. Contudo, quando para além de éter de celulose se adicionou um tensoactivo (argamassa D<sub>Cl</sub>), ocorreu uma diminuição de 11% na massa volúmica aparente, o que pode ser explicado pela presença de micro bolhas de ar na mistura, resultantes da acção do tensoactivo.

Comparando a argamassa de cimento  $D_{CI}$  com a argamassa  $I_{CI_{CV50}}$ , em que 50% do cimento foi substituído por cinzas volantes, verifica-se os valores registados para estas argamassas são semelhantes (1653 e 1588 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente). Conclui-se assim que a introdução do tensioactivo tem uma maior influência na massa volúmica aparente do que a substituição de cimento por cinzas volantes; o que pode ser explicado pelas propriedades do tensioactivo enquanto introdutor de ar e pelo facto de as baridades do cimento e das cinzas volantes serem idênticas (1060 e 1046 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente).

#### 4.2.2 Módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de *Poisson*

Na Tabela 4.2 e nas Figuras 4.2 e 4.3, são apresentados os resultados médios obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de *Poisson*, aos 28 dias, calculados através do *software* que acompanha o equipamento de medição. Os resultados individuais de cada ensaio, assim como as frequências de ressonância medidas, podem ser consultadas no Anexo A2.

Tabela 4.2 - Módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de *Poisson* (Fase 1)

	$E_d$ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	$\nu$	DP	CV (%)
<b>A<sub>CI</sub></b>	11942	135	1	0,30	0,00	0
<b>B<sub>CI</sub></b>	10251	375	4	0,14	0,00	2
<b>D<sub>CI</sub></b>	10561	245	2	0,14	0,03	18
<b>I<sub>CI<sub>CV50</sub></sub></b>	6154	111	2	0,15	0,01	5

Legenda:  $E_d$  - módulo de elasticidade dinâmico médio;  $\nu$  - coeficiente de *Poisson* médio; DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação

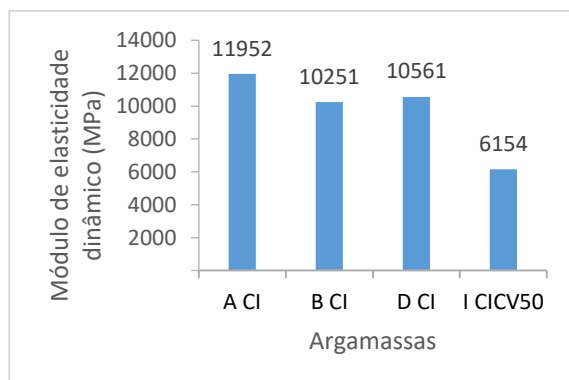


Figura 4.2 - Módulo de elasticidade dinâmico (Fase 1)

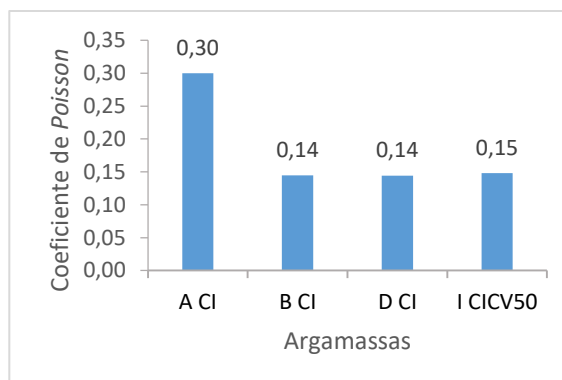


Figura 4.3 - Coeficiente de *Poisson* (Fase 1)

O módulo de elasticidade dinâmico da argamassa  $B_{CI}$  (com éter de celulose) é de 10251 MPa, o que corresponde a uma diminuição de 18% em relação à argamassa de referência  $A_{CI}$ ; para a argamassa  $D_{CI}$ , com os dois adjuvantes, a variação é semelhante, cerca de 15%. De acordo com Veiga (1998), a introdução de ar em argamassas reduz o seu módulo de elasticidade, o que vai ao encontro dos resultados obtidos. Comparando  $D_{CI}$  e  $I_{CI_{CV50}}$ , a redução é mais significativa, diminuindo o módulo de elasticidade em 42%, devido à substituição de 50% do cimento por cinzas volantes. Este resultado indica que a introdução deste material origina argamassas mais deformáveis do que as constituídas apenas por cimento.

O coeficiente de *Poisson* representa a relação entre a deformação transversal e a deformação longitudinal do betão/argamassa. O coeficiente de *Poisson* da argamassa  $A_{CI}$  é 0,30, sensivelmente o

dobro dos valores registados nas restantes. No entanto, a argamassa CI<sup>100A</sup>, produzida na Fase 2 com a mesma formulação da argamassa A<sub>CI</sub>, tem um coeficiente de Poisson de 0,15; esta diferença pode indiciar uma imprecisão na medição das frequências de ressonância à torção, usadas para calcular este coeficiente. Considera-se assim o coeficiente de *Poisson* da argamassa A<sub>CI</sub> igual a 0,15, e, portanto, semelhante ao das restantes argamassas.

### 4.2.3 Resistência à tracção por flexão

Os valores médios de resistência à tracção por flexão, aos 28 dias, encontram-se na Tabela 4.3 e na Figura 4.4, enquanto os resultados individuais para cada provete podem ser consultados no anexo A3.

Tabela 4.3 - Resistência à tracção por flexão (Fase 1)

	R <sub>t</sub> (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	R <sub>t</sub> corr (MPa)
A <sub>CI</sub>	2,87	0,30	10	2,36
B <sub>CI</sub>	2,09	0,20	10	2,18
D <sub>CI</sub>	2,74	0,26	9	2,21
I <sub>CI</sub> CV50	(-)	(-)	(-)	1,77

Legenda: R<sub>t</sub> - resistência à tracção média; R<sub>t</sub> corr - valores de R<sub>t</sub> segundo a correlação de Silva *et al.* (2015); DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; (-) - ensaio nulo.

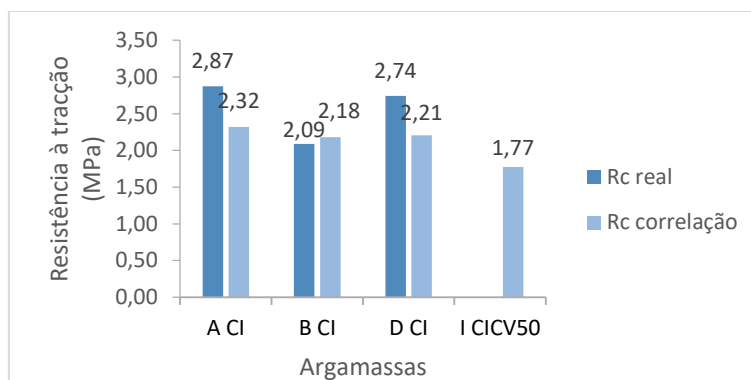


Figura 4.4 - Resistência à tracção por flexão (Fase 1)

Devido a um problema no equipamento de medição, que afectou os resultados da argamassa I<sub>CI</sub>CV50, são apresentados na Tabela 4.3 não só os valores reais obtidos, mas também uma estimativa dos mesmos, usando a correlação entre a resistência à tracção e o módulo de elasticidade dinâmico obtida por Silva *et al.* (2015) e que está patente na equação (4.1).

$$R_t = 0,0517 \times E_d^{0,4052} \quad (4.1)$$

Analisando os resultados, verifica-se que a introdução de 0,075% de éter de celulose provocou uma diminuição de 27% na resistência à tracção (2,87 MPa da argamassa A<sub>CI</sub> para 2,09 MPa da argamassa B<sub>CI</sub>). Já a argamassa D<sub>CI</sub> que, para além da referida percentagem de celulose, tem ainda 0,05% de tensioactivo, apresenta uma resistência de 2,74 MPa, semelhante à argamassa de referência sem adjuvantes A<sub>CI</sub>.

Comparando os valores estimados para as argamassas D<sub>CI</sub> e I<sub>CI</sub>CV50, constata-se que a substituição de 50% de cimento por cinzas volantes levou a uma diminuição de resistência na ordem de 20%. Os efeitos da substituição de cimento por cinzas volantes serão discutidos na Fase 2.

#### 4.2.4 Resistência à compressão

Tal como para a resistência à tracção por flexão, a resistência à compressão aos 28 dias foi estimada através de uma correlação com o módulo de elasticidade dinâmico obtida por Silva *et al.* (2015) e que pode ser observada na equação (4.2). Os valores médios para cada argamassa podem ser observados na Tabela 4.4 e na Figura 4.5, estando os resultados individuais de cada ensaio presentes no Anexo A4.

$$R_t = 0,0364 \times E_d^{0,5832} \quad (4.2)$$

Tabela 4.4 - Resistência à compressão (Fase 1)

	R <sub>c</sub> (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	R <sub>c</sub> corr (MPa)
A <sup>CP</sup> <sub>CI</sub>	10,08	1,12	11	8,91
B <sup>CP</sup> <sub>CI</sub>	8,05	0,19	2	7,95
D <sup>CP</sup> <sub>CI</sub>	8,49	0,47	6	8,09
I <sup>CP</sup> <sub>CI</sub> CV50	(-)	(-)	(-)	5,90

Legenda: R<sub>c</sub> - resistência à compressão média; R<sub>c</sub> corr - valores de R<sub>c</sub> segundo a correlação de Silva *et al.* (2015); DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; (-) - ensaio nulo.

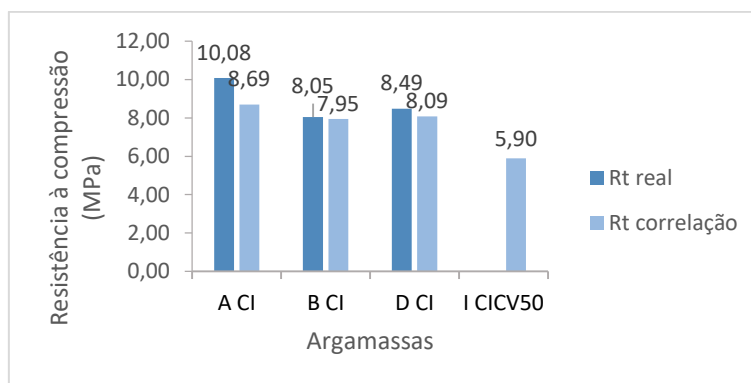


Figura 4.5 - Resistência à compressão (Fase 1)

A resistência à compressão da argamassa com éter de celulose (B<sub>CI</sub>) é 22% inferior à resistência da argamassa de referência A<sub>CI</sub> (resistências de 8,05 e 10,35 MPa, respectivamente). No caso da argamassa com éter de celulose e tensoactivo (D<sub>CI</sub>), a diminuição em relação à argamassa A<sub>CI</sub> foi de 18% (de 10,35 para 8,49 MPa). Segundo Veiga (1998), os introdutores de ar (tensoactivo) têm como desvantagem a diminuição da resistência à compressão, devido ao aumento da porosidade.

Já a substituição de metade do cimento por cinzas volantes provocou uma diminuição de 27%, de 8,09 para 5,90 MPa (comparando com os valores estimados).

#### 4.2.5 Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas

Os valores médios obtidos para a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, aos 28 dias, encontram-se na Tabela 4.5 e na Figura 4.6. Os resultados individuais de cada medição podem ser observados no Anexo A5.

A velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas para a argamassa A<sub>Cl</sub> é de 2930 m/s, enquanto para as argamassas B<sub>Cl</sub> e D<sub>Cl</sub> é de 2793 e 2702 m/s, respectivamente. Constatou-se assim que a introdução de éter de celulose e tensioactivo não causa uma diminuição significativa na velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas em relação à argamassa de referência (diminuição de 5 e 8%, respectivamente, para B<sub>Cl</sub> e D<sub>Cl</sub>).

Por outro lado, a substituição de metade do cimento por cinzas volantes causou uma diminuição na velocidade de 23% (velocidade de 2702 m/s para a argamassa D<sup>C</sup><sub>Cl</sub> e de 2086 m/s para a argamassa I<sub>Cl</sub>CV50).

Tabela 4.5 - Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas - método directo (Fase 1)

	V <sub>us</sub> (m/s)	DP (m/s)	CV (%)
A <sub>Cl</sub>	2930	5	0
B <sub>Cl</sub>	2793	75	3
D <sub>Cl</sub>	2702	12	0
I <sub>Cl</sub> CV50	2086	16	1

Legenda: V<sub>us</sub> - velocidade de propagação média; DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

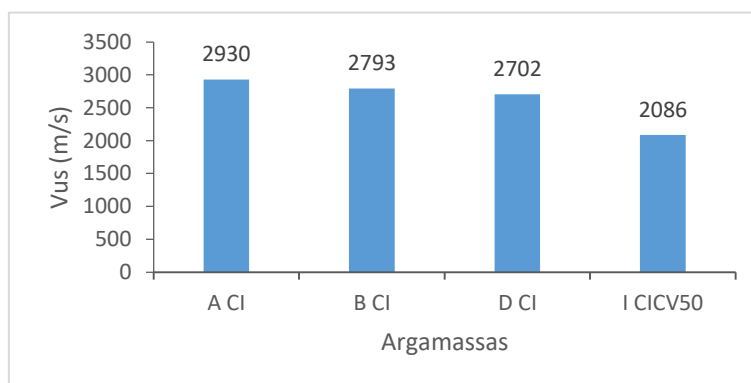


Figura 4.6 - Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas (Fase 1)

#### 4.2.6 Coeficiente de condutibilidade térmica

Na Tabela 4.6 e na Figura 4.7, são apresentados os valores obtidos para o coeficiente de condutibilidade térmica, em ensaios realizados aos 28 dias, e posteriormente, após secagem dos provetes. Os resultados de cada medição podem ser consultados no Anexo A6.

O coeficiente de condutibilidade térmica da argamassa B<sub>Cl</sub> (1,551 W/m.K aos 28 dias e 1,436 W/m.K em provetes secos) é idêntico ao da argamassa A<sub>Cl</sub> (1,581 W/m.K aos 28 dias e 1,445 W/m.K em provetes secos), o que indica que a introdução de éter de celulose não influencia esta propriedade.

Já a adição conjunta de éter de celulose e tensoactivo (argamassa D<sub>CI</sub>) provocou uma redução de cerca de 12% no coeficiente de condutibilidade térmica.

Quanto à argamassa I<sub>CI</sub>CV50, a substituição de 50% do cimento por cinzas volantes causou uma diminuição de 30% no coeficiente de condutibilidade térmica em relação à argamassa D<sub>CI</sub>, observando-se assim uma elevada influência das cinzas volantes no desempenho térmico das argamassas. No entanto, tendo areia como agregado, nenhuma das argamassas estudadas nesta fase poderá ser considerada térmica.

Tabela 4.6 - Coeficientes de condutibilidade térmica aos 28 dias e em provetes secos (Fase 1)

	$\lambda_{28d}$ (W/m.K)	$\lambda_{seco}$ (W/m.K)
<b>A<sub>CI</sub></b>	1,581	1,445
<b>B<sub>CI</sub></b>	1,551	1,436
<b>D<sub>CI</sub></b>	1,384	1,289
<b>I<sub>CI</sub>CV50</b>	1,016	0,898

Legenda:  $\lambda_{28d}$  - Coeficiente de condutibilidade térmica aos 28 dias;  
 $\lambda_{seco}$  - Coeficiente de condutibilidade térmica em provetes secos.

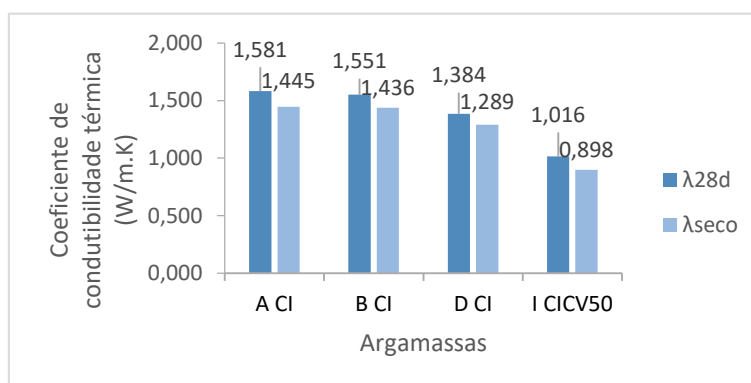


Figura 4.7 - Coeficiente de condutibilidade térmica medido aos 28 dias e em provetes no estado seco

## 4.3 Fase 2 - Campanha experimental

### 4.3.1 Porosidade aparente e massa volúmica aparente

Os resultados obtidos para a porosidade aparente média, assim como para a massa volúmica aparente média, determinada pelos métodos hidrostático e geométrico, aos 28 dias, encontram-se na Tabela 4.7. Os resultados individuais de cada ensaio podem ser observados no Anexo A7.

Devido à reduzida massa volúmica dos agregados utilizados, não foi possível efectuar a pesagem hidrostática das argamassas com 100% de granulado de cortiça expandida, por estas flutuarem. Assim, não foi determinada a porosidade aparente destas argamassas e a massa volúmica aparente foi obtida apenas pelo método geométrico. Por esta razão, a análise referente à massa volúmica aparente será realizada com base neste método. Quanto aos restantes provetes, a pesagem hidrostática foi conseguida, mas durante a imersão em água no exsicador estes também flutuaram, não estando, por isso, garantida a sua saturação.

### i) Porosidade aparente

Na Figura 4.8, estão representadas as percentagens de variação na porosidade aparente de cada argamassa quando comparada com a sua argamassa de cimento equivalente (CI<sup>100AE</sup>, CI<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub>, CI<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub> ou CI<sup>100A</sup>), enquanto na Figura 4.9 a comparação é efectuada com a argamassa de areia equivalente (CI<sup>100A</sup>, CICV20<sup>100A</sup>, CICV35<sup>100A</sup>, CICV50<sup>100A</sup> ou CICV10CA40<sup>100A</sup>).

Para as argamassas com agregados isolantes, os valores determinados para a porosidade aparente são muito próximos entre si, com um máximo de 58,7% para a argamassa CICV10CA40<sup>100AE</sup> e um mínimo de 51,9% para a argamassa CICV50<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub>. Seria de esperar um maior aumento na porosidade aparente das argamassas CICV10CA40, por estas conterem cal aérea, face às argamassas que não contêm este ligante, o que não se verificou. Contudo, Arandigoyen & Alvarez (2007), ao estudarem a estrutura porosa de argamassas bastardas de cal aérea e cimento, obtiveram também porosidades semelhantes às das argamassas de cimento.

Tabela 4.7 - Porosidade aparente e massa volúmica aparente (Fase 2)

	Método hidrostático						Método geométrico		
	P <sub>ap</sub> (%)	DP (%)	CV (%)	MV <sub>ap</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	DP (kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)	MV <sub>ap</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	DP (kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)
CI <sup>100GC</sup>	n.e.						487	4	1
CI <sup>100AE</sup>	57,6	0,8	1	780	12	2	751	6	1
CI <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	54,7	1,6	3	639	13	2	618	11	2
CI <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	56,6	0,8	1	699	19	3	674	12	2
CI <sup>100A</sup>	25,7	0,5	2	1868	13	1	1909	18	1
CICV20 <sup>100GC</sup>	n.e.						456	5	1
CICV20 <sup>100AE</sup>	55,1	1,2	2	779	12	2	749	8	1
CICV20 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	53,9	2,0	4	623	17	3	615	7	1
CICV20 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	57,5	0,2	0	667	4	1	669	6	1
CICV20 <sup>100A</sup>	25,8	0,7	3	1880	12	1	1913	8	0
CICV35 <sup>100GC</sup>	n.e.						447	11	2
CICV35 <sup>100AE</sup>	57,9	2,6	5	738	13	2	741	15	2
CICV35 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	53,1	1,1	2	634	10	2	631	12	2
CICV35 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	52,5	0,9	2	677	11	2	680	16	2
CICV35 <sup>100A</sup>	26,4	0,7	3	1863	17	1	1898	8	0
CICV50 <sup>100GC</sup>	n.e.						434	12	3
CICV50 <sup>100AE</sup>	52,9	0,9	2	738	5	1	754	6	1
CICV50 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	51,9	0,7	1	589	4	1	593	3	0
CICV50 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	53,3	0,9	2	638	7	1	634	8	1
CICV50 <sup>100A</sup>	26,6	0,6	2	1870	10	1	1908	8	0
CICV10CA40 <sup>100GC</sup>	n.e.						440	14	3
CICV10CA40 <sup>100AE</sup>	58,7	0,4	1	770	15	2	771	15	2
CICV10CA40 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	56,7	0,7	1	575	8	1	580	7	1
CICV10CA40 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	57,9	0,6	1	663	8	1	651	10	2
CICV10CA40 <sup>100A</sup>	29,1	0,5	2	1817	12	1	1863	6	0

Legenda: P<sub>ap</sub> - Porosidade aparente média; MV<sub>ap</sub> - Massa volúmica aparente média; DP - Desvio padrão; CV - coeficiente de variação; n.e. - argamassa não ensaiada devido à impossibilidade de pesagem hidrostática.

De facto, observando a Figura 4.8, é claro que as alterações na pasta ligante não causaram variações significativas na porosidade aparente. Assim, a introdução do tensoactivo (introdutor de ar) pode ter sido mais condicionante para a porosidade do que a pasta ligante, com as bolhas de ar

resultantes a aumentarem a porosidade de forma geral, esbatendo as diferenças entre argamassas.

Por outro lado, a substituição de areia por agregados isolantes originou argamassas com uma porosidade aberta bastante superior à das argamassas de areia, com aumentos entre 95 e 124%. Estes aumentos são expectáveis devido à maior porosidade dos agregados isolantes face à areia; contudo, a presença do tensoactivo pode ter contribuído para aumentar ainda mais a diferença entre argamassas com agregados isolantes (com adjuvantes) e as argamassa de areia (sem adjuvantes).

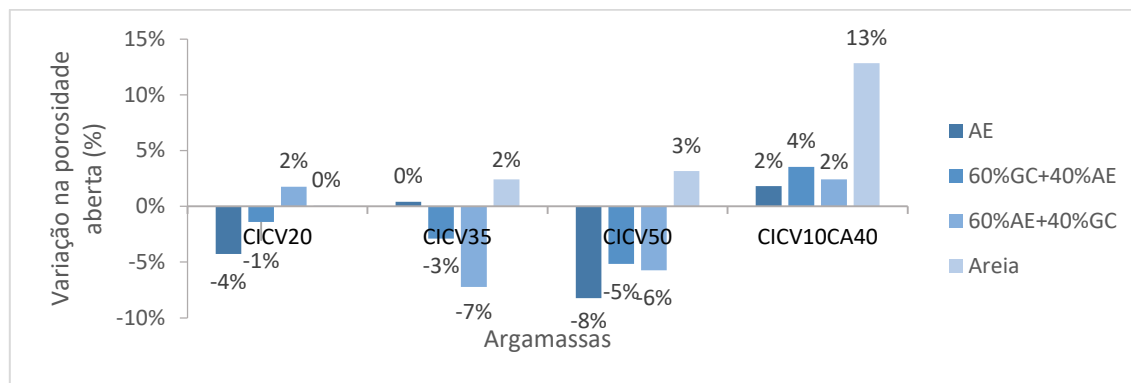


Figura 4.8 - Variação na porosidade aparente relativamente às argamassas de cimento ( $CI^{100AE}$ ,  $CI^{60GC}_{40AE}$ ,  $CI^{60AE}_{40GC}$  e  $CI^{100A}$ , respectivamente)

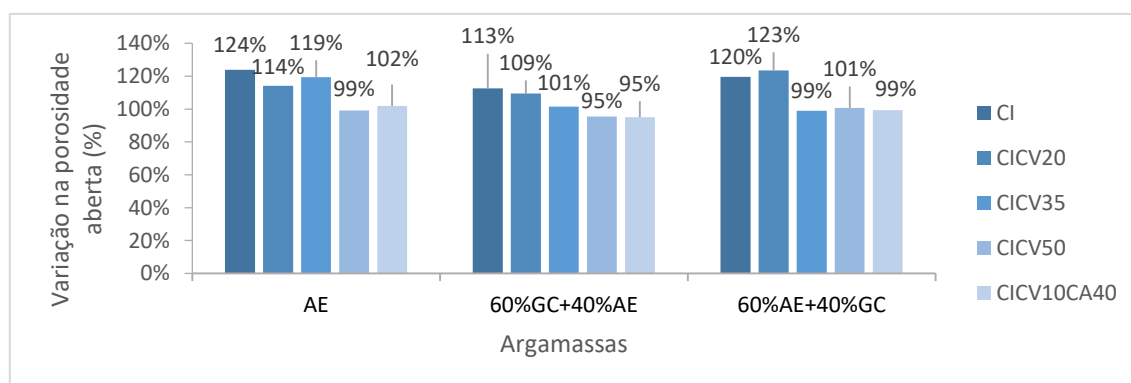


Figura 4.9 - Variação na porosidade aparente relativamente às argamassas de areia ( $CI^{100A}$ ,  $CICV20^{100A}$ ,  $CICV35^{100A}$ ,  $CICV50^{100A}$  e  $CICV10CA40^{100A}$ , respectivamente)

Com efeito, Vale *et al.* (2014) obtiveram um valor de 37,5% para a porosidade aparente de uma argamassa de cimento, sem adjuvantes, com 80% de granulado de cortiça em substituição da areia, o que constitui um aumento de 46% face à argamassa de referência. No entanto, para uma argamassa com adjuvantes e 70-80% de granulado de cortiça, os mesmos autores já registaram uma porosidade aparente de 46,4%, o que constitui um aumento de 81% em relação à argamassa de referência.

## ii) Massa volúmica aparente

Na Figura 4.13, estão representadas as percentagens de variação na massa volúmica aparente de cada argamassa quando comparada com a sua argamassa de cimento equivalente ( $CI^{100AE}$ ,  $CI^{60GC}_{40AE}$ ,  $CI^{60AE}_{40GC}$  ou  $CI^{100A}$ ), enquanto na Figura 4.14 a comparação é efectuada com a argamassa de areia equivalente ( $CI^{100A}$ ,  $CICV20^{100A}$ ,  $CICV35^{100A}$ ,  $CICV50^{100A}$  ou  $CICV10CA40^{100A}$ ).



Os valores obtidos pelos dois métodos usados para determinar a massa volúmica aparente são idênticos. A análise que se segue será referente aos resultados do método geométrico, pois este permitiu obter a massa volúmica aparente para todas as argamassas, ao contrário do método hidrostático.

Tal como para a porosidade aparente, as massas volúmicas aparentes determinadas para cada uma das pastas ligantes são semelhantes. Silva (2010) também não registou alterações significativas em argamassas bastardas de cal aérea e cimento face à argamassa de cimento de referência. Contudo, numerosos autores reportam uma diminuição na massa volúmica aparente quando o cimento é substituído por cinzas volantes (Demirboga, 2003a). Mais uma vez a explicação poderá residir na acção do tensoactivo que, ao alterar a porosidade, afecta consequentemente a massa volúmica aparente.

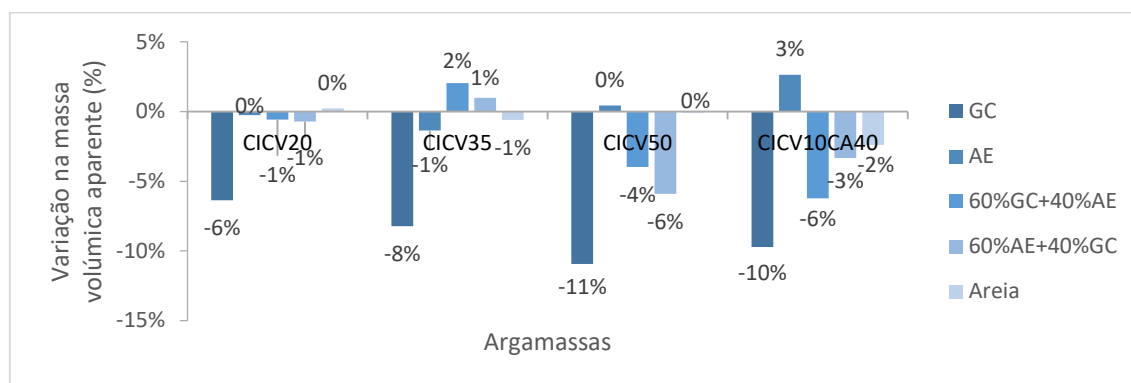


Figura 4.10 - Variação na massa volúmica aparente, calculado pelo método geométrico, relativamente às argamassas de cimento ( $CI^{100GC}$ ,  $CI^{100AE}$ ,  $CI^{60GC_{40}AE}$ ,  $CI^{60AE_{40}GC}$  e  $CI^{100A}$ , respectivamente)

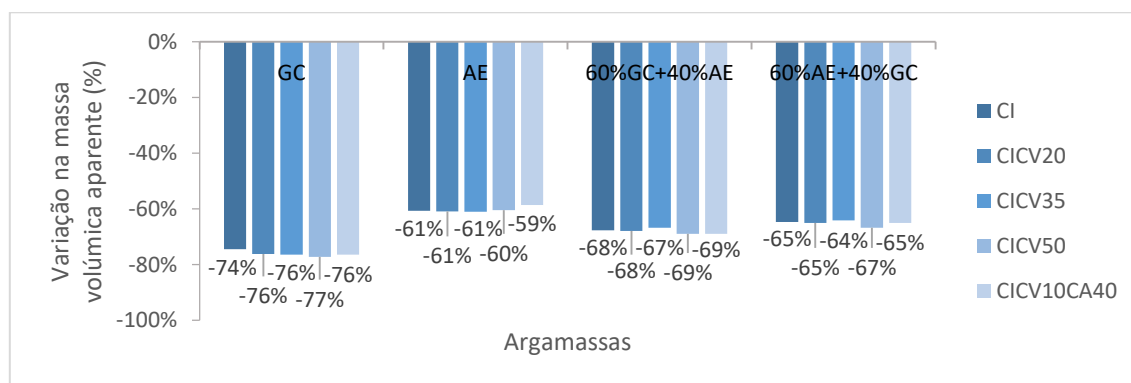


Figura 4.11 - Variação na massa volúmica aparente, calculado pelo método geométrico, relativamente às argamassas de areia ( $CI^{100A}$ ,  $CICV20^{100A}$ ,  $CICV35^{100A}$ ,  $CICV50^{100A}$  e  $CICV10CA40^{100A}$ , respectivamente)

Por outro lado, o efeito da substituição de areia por agregados isolantes é notório. Constata-se que as argamassas com granulado de cortiça expandida apresentam massas volúmicas bastante inferiores às restantes e, em média, 76% inferiores às de areia, o que vai ao encontro do esperado, devido à baixa baridade deste agregado. As argamassas de argila expandida apresentaram também uma diminuição elevada, de 60% em média.

Silva *et al.* (2015) produziram argamassas com formulações idênticas às das argamassas  $CI^{100GC}$ ,  $CI^{100AE}$ ,  $CI^{60GC_{40}AE}$  e  $CI^{60AE_{40}GC}$ , tendo obtido valores para a massa volúmica aparente de 473, 841,

668 e 718 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente; estes valores são da mesma ordem de grandeza dos registrados no presente estudo, que foram de 487, 751, 618 e 674 kg/m<sup>3</sup> para as referidas argamassas.

### 4.3.2 Módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de *Poisson*

A medição das frequências de ressonância das argamassas permitiu a determinação dos seus módulos de elasticidade dinâmico e coeficientes de *Poisson*, aos 28 dias. Estes resultados estão patentes na Tabela 4.8. Os resultados individuais de cada ensaio encontram-se no Anexo A8.

Tabela 4.8 - Módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de *Poisson* (Fase 2)

	<b>E<sub>d</sub> (MPa)</b>	<b>DP (MPa)</b>	<b>CV (%)</b>	<b>v</b>	<b>DP</b>	<b>CV (%)</b>
<b>CI<sup>100GC</sup></b>	505	18	4	0,25	0,04	15
<b>CI<sup>100AE</sup></b>	3446	93	3	0,24	0,03	13
<b>CI<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	1267	52	4	0,20	0,04	18
<b>CI<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	1994	115	6	0,22	0,03	16
<b>CI<sup>100A</sup></b>	13729	739	5	0,15	0,02	15
<b>CICV20<sup>100GC</sup></b>	404	13	3	0,24	0,06	23
<b>CICV20<sup>100AE</sup></b>	3414	104	3	0,25	0,03	13
<b>CICV20<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	1216	50	4	0,24	0,04	18
<b>CICV20<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	1897	67	4	0,26	0,02	8
<b>CICV20<sup>100A</sup></b>	12860	533	4	0,14	0,03	19
<b>CICV35<sup>100GC</sup></b>	345	7	2	0,16	0,03	17
<b>CICV35<sup>100AE</sup></b>	3162	225	7	0,31	0,04	14
<b>CICV35<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	1210	78	6	0,23	0,03	13
<b>CICV35<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	1862	81	4	0,23	0,02	8
<b>CICV35<sup>100A</sup></b>	9807	270	3	0,14	0,03	19
<b>CICV50<sup>100GC</sup></b>	256	6	2	0,15	0,07	43
<b>CICV50<sup>100AE</sup></b>	3154	99	3	0,24	0,01	6
<b>CICV50<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	910	29	3	0,23	0,01	5
<b>CICV50<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	1365	45	3	0,28	0,03	12
<b>CICV50<sup>100A</sup></b>	7899	492	6	0,18	0,01	7
<b>CICV10CA40<sup>100GC</sup></b>	249	10	4	0,14	0,03	19
<b>CICV10CA40<sup>100AE</sup></b>	2852	113	4	0,26	0,03	11
<b>CICV10CA40<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	685	22	3	0,21	0,04	18
<b>CICV10CA40<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	1225	63	5	0,23	0,01	6
<b>CICV10CA40<sup>100A</sup></b>	5830	136	2	0,15	0,02	12

Legenda: E<sub>d</sub> - módulo de elasticidade dinâmico; v - coeficiente de *Poisson*;  
DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

#### i) Influência da pasta ligante

Nas Figuras 4.12 e 4.13, estão representadas, respectivamente, as percentagens de variação do módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de *Poisson* de cada argamassa quando comparada com a sua argamassa de cimento equivalente (CI<sup>100GC</sup>, CI<sup>100AE</sup>, CI<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub>, CI<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub> ou CI<sup>100A</sup>).

Constata-se que se mantém a tendência de menor susceptibilidade a variações na pasta ligante para agregados de argila expandida, com a diminuição máxima no módulo de elasticidade destas argamassas a ser de apenas 17%. Para argamassas com os dois tipos de agregado, a variação do módulo de elasticidade apenas começou a ser significativa a partir de uma substituição de 50% de cinzas volantes (argamassas CICV50), com diminuições entre 28 e 32%. Já nas argamassas com

100% de granulado de cortiça expandida, uma substituição de 20% de cimento traduziu-se imediatamente numa redução do módulo de elasticidade em 20%.

O módulo de elasticidade dinâmico será tanto maior quanto mais compacta for a argamassa; consequentemente, menor será a sua capacidade de deformação, estando mais facilmente sujeita ao aparecimento de fendilhação. Assim sendo, a substituição de cimento por cinzas volantes e/ou cal aérea poderá ser benéfica para aplicações onde é importante ter argamassas com maior capacidade de deformação do que a atingida por argamassas apenas com cimento.

O coeficiente de *Poisson* variou entre 0,14 e os 0,31 mas, ao contrário das propriedades referidas, não existe uma relação entre as alterações na pasta ligante e a variação deste coeficiente.

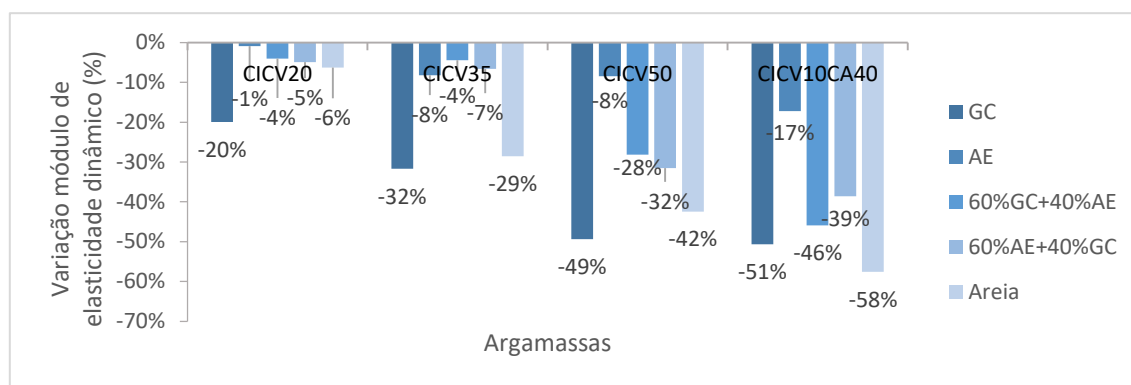


Figura 4.12 - Variação no módulo de elasticidade dinâmico relativamente às argamassas de cimento ( $CI^{100GC}$ ,  $CI^{100AE}$ ,  $CI^{60GC}_{40AE}$ ,  $CI^{60AE}_{40GC}$  e  $CI^{100A}$ , respectivamente)

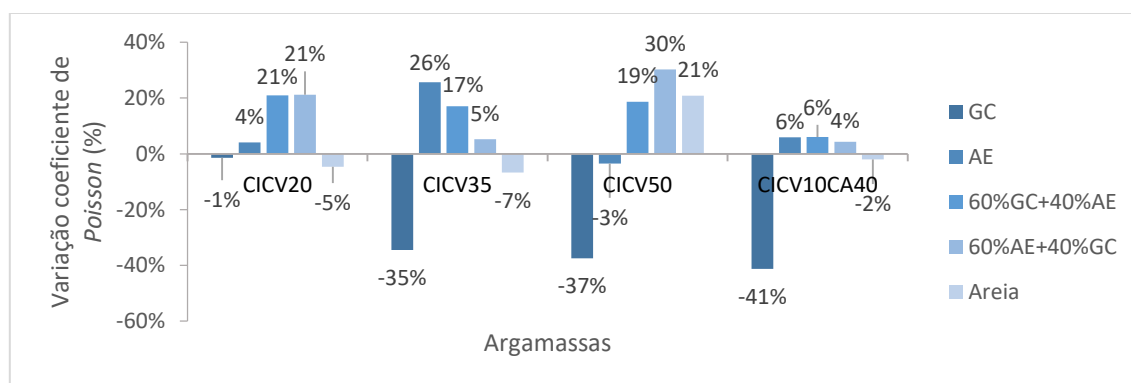


Figura 4.13 - Variação no coeficiente de *Poisson* relativamente às argamassas de cimento ( $CI^{100GC}$ ,  $CI^{100AE}$ ,  $CI^{60GC}_{40AE}$ ,  $CI^{60AE}_{40GC}$  e  $CI^{100A}$ , respectivamente)

## ii) Influência do agregado

Nas Figuras 4.14 e 4.15, estão representadas as percentagens de variação do módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de *Poisson* de cada argamassa quando comparada com a sua argamassa de areia equivalente ( $CI^{100A}$ ,  $CICV20^{100A}$ ,  $CICV35^{100A}$ ,  $CICV50^{100A}$  ou  $CICV10CA40^{100A}$ ).

Tal como verificado para as resistências mecânicas, as argamassas que apresentam um maior módulo de elasticidade dinâmico são as constituídas por 100% de argila expandida ( $CI^{100AE}$ ,  $CICV20^{100AE}$ ,  $CICV35^{100AE}$ ,  $CICV50^{100AE}$  e  $CICV10CA40^{100AE}$ ), com valores entre 2852 e 3446 MPa.

Os menores módulos de elasticidade dinâmico foram obtidos nas argamassas com 100% de granulado de cortiça expandida (CI<sup>100GC</sup>, CICV20<sup>100GC</sup>, CICV35<sup>100GC</sup>, CICV50<sup>100GC</sup> e CICV10CA40<sup>100CG</sup>), com valores a variar entre 249 e 505 MPa. Estes resultados mostram que as argamassas com granulado de cortiça expandida são muito mais deformáveis do que as argamassas de areia (o módulo de elasticidade dinâmico diminuiu, em média, 96%). De entre as argamassas com agregados isolantes, as constituídas por argila expandida são as mais rígidas, mas ainda assim a diminuição de rigidez face às argamassas de areia foi considerável (em média, 65%). Contudo, é importante referir que as elevadas percentagens de variação registadas podem dever-se não só aos agregados isolantes, mas também aos adjuvantes utilizados, como se viu na Fase 1.

Em relação ao coeficiente de *Poisson*, de um modo geral, este aumentou nas argamassas com agregados isolantes, quando comparadas com a respectiva argamassa de areia, o que indica a maior capacidade de deformação das argamassas com substituição de agregados.

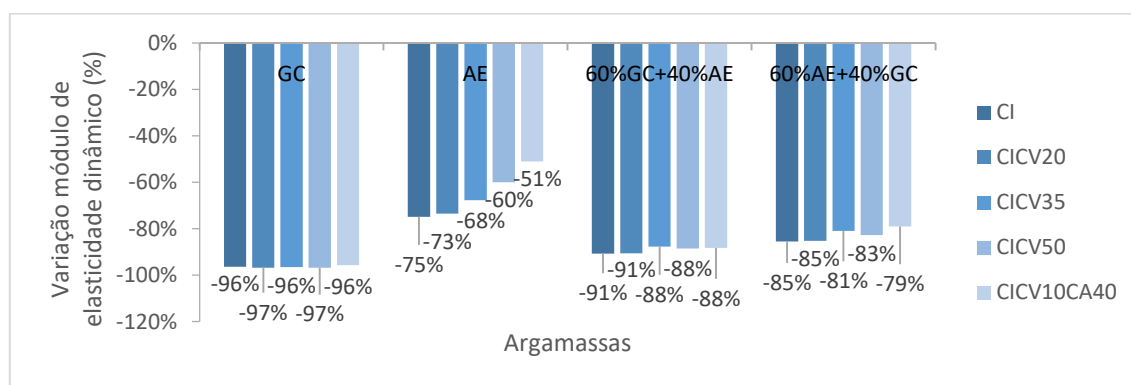


Figura 4.14 - Variação no módulo de elasticidade dinâmico relativamente às argamassas de areia (CI<sup>100A</sup>, CICV20<sup>100A</sup>, CICV35<sup>100A</sup>, CICV50<sup>100A</sup> e CICV10CA40<sup>100A</sup>, respectivamente)

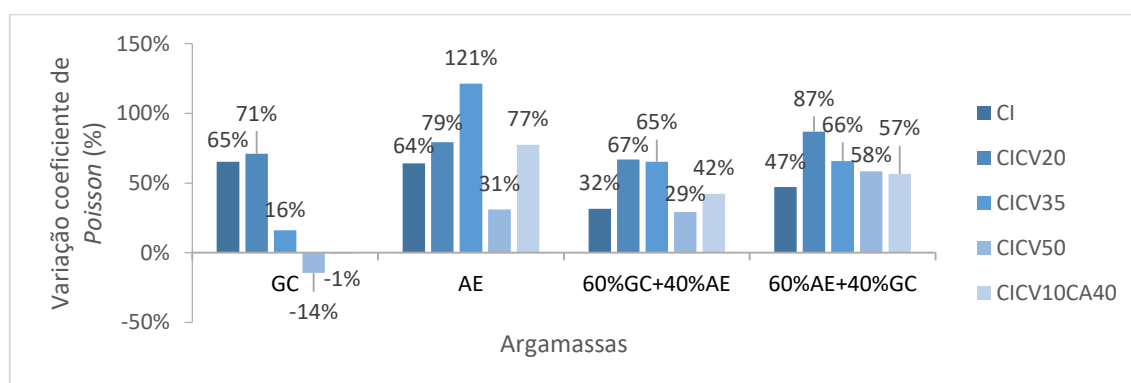


Figura 4.15 - Variação no coeficiente de *Poisson* relativamente às argamassas de areia (CI<sup>100A</sup>, CICV20<sup>100A</sup>, CICV35<sup>100A</sup>, CICV50<sup>100A</sup> e CICV10CA40<sup>100A</sup>, respectivamente)

Afonso (2015) produziu duas argamassas de cimento com substituição da areia por granulado de cortiça expandida ou argila expandida, semelhantes às argamassas CI<sup>100GC</sup> e CI<sup>100AE</sup>, respectivamente; o autor observou uma diminuição no módulo de elasticidade dinâmico de 98%, para as duas argamassas, o que vai ao encontro dos resultados obtidos no presente estudo (diminuição de 96%).

Silva *et al.* (2015) produziram argamassas com formulações idênticas às das argamassas CI<sup>100GC</sup>,

CI<sup>100AE</sup>, CI<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub> e CI<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub>, tendo obtido reduções no módulo de elasticidade dinâmico, face à argamassa de referência, de 98, 65, 91 e 84%, respectivamente; estes valores são muito semelhantes aos registados no presente estudo, em que as reduções foram de 96, 75, 91 e 85% para as referidas argamassas.

Não se verificou qualquer relação com a porosidade aparente das argamassas isolantes, possivelmente devido à acção do tensioactivo, como referido. Já para as argamassas de areia, sem adjuvantes, foi obtido um coeficiente de correlação R<sup>2</sup> de 0,85 como se pode observar na Figura 4.16.

Por outro lado, o módulo de elasticidade dinâmico pode ser relacionado com a massa volúmica aparente. Para as argamassas com agregados isolantes, registou-se uma correlação muito elevada, com um R<sup>2</sup> igual a 0,97, enquanto para as argamassas de areia este valor é de apenas 0,69. Flores-Colen (2009), Vale *et al.* (2014) e Afonso (2015) também obtiveram elevadas correlações de potência entre estas propriedades. Observando a Figura 4.17, também é possível constatar que às argamassas com agregados isolantes, com massas volúmicas aparentes, aproximadamente, entre 500 e 900 kg/m<sup>3</sup>, correspondem módulos de elasticidade dinâmico inferiores a 5000 MPa. Para as argamassas de areia, cuja massa volúmica aparente se manteve praticamente constante, o módulo de elasticidade dinâmico registou uma amplitude ainda maior (cerca de 8000 MPa).

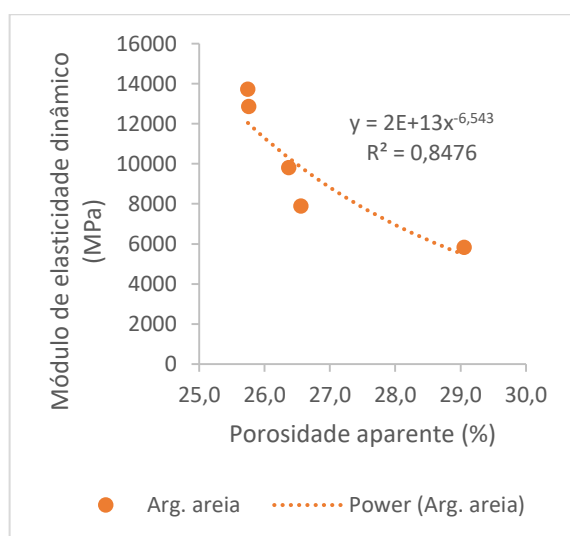


Figura 4.16 - Relação entre a porosidade aparente e o módulo de elasticidade dinâmico

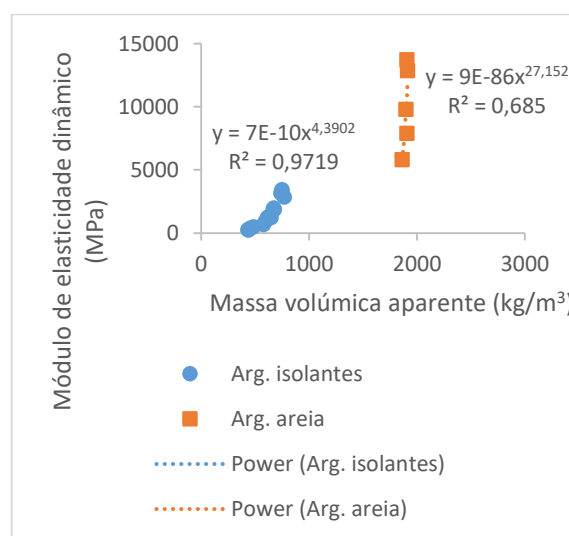


Figura 4.17 - Relação entre a massa volúmica aparente e o módulo de elasticidade dinâmico

### 4.3.3 Resistência à tracção por flexão

Tal como na Fase 1, os valores para a resistência à tracção por flexão, aos 28 dias, foram estimados através da correlação com o módulo de elasticidade dinâmico de Silva *et al.* (2015). A Tabela 4.9 apresenta os valores medidos e estimados para todas as argamassas. No Anexo A9, podem ser consultados os resultados individuais de cada ensaio.

### i) Influência da pasta ligante

Na Figura 4.18, estão representadas as percentagens de variação na resistência à tracção de cada argamassa quando comparada com a sua argamassa de cimento equivalente (CI<sup>100GC</sup>, CI<sup>100AE</sup>, CI<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub>, CI<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub> ou CI<sup>100A</sup>).

Constata-se que a substituição de 20% de cimento por cinzas volantes (argamassas CICV20) originou argamassas com resistências à tracção semelhantes às das argamassas CI. A substituição de 35% do cimento (argamassas CICV35) apenas causou alguma variação nas argamassas de granulado de cortiça expandida e areia. As argamassas com 50% de cinzas volantes (argamassas CICV50) e com cinzas volantes e cal aérea (argamassas CICV10CA40) já apresentam diminuições não desprezáveis na sua resistência à tracção, para todos os agregados excepto a argila expandida. De facto, é notório que, para todas as pastas ligantes, a resistência das argamassas de argila expandida é semelhante à correspondente argamassa de cimento (variações entre 0 e 7%), isto é, a variação na pasta ligante parece não ter influência sobre a resistência destas argamassas.

Tabela 4.9 - Resistência à tracção por flexão (Fase 2)

	R <sub>t</sub> (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	R corr (MPa)
CI <sup>100GC</sup>	(-)	(-)	(-)	0,64
CI <sup>100AE</sup>	(-)	(-)	(-)	1,40
CI <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	(-)	(-)	(-)	0,93
CI <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	(-)	(-)	(-)	1,12
CI <sup>100A</sup>	2,83	0,41	14	2,45
CICV20 <sup>100GC</sup>	(-)	(-)	(-)	0,59
CICV20 <sup>100AE</sup>	(-)	(-)	(-)	1,40
CICV20 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	(-)	(-)	(-)	0,92
CICV20 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	(-)	(-)	(-)	1,10
CICV20 <sup>100A</sup>	2,49	0,21	9	2,39
CICV35 <sup>100GC</sup>	(-)	(-)	(-)	0,55
CICV35 <sup>100AE</sup>	1,27	0,01	1	1,35
CICV35 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	0,83	0,06	7	0,92
CICV35 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	0,86	0,06	7	1,09
CICV35 <sup>100A</sup>	1,83	0,11	6	2,14
CICV50 <sup>100GC</sup>	0,40	0,04	10	0,49
CICV50 <sup>100AE</sup>	1,06	0,02	2	1,35
CICV50 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	0,57	0,02	4	0,82
CICV50 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	0,63	0,03	5	0,96
CICV50 <sup>100A</sup>	1,46	0,07	5	1,96
CICV10CA40 <sup>100GC</sup>	0,36	0,03	10	0,48
CICV10CA40 <sup>100AE</sup>	0,89	0,07	8	1,30
CICV10CA40 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	0,46	0,03	5	0,73
CICV10CA40 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	0,57	0,02	4	0,92
CICV10CA40 <sup>100A</sup>	0,95	0,09	10	1,74

Legenda: R<sub>t</sub> - resistência à tracção média; R<sub>t</sub> corr - valores de R<sub>t</sub> segundo a correlação de Silva *et al.* (2015); DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; (-) - ensaio nulo.

Estudos de outros autores corroboram estes resultados. Xu *et al.* (1993) concluíram que substituição de cimento por cinzas volantes origina argamassas com menores resistências à tracção do que a argamassa de referência, aos 28 dias. Por outro lado, Arandigoyen & Alvarez (2007) e Silva (2010)

verificaram que a adição de pequenas quantidades de cal aérea a argamassas cimentícias causa uma diminuição acentuada da resistência, quer à tracção, quer à compressão.

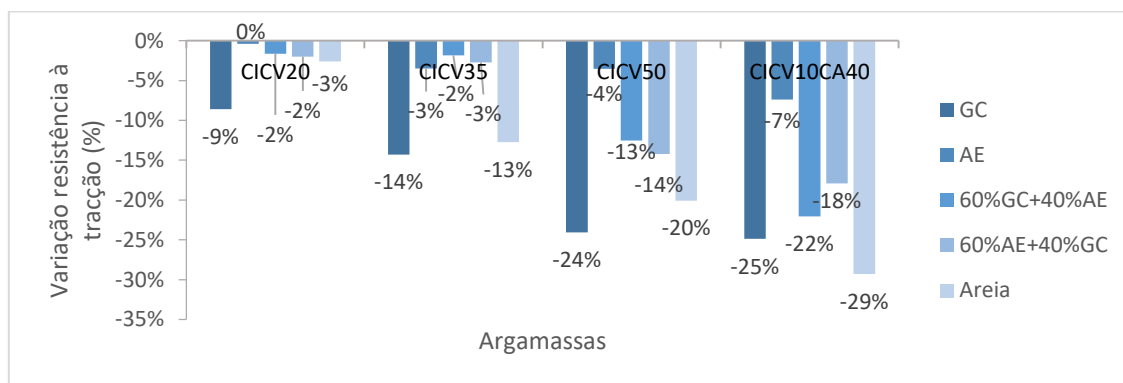


Figura 4.18 - Variação na resistência à tracção relativamente às argamassas de cimento ( $CI^{100GC}$ ,  $CI^{100AE}$ ,  $CI^{60GC_{40AE}}$ ,  $CI^{60AE_{40GC}}$  e  $CI^{100A}$ , respectivamente)

### i) Influência do agregado

Na Figura 4.19, estão representadas as percentagens de variação na resistência à tracção de cada argamassa quando comparada com a sua argamassa de areia equivalente ( $CI^{100A}$ ,  $CICV20^{100A}$ ,  $CICV35^{100A}$ ,  $CICV50^{100A}$  ou  $CICV10CA40^{100A}$ ).

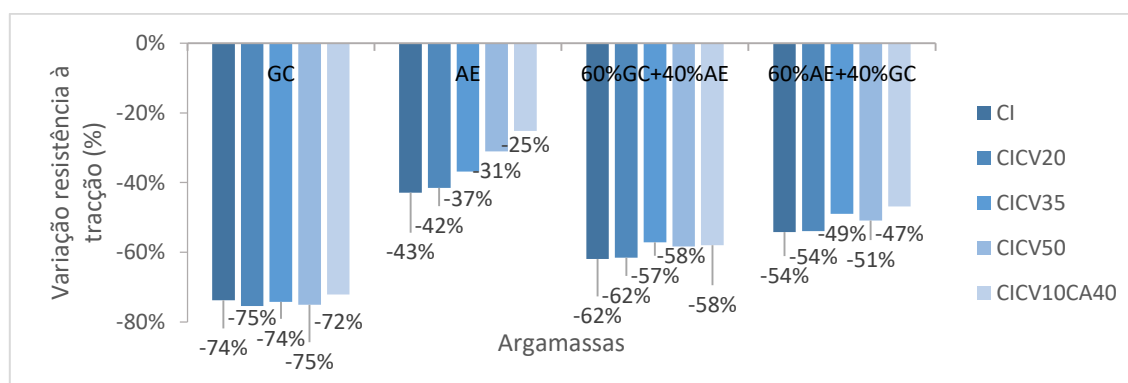


Figura 4.19 - Variação na resistência à tracção relativamente às argamassas de areia ( $CI^{100A}$ ,  $CICV20^{100A}$ ,  $CICV35^{100A}$ ,  $CICV50^{100A}$  e  $CICV10CA40^{100A}$ , respectivamente)

De entre as argamassas com agregados isolantes, as que apresentam maior resistência à tracção são as constituídas por 100% de argila expandida ( $CI^{100AE}$ ,  $CICV20^{100AE}$ ,  $CICV35^{100AE}$ ,  $CICV50^{100AE}$  e  $CICV10CA40^{100AE}$ ), com valores entre 1,30 e 1,40 MPa. As menores resistências verificam-se para uma constituição de 100% de granulado de cortiça expandida ( $CI^{100GC}$ ,  $CICV20^{100GC}$ ,  $CICV35^{100GC}$ ,  $CICV50^{100GC}$  e  $CICV10CA40^{100GC}$ ), com valores entre 0,64 e 0,48 MPa. Verifica-se então que a introdução de granulado de cortiça expandida tem um efeito muito negativo na resistência à tracção, que diminuiu em média 74% face às argamassas de areia. As argamassas de argila expandida foram aquelas que registaram uma menor redução (36%, em média), enquanto as argamassas constituídas pelos dois agregados isolantes obtiveram valores intermédios. De acordo com o verificado na Fase 1, a adição de adjuvantes não terá tido influência nesta propriedade.

Outros autores tiraram conclusões semelhantes dos seus estudos. Vale *et al.* (2014) obtiveram um valor de 1,15 MPa para a resistência à tracção de uma argamassa de cimento, sem adjuvantes, com 80% de granulado de cortiça em substituição da areia, o que constitui uma diminuição de 66% face à argamassa de referência. Brás *et al.* (2013) obtiveram para uma argamassa semelhante, mas com adjuvantes, uma resistência de 1,7 MPa, o que corresponde a uma diminuição de 67% face à referência. Neste estudo, a argamassa CI<sup>100GC</sup> (com 100% de granulado de cortiça expandida) apresenta uma resistência à tracção de 0,64 MPa, isto é, 77% inferior à da argamassa CI<sup>100A</sup>.

Silva *et al.* (2015) produziram argamassas com formulações idênticas às das argamassas CI<sup>100GC</sup>, CI<sup>100AE</sup>, CI<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub> e CI<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub>, tendo obtido valores para a resistência à tracção de 0,41 MPa, 1,43 MPa, 0,96 MPa e 1,13 MPa, respectivamente; estes valores vão ao encontro dos registados no presente estudo, que foram de 0,64 MPa, 1,40 MPa, 0,93 MPa e 1,12 MPa para as referidas argamassas.

#### 4.3.4 Resistência à compressão

O valores da resistência à compressão medidos aos 28 dias e estimados através da correlação de Silva *et al.* (2015) podem ser observados na Tabela 4.10. No Anexo A10, são apresentados os resultados individuais de cada ensaio.

Também na Tabela 4.10 está indicada a classificação de cada uma das argamassas de acordo com a EN 998-1 (CEN, 2010). As argamassas com agregados isolantes enquadram-se nas classificações para as argamassas térmicas, que devem apresentar resistência à compressão entre 0,4 e 5 MPa (classes CS I a CS II).

##### i) Influência da pasta ligante

Na Figura 4.20, estão representadas as percentagens de variação na resistência à compressão de cada argamassa quando comparada com a sua argamassa de cimento equivalente (CI<sup>100GC</sup>, CI<sup>100AE</sup>, CI<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub>, CI<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub> ou CI<sup>100A</sup>).

A resistência à compressão variou de forma semelhante à da resistência à tracção: a partir de 35% de substituição (argamassas CICV35), ocorre uma diminuição na resistência das argamassas de areia e granulado de cortiça expandida, diminuição essa que é transversal a todas as argamassas, excepto as de argila expandida, a partir de 50% de substituição (argamassas CICV50 e CICV10CA40). Assim, a menor susceptibilidade das argamassas de argila expandida à alteração da pasta ligante volta a ser notória.

Demirboga (2003a; 2003b) produziu argamassas de areia com percentagens crescentes de substituição de cimento por cinzas volantes (entre 10 e 70%), tendo verificado que, quanto maior a percentagem de cinzas volantes, maior é a diminuição na resistência à compressão, quando comparada com uma argamassa de referência. Tal diminuição deve-se às propriedades das cinzas volantes que diminuem o calor de hidratação do cimento e que necessitam de um período de cura mais longo. Para percentagens de 20, 30 e 50% (com formulações semelhantes às argamassas CICV20<sup>100A</sup>, CICV35<sup>100A</sup> e CICV50<sup>100A</sup>), o autor registou reduções na resistência de 38, 41 e 64%, respectivamente; estes resultados são superiores aos obtidos neste estudo para as argamassas



referidas, que sofreram diminuições de 4, 18 e 28%, respectivamente. Esta diferença pode ser explicada pelo traço mais forte usado pelo autor (1:2 por oposição a 1:4), o que torna as argamassas mais susceptíveis a alterações na pasta ligante.

Tabela 4.10 - Resistência à compressão (Fase 2)

	R <sub>c</sub> (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	R <sub>c_corr</sub> (MPa)	Classificação EN 998-1
CI <sup>100GC</sup>	(-)	(-)	(-)	1,37	CS I
CI <sup>100AE</sup>	(-)	(-)	(-)	4,21	CS II
CI <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	(-)	(-)	(-)	2,35	CS I
CI <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	(-)	(-)	(-)	3,06	CS II
CI <sup>100A</sup>	11,93	1,00	8	9,42	CS IV
CICV20 <sup>100GC</sup>	(-)	(-)	(-)	1,21	CS I
CICV20 <sup>100AE</sup>	(-)	(-)	(-)	4,18	CS II
CICV20 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	(-)	(-)	(-)	2,29	CS I
CICV20 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	(-)	(-)	(-)	2,97	CS II
CICV20 <sup>100A</sup>	9,67	0,32	3	9,07	CS IV
CICV35 <sup>100GC</sup>	(-)	(-)	(-)	1,10	CS I
CICV35 <sup>100AE</sup>	3,73	0,21	6	4,00	CS II
CICV35 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	1,74	0,20	11	2,28	CS I
CICV35 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	2,03	0,09	5	2,94	CS I
CICV35 <sup>100A</sup>	7,07	0,39	6	7,74	CS IV
CICV50 <sup>100GC</sup>	0,64	0,04	6	0,93	CS I
CICV50 <sup>100AE</sup>	2,74	0,24	9	4,00	CS II
CICV50 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	1,08	0,03	3	1,94	CS I
CICV50 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	1,40	0,03	2	2,45	CS I
CICV50 <sup>100A</sup>	4,97	0,33	7	6,82	CS II
CICV10CA40 <sup>100GC</sup>	0,58	0,05	9	0,91	CS I
CICV10CA40 <sup>100AE</sup>	2,13	0,18	8	3,77	CS II
CICV10CA40 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	0,82	0,05	6	1,64	CS I
CICV10CA40 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	1,14	0,09	8	2,30	CS I
CICV10CA40 <sup>100A</sup>	2,84	0,05	2	5,72	CS III

Legenda: R<sub>c</sub> - resistência à compressão; R<sub>c\_corr</sub> - valores de R<sub>c</sub> segundo a correlação de Silva *et al.* (2015); DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; (-) - ensaio nulo.

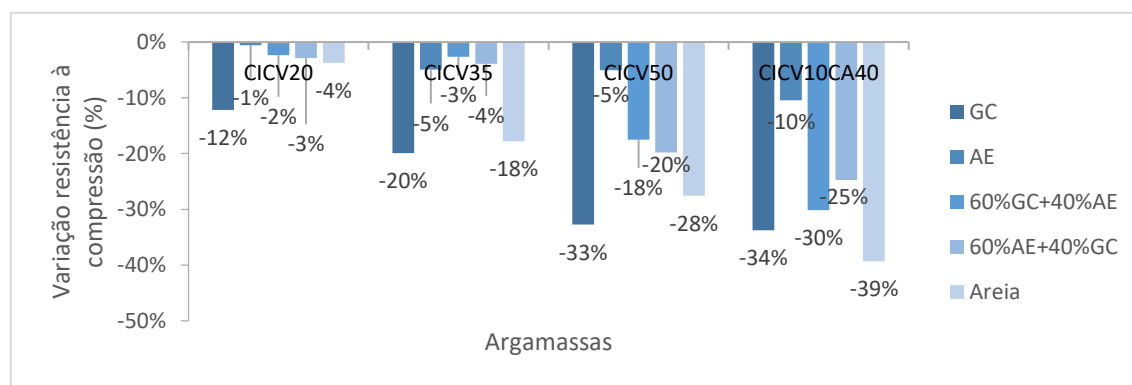


Figura 4.20 - Variação na resistência à compressão relativamente às argamassas de cimento (CI<sup>100GC</sup>, CI<sup>100AE</sup>, CI<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub>, CI<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub> e CI<sup>100A</sup>, respectivamente)

Os ensaios deste estudo, assim como os de Demirboga (2003a; 2003b), foram feitos aos 28 dias. O mesmo autor realizou ensaios em várias idades, tendo constatado que, com o passar do tempo, as diferenças entre a argamassa de referência e as argamassas com cinzas volantes se foram esbatendo;

para substituições de 10 e 20%, a resistência à compressão das argamassas com cinzas volantes foi mesmo superior à da argamassa de referência.

## ii) Influência do agregado

Na Figura 4.21, estão representadas as percentagens de variação na resistência à tracção de cada argamassa quando comparada com a sua argamassa de areia equivalente ( $CI^{100A}$ ,  $CICV20^{100A}$ ,  $CICV35^{100A}$ ,  $CICV50^{100A}$  ou  $CICV10CA40^{100A}$ ).

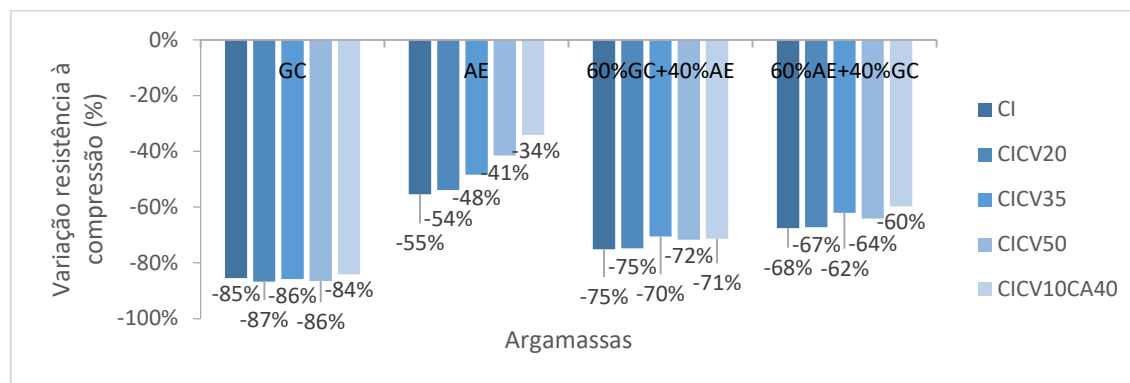


Figura 4.21 - Variação na resistência à compressão relativamente às argamassas de areia ( $CI^{100A}$ ,  $CICV20^{100A}$ ,  $CICV35^{100A}$ ,  $CICV50^{100A}$  e  $CICV10CA40^{100A}$ , respectivamente)

Tal como para a resistência à tracção, as argamassas com maior resistência à compressão são as constituídas por 100% de argila expandida ( $CI^{100AE}$ ,  $CICV20^{100AE}$ ,  $CICV35^{100AE}$ ,  $CICV50^{100AE}$  e  $CICV10CA40^{100AE}$ ), com valores entre 3,77 e 4,21 MPa. As argamassas com 100% de granulado de cortiça expandida ( $CI^{100GC}$ ,  $CICV20^{100GC}$ ,  $CICV35^{100GC}$ ,  $CICV50^{100GC}$  e  $CICV10CA40^{100GC}$ ) são as que apresentam menor resistência, com valores que variam entre 0,91 e 1,37 MPa. Conclui-se assim que a introdução de granulado de cortiça expandida tem um efeito muito negativo na resistência à compressão, que diminuiu em média 86% face às argamassas de areia. As argamassas de argila expandida foram aquelas que registaram uma menor redução (46%, em média), enquanto as argamassas constituídas pelos dois agregados isolantes obtiveram valores intermédios. Segundo os resultados obtidos na Fase 1, a diminuição na resistência face às argamassas de areia pode também dever-se, em parte, à presença de adjuvantes.

Estudos de outros autores vêm corroborar estes resultados. Vale *et al.* (2014) obtiveram, para uma argamassa de cimento, sem adjuvantes e com 80% de granulado de cortiça em substituição da areia, um valor de 2,08 MPa para a resistência à compressão; tal corresponde a uma diminuição de 87% face à argamassa de referência. Brás *et al.* (2013) obtiveram, para uma argamassa semelhante, mas com adjuvantes, uma resistência de 3,9 MPa, o que constitui uma redução de 75% face à referência. No presente estudo, a argamassa  $CI^{100GC}$  (com 100% de granulado de cortiça expandida) tem uma resistência à compressão de 1,37 MPa, isto é, 85% inferior à da argamassa  $CI^{100A}$ .

Silva *et al.* (2015) produziram argamassas com formulações idênticas às das argamassas  $CI^{100GC}$ ,  $CI^{100AE}$ ,  $CI^{60GC40AE}$  e  $CI^{60AE40GC}$ , tendo obtido valores para a resistência à compressão de 0,78 MPa, 4,83 MPa, 2,04 MPa e 2,94 MPa, respectivamente; estes valores são da mesma ordem de grandeza

dos registados no presente estudo, que foram de 1,37, 4,21, 2,35 e 3,06 MPa para as referidas argamassas.

Tal como para o módulo de elasticidade dinâmico, apenas se verificou uma relação entre a resistência à compressão e a porosidade aparente para as argamassas de areia (Figura 4.22). Mais uma vez, a introdução do tensoactivo nas argamassas com agregados isolantes poderá explicar esta discrepância.

A resistência à compressão pode também ser relacionada com a massa volúmica aparente. Para as argamassas com agregados isolantes foi registada uma correlação mais elevada ( $R^2$  igual a 0,82) do que para as argamassas de areia ( $R^2$  igual a 0,71). De facto, observando a Figura 4.23, é notório que as argamassas com agregados isolantes têm um comportamento diferente das argamassas de areia.

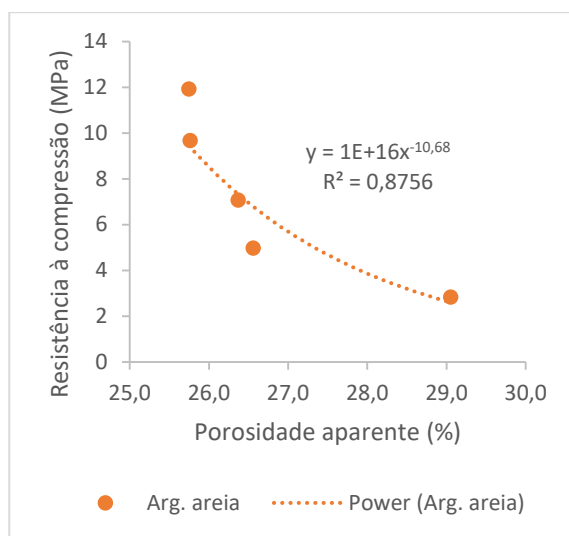


Figura 4.22 - Relação entre a porosidade aparente e a resistência à compressão

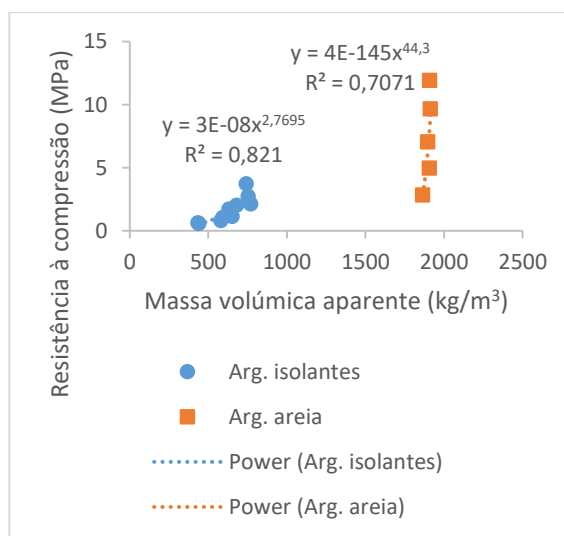


Figura 4.23 - Relação entre a massa volúmica aparente e a resistência à compressão

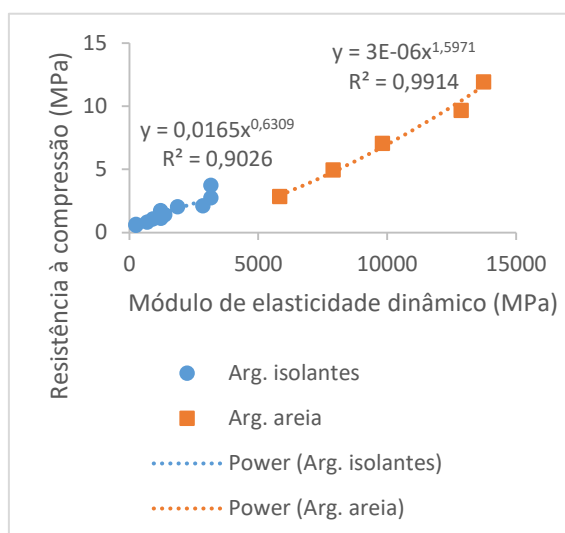


Figura 4.24 - Relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão

O mesmo não se passa quando se analisa a relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dinâmico. Como referido, o módulo de elasticidade dinâmico está relacionado com a resistência à compressão, tendo sido utilizado para estimar a mesma quando não foi possível obter

resultados por medição directa. Apesar de a Figura 4.24 mostrar separadamente as argamassas com os dois tipos de agregado, é claro que ambas apresentam a mesma tendência; quer se considere as argamassas em conjunto ou isoladamente, o  $R^2$  é sempre superior a 0,90. De facto, argamassas com um módulo de elasticidade mais elevado são mais compactas e, por isso, mais resistentes. Vale *et al.* (2014) e Flores-Colen (2009) também registaram correlações de potência entre estas duas propriedades.

#### 4.3.5 Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas

A velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, aos 28 dias, foi determinada segundo dois métodos: o directo, em provetes normalizados, e o indirecto, em modelos argamassa-tijolo. Os valores médios resultantes de ambos os métodos encontram-se na Tabela 4.11. Os valores individuais de cada ensaio, assim como os gráficos usados no método das dromocrónicas, podem ser consultados no Anexo A11.

Tabela 4.11 - Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas - método directo e indirecto (Fase 2)

	Método directo			Método indirecto			
				Médias			Dromocrónicas
	Vus (m/s)	DP (m/s)	CV (%)	Vus (m/s)	DP (m/s)	CV (%)	Vus (m/s)
<b>CI</b> <sup>100GC</sup>	1160	13	1	1745	460	26	1387
<b>CI</b> <sup>100AE</sup>	2331	26	1	3244	855	26	2295
<b>CI</b> <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	1648	20	1	n/a	n/a	n/a	n/a
<b>CI</b> <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	1963	27	1	n/a	n/a	n/a	n/a
<b>CI</b> <sup>100A</sup>	3131	42	1	3999	1290	32	2745
<b>CICV20</b> <sup>100GC</sup>	1190	18	1	1617	525	32	1418
<b>CICV20</b> <sup>100AE</sup>	2228	51	2	3140	813	26	2391
<b>CICV20</b> <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	1664	17	1	n/a	n/a	n/a	n/a
<b>CICV20</b> <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	1857	51	3	n/a	n/a	n/a	n/a
<b>CICV20</b> <sup>100A</sup>	2925	43	1	3877	822	21	3038
<b>CICV35</b> <sup>100GC</sup>	1110	10	1	n/a	n/a	n/a	n/a
<b>CICV35</b> <sup>100AE</sup>	2324	87	4	n/a	n/a	n/a	n/a
<b>CICV35</b> <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	1618	27	2	n/a	n/a	n/a	n/a
<b>CICV35</b> <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	1831	11	1	n/a	n/a	n/a	n/a
<b>CICV35</b> <sup>100A</sup>	2540	16	1	n/a	n/a	n/a	n/a
<b>CICV50</b> <sup>100GC</sup>	974	19	2	1297	682	53	837
<b>CICV50</b> <sup>100AE</sup>	2196	39	2	2518	676	27	1854
<b>CICV50</b> <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	1483	24	2	n/a	n/a	n/a	n/a
<b>CICV50</b> <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	1693	13	1	n/a	n/a	n/a	n/a
<b>CICV50</b> <sup>100A</sup>	2301	66	3	3004	808	27	2260
<b>CICV10CA40</b> <sup>100GC</sup>	968	21	2	1555	597	38	1165
<b>CICV10CA40</b> <sup>100AE</sup>	2132	27	1	2554	776	30	2076
<b>CICV10CA40</b> <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	1287	31	2	n/a	n/a	n/a	n/a
<b>CICV10CA40</b> <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	1573	18	1	n/a	n/a	n/a	n/a
<b>CICV10CA40</b> <sup>100A</sup>	2015	28	1	2800	828	30	2138

Legenda: Vus - velocidade de propagação média; DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; n/a - não aplicável.

- **Método directo**

- i) **Influência da pasta ligante**

Na Figura 4.25, estão representadas as percentagens de variação a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas de cada argamassa quando comparada com a sua argamassa de cimento equivalente ( $CI^{100GC}$ ,  $CI^{100AE}$ ,  $CI^{60GC}_{40AE}$ ,  $CI^{60AE}_{40GC}$  ou  $CI^{100A}$ ).

Observa-se que, para substituições de 20 e 35% de cimento (argamassas CICV20 e CICV35), não ocorrem variações significativas na velocidade de propagação (excepto para a argamassa  $CICV35^{100A}$ , que apresenta uma redução de 19%). Adicionalmente, as argamassas com agregados isolantes mostraram-se menos sensíveis às modificações na pasta ligante do que as argamassas de areia e, de entre estas, a menor variação ocorreu para as argamassas com 100% de argila expandida, com uma diminuição máxima de 9% para a argamassa  $CICV10CA40^{100AE}$ .

As maiores reduções na velocidade de propagação registaram-se nas argamassas com cal aérea, o que vai ao encontro do reportado por Silva *et al.* (2010), que verificou uma diminuição nesta propriedade em argamassas bastardas de cimento e cal aérea, face a argamassas de cimento.

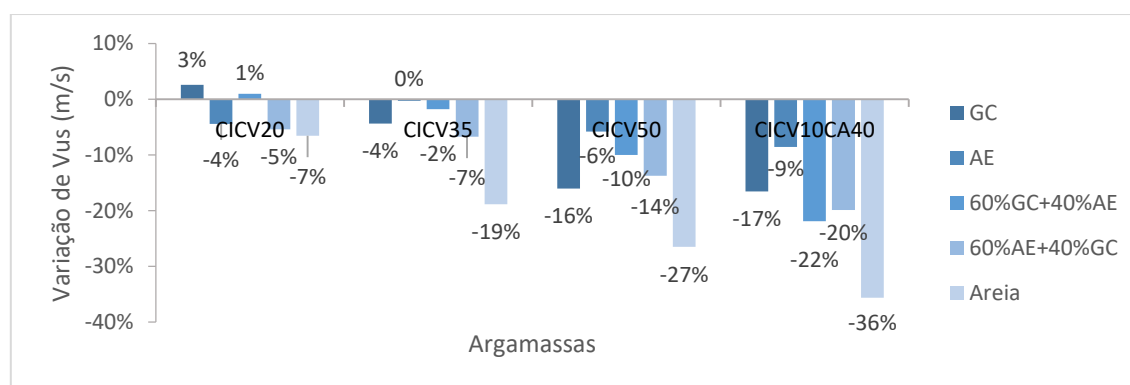


Figura 4.25 - Variação na velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas relativamente às argamassas de cimento ( $CI^{100GC}$ ,  $CI^{100AE}$ ,  $CI^{60GC}_{40AE}$ ,  $CI^{60AE}_{40GC}$  e  $CI^{100A}$ , respectivamente)

- ii) **Influência do agregado**

Na Figura 4.26, estão representadas as percentagens de variação da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas de cada argamassa quando comparada com a sua argamassa de areia equivalente ( $CI^{100A}$ ,  $CICV20^{100A}$ ,  $CICV35^{100A}$ ,  $CICV50^{100A}$  ou  $CICV10CA40^{100A}$ ).

Constata-se que, para argamassas com agregados isolantes, a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas varia entre 968 m/s e 2331 m/s. Comparando as misturas de agregados, verifica-se que os maiores valores de velocidade ocorrem nas argamassas com 100% de argila ( $CI^{100AE}$ ,  $CICV20^{100AE}$ ,  $CICV35^{100AE}$ ,  $CICV50^{100AE}$  e  $CICV10CA40^{100AE}$ ); as velocidades mais baixas foram medidas para argamassas com 100% de granulado de cortiça expandida ( $CI^{100GC}$ ,  $CICV20^{100GC}$ ,  $CICV35^{100GC}$ ,  $CICV50^{100GC}$  e  $CICV10CA40^{100GC}$ ). Isto traduz-se numa diminuição média face às argamassa de areia de 58% para as argamassas com granulado de cortiça expandida e de apenas 12% para as argamas-

sas com argila expandida. Este comportamento pode ser explicado pela maior baridade da argila expandida ( $431 \text{ kg/m}^3$ ) quando comparada com a do granulado de cortiça expandida ( $52 \text{ kg/m}^3$ ).

Segundo Magalhães *et al.* (2003), sabendo que as ondas se propagam por vibração de partículas sólidas, a sua velocidade está dependente da constituição dos materiais que atravessam, com os materiais menos compactos a apresentar valores de velocidade de propagação inferiores aos dos materiais mais compactos, isto é, com maior massa volúmica aparente.

Silva *et al.* (2015) produziram argamassas com formulações idênticas às das argamassas  $\text{CI}^{100\text{GC}}$ ,  $\text{CI}^{100\text{AE}}$ ,  $\text{CI}^{60\text{GC}40\text{AE}}$  e  $\text{CI}^{60\text{AE}40\text{GC}}$ , tendo obtido reduções na velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, face à argamassa de referência, de 70, 7, 38 e 25%, respectivamente; à excepção da argamassa  $\text{CI}^{100\text{AE}}$ , estes valores são da mesma ordem de grandeza dos registados no presente estudo, em que as reduções foram de 63, 26, 47 e 37% para as referidas argamassas.

Afonso (2015) produziu duas argamassas de cimento com substituição da areia por granulado de cortiça expandida ou argila expandida, semelhantes às argamassas  $\text{CI}^{100\text{GC}}$  e  $\text{CI}^{100\text{AE}}$ , respectivamente; o autor observou uma diminuição na velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas de 65% para a argamassa de granulado de cortiça expandida e de 32% para a argamassa de argila expandida. Estes resultados são semelhantes aos obtidos no presente estudo (diminuição de 63 e de 26%, respectivamente para  $\text{CI}^{100\text{GC}}$  e  $\text{CI}^{100\text{AE}}$ ).

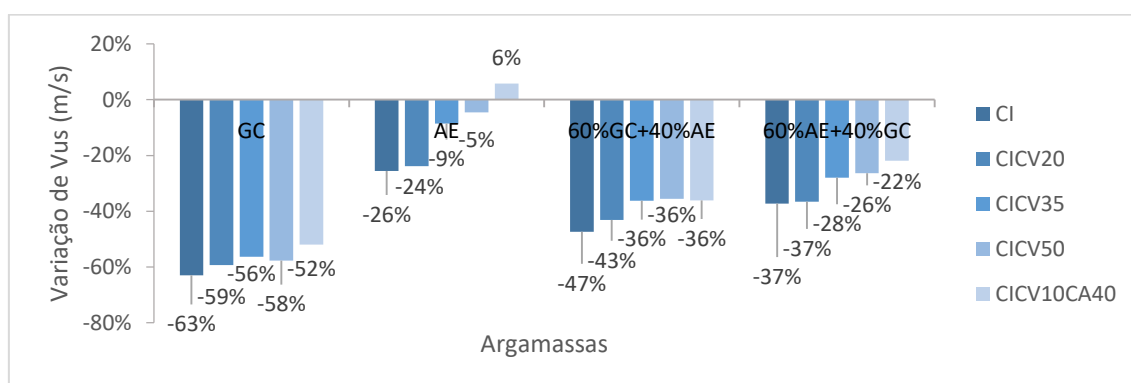


Figura 4.26 - Variação na velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas relativamente às argamassas de areia ( $\text{CI}^{100\text{A}}$ ,  $\text{CICV20}^{100\text{A}}$ ,  $\text{CICV35}^{100\text{A}}$ ,  $\text{CICV50}^{100\text{A}}$  e  $\text{CICV10CA40}^{100\text{A}}$ , respectivamente)

- **Método indirecto**

Nas argamassas que foram aplicadas em tijolo, a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas foi também determinada através do método indirecto, tendo sido adoptadas duas metodologias para a análise de resultados (cálculo das médias e dromocrónicas). Através do cálculo das médias, o valor máximo para argamassas com agregados isolantes é de 3244 m/s para a argamassa  $\text{CI}^{100\text{AE}}$  e o mínimo de 1297 m/s para a argamassa  $\text{CICV50}^{100\text{GC}}$ . Já pelo método das dromocrónicas, o valor máximo ocorre na argamassa  $\text{CICV20}^{100\text{AE}}$  (2391 m/s), mantendo-se o mínimo para a argamassa  $\text{CICV50}^{100\text{GC}}$  (com 837 m/s).

A incerteza do método indirecto está patente nos elevados coeficientes de variação, que se situam entre 21 e 53%, enquanto os valores obtidos pelo método directo não ultrapassam 4%. No que diz respeito ao método indirecto, são também notórias as diferenças entre os valores obtidos por cálculo das médias e pelo método das dromocrónicas. As diferenças nos valores obtidos directa e indirectamente podem ser explicadas pela maior incerteza associada ao método indirecto e ainda pela maior rugosidade da superfície das argamassas aplicadas em tijolo face aos provetes normalizados.

Com o objectivo de estabelecer uma relação entre os valores obtidos pelos métodos directo e indirecto, traçou-se a Figura 4.27. Constata-se que os dois métodos apresentam uma boa correlação entre si, com os valores obtidos pelo método das dromocrónicas a ficarem mais próximos dos medidos pelo método directo, apesar de o  $R^2$  deste método ser ligeiramente inferior ao obtido para o cálculo das médias (0,92 por oposição a 0,96).

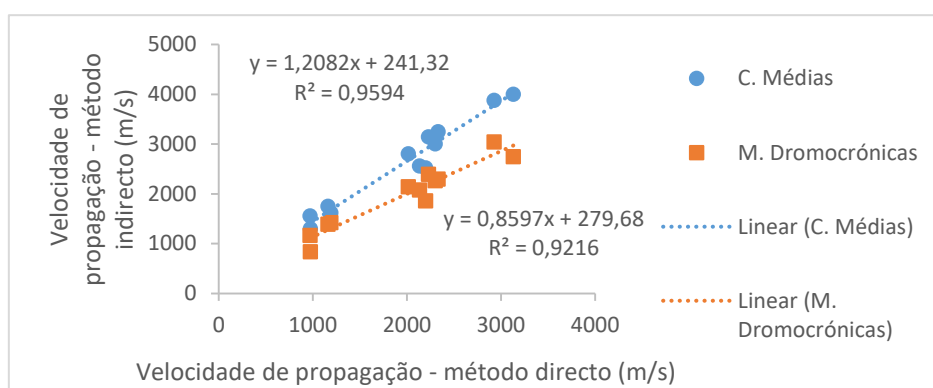


Figura 4.27 - Relação entre a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas obtida pelo método directo e indirecto (cálculo das médias e método das dromocrónicas)

Não se verificou qualquer relação entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas e a porosidade aberta nas argamassas com agregados isolantes. Apenas nas argamassas de areia se estabeleceu uma correlação de potência entre estas propriedades (Figura 4.28). Tal como referido em relação à resistência à compressão e ao módulo de elasticidade dinâmico, esta diferença poderá dever-se à acção do tensioactivo presente apenas nas argamassas com agregados isolantes.

Observando a Figura 4.29, que relaciona a velocidade de propagação com a massa volúmica aparente, a diferença no comportamento destes dois tipos de argamassas volta a ser notória. Neste caso, são as argamassas com agregados isolantes que apresentam uma correlação muito elevada, com um  $R^2$  de 0,93, por oposição a 0,63 nas argamassas de areia.

A velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas pode também ser relacionada com a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dinâmico, como é patente nas Figuras 4.30 e 4.31, respectivamente. Em ambos os casos, foram obtidas correlações em potência com  $R^2$  muito elevados, tendo Vale *et al.* (2014) e Afonso (2015) determinado correlações semelhantes. Tal relação seria expectável pois materiais mais compactos, e logo com maior velocidade de propagação, serão geralmente mais

rígidos e mais resistentes. No caso da relação com a resistência à compressão, é visível que as argamassas de areia e as argamassas com agregados isolantes têm o mesmo comportamento (o  $R^2$  conjunto é de 0,92), não se passando o mesmo com a relação com o módulo de elasticidade dinâmico.

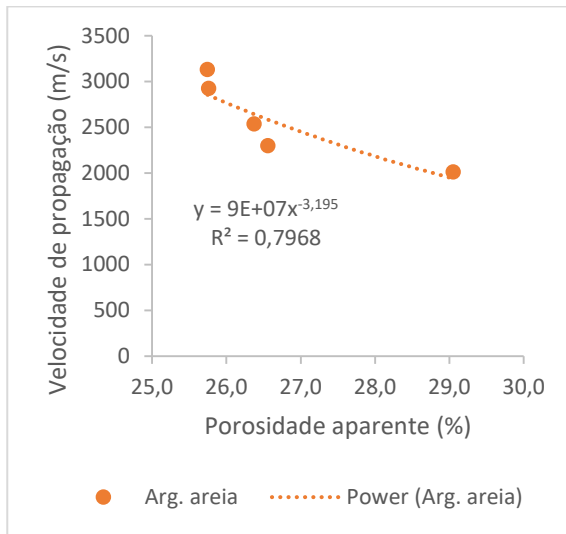


Figura 4.28 - Relação entre a porosidade aparente e a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas

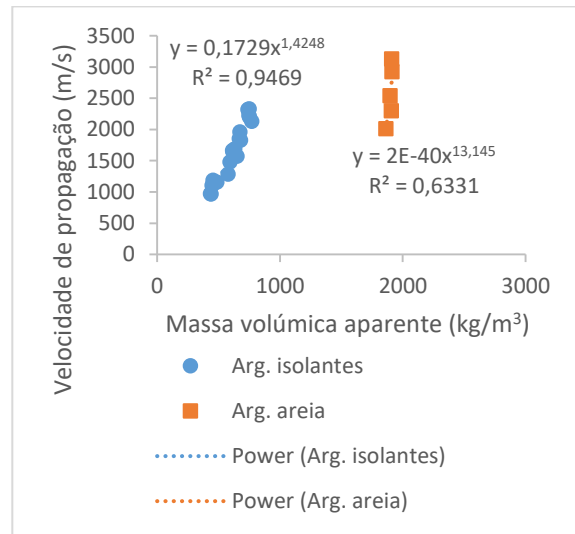


Figura 4.29 - Relação entre a massa volúmica aparente e a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas

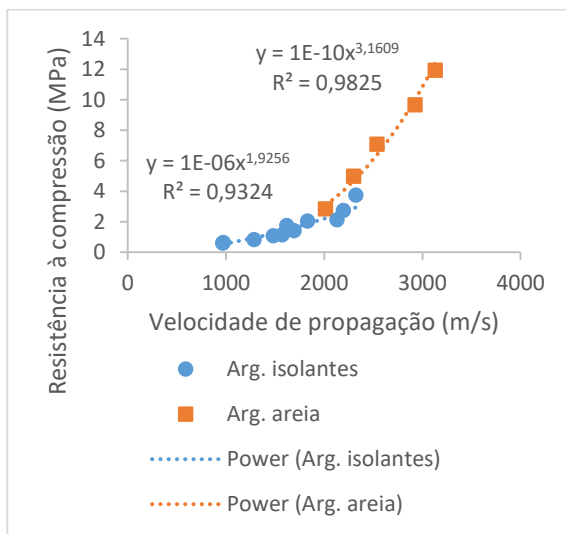


Figura 4.30 - Relação entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas e a resistência à compressão

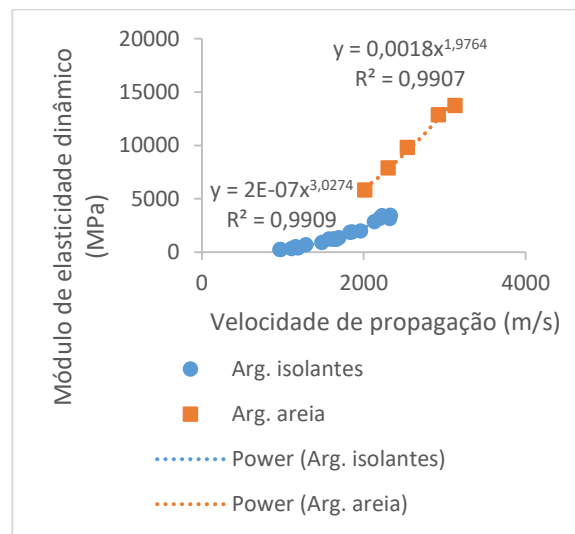


Figura 4.31 - Relação entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas e o módulo de elasticidade dinâmico

#### 4.3.6 Ensaio de arrancamento por tracção (*pull-off*)

Na Tabela 4.12 e na Figura 4.32, podem ser observados os resultados médios da tensão de aderência, aos 28 dias, das argamassas aplicadas em tijolo. Os resultados individuais de cada ensaio encontram-se no Anexo A12.

As tensões de aderência obtidas foram baixas, variando, para as argamassas com agregados isolantes, entre 0,03 MPa para a argamassa CICV20<sup>100GC</sup> e 0,29 MPa para a argamassa CICV20<sup>100AE</sup>. As



roturas foram maioritariamente adesivas, com excepção de duas carotes da argamassa CICV50<sup>100AE</sup> e todas da argamassa CICV10CA40<sup>100GC</sup>, onde a rotura foi coesiva.

Segundo os requisitos de aderência do relatório 427/05 do LNEC (2005), a tensão de aderência de um reboco cimentício deve ser superior a 0,3 MPa ou com rotura coesiva. Assim sendo, apenas as argamassas CICV20<sup>100AE</sup>, CICV50<sup>100AE</sup> e CICV10CA40<sup>100GC</sup> se aproximam dos requisitos mínimos (a primeira pela tensão de aderência e as restantes pela tipologia de rotura).

Em algumas argamassas com agregados isolantes, as carotes soltaram-se do suporte durante o processo de corte, enquanto para 4 das 5 argamassas de areia a rotura se deu pela interface pastilha-argamassa; em ambas as situações os ensaios não são considerados válidos, não sendo possível obter a tensão de aderência num número de carotes representativo, o que condiciona a análise de resultados.

Pelas razões anteriores, não foi possível estabelecer uma relação entre a tensão de aderência e alterações na pasta ligante ou nos agregados. Ainda assim, Vale *et al.* (2014) e Leal (2012) obtiveram uma tensão de aderência de 0,11 MPa para argamassas com 80 e 70% de granulado de cortiça, respectivamente; o mesmo valor foi obtido para a argamassa CI<sup>100GC</sup>, com 100% de granulado de cortiça expandida.

Tabela 4.12 - Tensão de aderência

	<b>f<sub>u</sub> (MPa)</b>	<b>DP (MPa)</b>	<b>CV (%)</b>	<b>Tipo de rotura</b>
<b>CI<sup>100GC</sup></b>	0,11	0,05	41	a (adesiva)
<b>CI<sup>100AE</sup></b>	0,09	0,01	7	a (adesiva)
<b>CI<sup>100A</sup></b>	(-)	(-)	(-)	(-)
<b>CICV20<sup>100GC</sup></b>	0,03	0,00	15	a (adesiva)
<b>CICV20<sup>100AE</sup></b>	0,29	0,07	25	a (adesiva)
<b>CICV20<sup>100A</sup></b>	0,65	0,00	0	a (adesiva)
<b>CICV50<sup>100GC</sup></b>	(-)	(-)	(-)	(-)
<b>CICV50<sup>100AE</sup></b>	0,08	0,04	47	a/b (adesiva/coesiva)
<b>CICV50<sup>100A</sup></b>	(-)	(-)	(-)	(-)
<b>CICV10CA40<sup>100GC</sup></b>	0,08	0,04	54	b (coesiva)
<b>CICV10CA40<sup>100AE</sup></b>	0,03	0,00	0	a (adesiva)
<b>CICV10CA40<sup>100A</sup></b>	(-)	(-)	(-)	(-)

Legenda: f<sub>u</sub> - tensão de aderência média; a - rotura adesiva na interface entre a argamassa e o suporte; b - rotura coesiva na argamassa; DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; (-) - ensaio nulo.

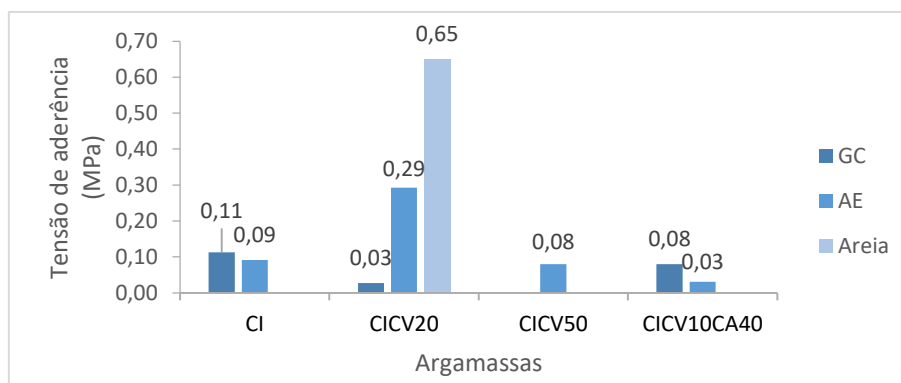


Figura 4.32 - Tensão de aderência ao suporte

### 4.3.7 Índice esclerométrico

Os índices esclerométricos médios, obtidos aos 28 dias, encontram-se na Tabela 4.13 e na Figura 4.33. Os resultados individuais de cada ensaio podem ser consultados no Anexo A13.

Tabela 4.13 - Índice esclerométrico

	IE	DP	CV (%)
CI <sup>100GC</sup>	71	1	2
CI <sup>100AE</sup>	66	1	2
CI <sup>100A</sup>	103	3	3
CICV20 <sup>100GC</sup>	89	1	1
CICV20 <sup>100AE</sup>	81	1	2
CICV20 <sup>100A</sup>	107	2	2
CICV50 <sup>100GC</sup>	92	1	1
CICV50 <sup>100AE</sup>	79	4	5
CICV50 <sup>100A</sup>	92	4	5
CICV10CA40 <sup>100GC</sup>	95	6	6
CICV10CA40 <sup>100AE</sup>	78	1	2
CICV10CA40 <sup>100A</sup>	85	1	1

Legenda: IE - índice esclerométrico médio; DP - Desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

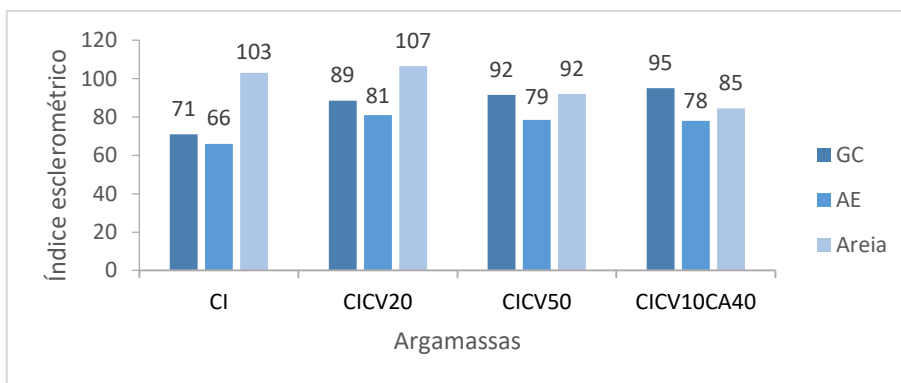


Figura 4.33 - Índice esclerométrico

Os valores do índice esclerométrico variaram entre 66 para a argamassa CI<sup>100AE</sup> e 107 para a argamassa CICV20<sup>100A</sup>. Para argamassas de cimento (argamassas CI) e argamassas com 20% de cinzas volantes (argamassas CICV20), o maior índice esclerométrico foi registado para as argamassas de areia, como seria de esperar devido à maior resistência destas argamassas. Contudo, o mesmo não se verificou para as restantes pastas ligantes. As argamassas com granulado de cortiça expandida registaram um índice esclerométrico igual ou superior ao das argamassas de areia, o que não vai ao encontro do esperado, devido às diferenças na resistência dos dois agregados. No entanto, estas situações correspondem aos maiores coeficientes de variação nos resultados nas argamassas.

Devido à realização de outros ensaios, apenas foi possível realizar duas medições por argamassa, já que o embate da massa do esclerómetro na argamassa tende a compactá-la, o que iria afectar os ensaios posteriores. Este aspecto poderá dificultar a análise de resultados, pois, segundo Brito (1987), são necessárias bastantes leituras para este ensaio ter alguma fiabilidade.

Apesar de medir a dureza superficial de argamassas, os resultados obtidos pelo esclerómetro podem ser usados para estimar indirectamente a sua resistência mecânica, através de uma correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão. No entanto, devido à grande dispersão de resultados, no presente estudo não foi estabelecida uma correlação entre estas duas propriedades.

### 4.3.8 Absorção de água por capilaridade

Os resultados médios obtidos para o coeficiente de absorção de água por capilaridade, segundo a EN 1015-18 e segundo o declive da curva de absorção de água, encontram-se na Tabela 4.14. As curvas de absorção de água podem ser observadas na Figura 4.34.

Tabela 4.14 - Coeficiente de absorção de água por capilaridade

	C (kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0.5</sup> )				Classificação EN 998-1
	Norma EN 1015-18	Declive	t <sub>f</sub> (h)	R <sup>2</sup>	
C1 <sup>100GC</sup>	0,51	0,77	1,5	0,86	n.c.
C1 <sup>100AE</sup>	0,45	0,71	1,5	0,85	n.c.
C1 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	0,47	1,09	0,5	0,89	n.c.
C1 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	0,46	0,99	0,5	0,91	n.c.
C1 <sup>100A</sup>	1,09	1,65	1,5	0,91	n.c.
CICV20 <sup>100GC</sup>	0,75	1,07	2	0,89	n.c.
CICV20 <sup>100AE</sup>	0,44	1,28	0,5	0,85	n.c.
CICV20 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	0,58	1,47	0,5	0,87	n.c.
CICV20 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	0,45	1,45	0,5	0,82	n.c.
CICV20 <sup>100A</sup>	1,12	1,54	1,5	0,93	n.c.
CICV35 <sup>100GC</sup>	0,58	2,01	0,5	0,89	n.c.
CICV35 <sup>100AE</sup>	0,30	1,24	0,5	0,86	W1
CICV35 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	0,26	1,03	0,5	0,90	W1
CICV35 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	0,25	1,21	0,5	0,86	W1
CICV35 <sup>100A</sup>	1,02	2,23	1	0,88	n.c.
CICV50 <sup>100GC</sup>	0,48	1,64	0,5	0,90	n.c.
CICV50 <sup>100AE</sup>	0,28	1,03	0,5	0,90	W1
CICV50 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	0,29	1,21	0,5	0,87	W1
CICV50 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	0,24	1,19	0,5	0,85	W1
CICV50 <sup>100A</sup>	0,99	2,30	1	0,86	n.c.
CICV10CA40 <sup>100GC</sup>	1,46	2,36	1,5	0,88	n.c.
CICV10CA40 <sup>100AE</sup>	1,09	1,76	1,5	0,87	n.c.
CICV10CA40 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	1,43	2,35	1,5	0,87	n.c.
CICV10CA40 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	1,41	2,22	1,5	0,88	n.c.
CICV10CA40 <sup>100A</sup>	1,21	2,64	1	0,90	n.c.

Legenda: C - coeficiente de absorção de água por capilaridade; t<sub>f</sub> - tempo final da absorção rápida; R<sup>2</sup> - coeficiente de determinação; n.c. - não classificável segundo a norma EN 998-1.

Segundo a EN 1015-18 (CEN, 2002), o coeficiente de absorção de água por capilaridade é determinado pela diferença de massas medidas aos 10 e 90 minutos, isto é, considera-se que aos 90 minutos termina a fase de absorção rápida e começa a absorção lenta. Contudo, analisando as curvas de absorção de água da Figura 4.48, constata-se que tal acontece apenas nas argamassas C1<sup>100GC</sup>, C1<sup>100AE</sup>, C1<sup>100A</sup>, CICV20<sup>100A</sup>, CICV10CA40<sup>100GC</sup>, CICV10CA40<sup>100AE</sup>, CICV10CA40<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub> e CICV10CA40<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub>. Assim, o coeficiente de capilaridade foi também calculado através do declive

do primeiro troço das curvas de absorção, procurando encontrar-se a melhor aproximação ao troço correspondente à fase de absorção rápida.

Por observação da Tabela 4.14, é notória a diferença entre os coeficientes obtidos pelos dois métodos descritos. Conclui-se que a fórmula da referida norma não traduz o comportamento efectivo das argamassas em estudo. Segundo esta, seis das argamassas cumprem o requisito da EN 998-1 para ser consideradas argamassas térmicas; no entanto, os coeficientes determinados pela aproximação à curva de absorção estão bastante acima do limite de  $0,40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$  preconizado pela norma.

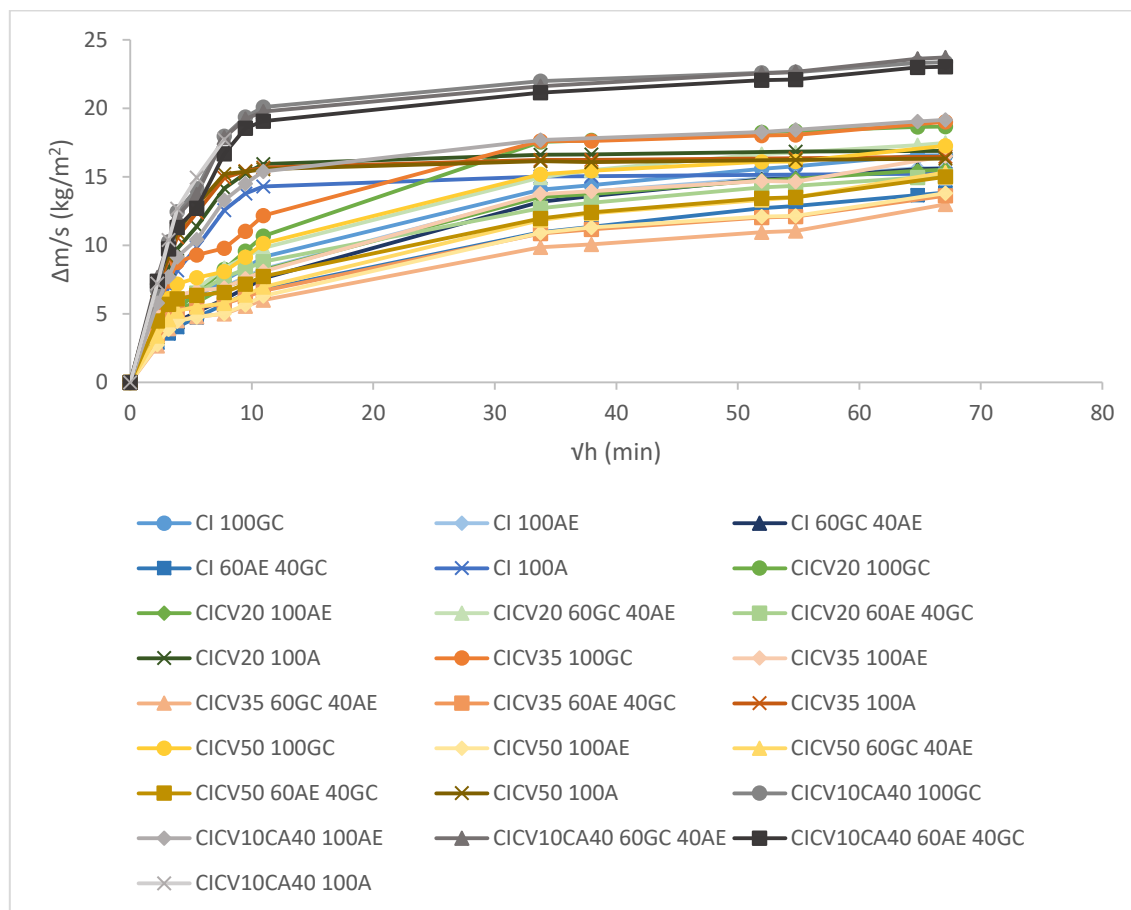


Figura 4.34 - Curvas de absorção de água por capilaridade

### i) Influência da pasta ligante

Na Figura 4.35, estão representadas as percentagens de variação do coeficiente de capilaridade de cada argamassa quando comparada com a sua argamassa de cimento equivalente ( $CI^{100GC}$ ,  $CI^{100AE}$ ,  $CI^{60GC}_{40AE}$ ,  $CI^{60AE}_{40GC}$  ou  $CI^{100A}$ ).

De um modo geral, a substituição do cimento por cinzas volantes traduziu-se num aumento do coeficiente de capilaridade, entre 10 e 184%, face à argamassa de cimento correspondente. Apesar de uma maior absorção inicial, não foi possível estabelecer uma relação entre a presença de cinzas volantes e a quantidade total de água absorvida.

Por outro lado, as argamassas constituídas por cimento, cinzas volantes e cal aérea (argamassas

CICV10CA40), para além de terem registado os maiores coeficientes de capilaridade, absorveram também a maior quantidade de água.

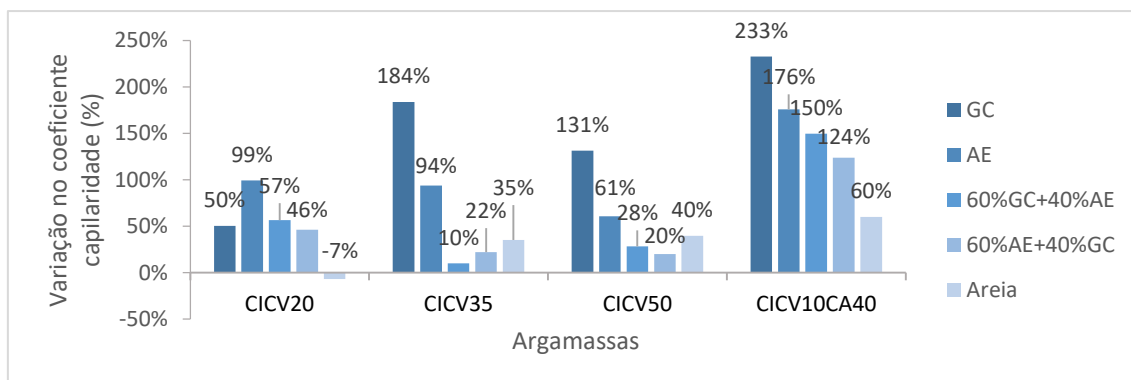


Figura 4.35 - Variação no coeficiente de capilaridade relativamente às argamassas de cimento ( $CI^{100AE}$ ,  $CI^{60GC_{40}AE}$ ,  $CI^{60AE_{40}GC}$  e  $CI^{100A}$ , respectivamente)

## ii) Influência do agregado

Na Figura 4.36, estão representadas as percentagens de variação do coeficiente de capilaridade de cada argamassa quando comparada com a sua argamassa de areia equivalente ( $CI^{100A}$ ,  $CICV20^{100A}$ ,  $CICV35^{100A}$ ,  $CICV50^{100A}$  ou  $CICV10CA40^{100A}$ ).

Verificou-se que a substituição de areia por agregados isolantes teve o efeito de baixar o coeficiente de capilaridade face à argamassa de areia correspondente. As reduções variaram entre 4 e 61%, mas neste caso, e contrariamente ao observado noutras propriedades, não foi possível distinguir claramente as diferenças entre as argamassas com granulado de cortiça expandida ou argila expandida.

Outro factor que pode ter contribuído para as reduções observadas é a presença do tensoactivo nas argamassas com agregados isolantes, pois as bolhas de ar resultantes da sua acção provocam um corte na capilaridade (Veiga, 1998, Bauer, 2005).

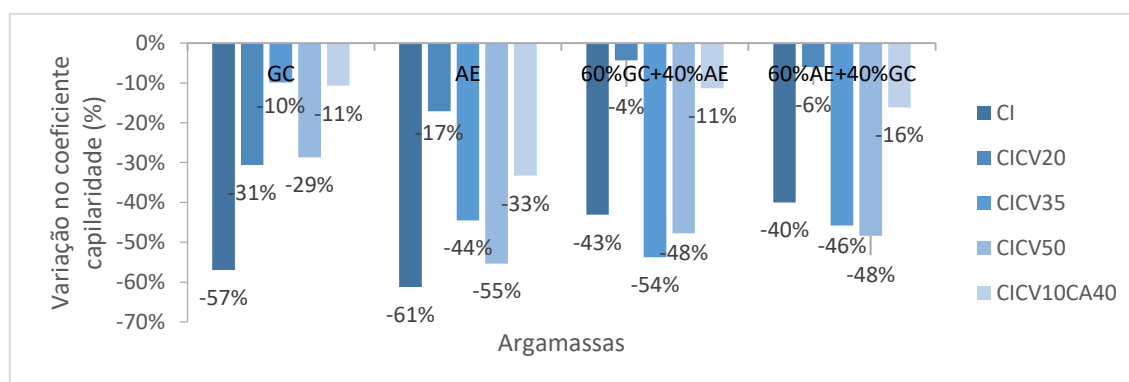


Figura 4.36 - Variação no coeficiente de capilaridade relativamente às argamassas de areia ( $CI^{100A}$ ,  $CICV20^{100A}$ ,  $CICV35^{100A}$ ,  $CICV50^{100A}$  e  $CICV10CA40^{100A}$ , respectivamente)

## 4.3.9 Índice de secagem

O índice de secagem médio obtido para cada argamassa encontra-se na Tabela 4.15, assim como os teores de água iniciais e finais e o tempo de cada ensaio. As curvas de secagem podem ser

observadas na Figura 4.37. Inicialmente, foi estabelecido que se consideraria a argamassa seca quando o seu teor de água fosse igual ou inferior a 2%. No entanto, tal não foi possível em várias argamassas, já que o seu teor de água estabilizou num valor superior, apesar da longa duração considerada para o ensaio (15 semanas, no máximo). Segundo Nascimento (2006), a presença de retentores de água (como o éter de celulose) e introdutores de ar (como o tensioactivo) podem originar argamassas que demoram muito tempo a secar.

Verificou-se que as argamassas com granulado de cortiça expandida, com um maior teor de água inicial, foram aquelas que demoraram mais tempo a secar, e que os seus índices de secagem variaram entre 0,16 e 0,24. No entanto, as argamassas de argila expandida, que secaram mais rapidamente, apresentaram índices de secagem semelhantes, entre 0,18 e 0,24. Já as argamassas de areia registaram os maiores índices de secagem, com valores entre 0,27 e 0,34, o que indica que a introdução de agregados isolantes provoca uma diminuição neste índice. Melo (2014), ao estudar argamassas com 80% de granulado de cortiça expandida, verificou a mesma tendência.

Por outro lado, não se verificou qualquer relação entre a composição da pasta ligante e o índice de secagem. Também não foi estabelecida uma correlação entre o índice de secagem e a porosidade aparente ou o coeficiente de absorção de água por capilaridade.

Tabela 4.15 - Índice de secagem

	$W_i$ (%)	$W_f$ (%)	$t_f$ (h)	IS
<b>CI<sup>100GC</sup></b>	51,1%	6,0%	2349	0,24
<b>CI<sup>100AE</sup></b>	39,3%	1,9%	1725	0,18
<b>CI<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	41,5%	2,1%	2349	0,16
<b>CI<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	42,8%	1,2%	2349	0,19
<b>CI<sup>100A</sup></b>	12,6%	1,8%	2349	0,30
<b>CICV20<sup>100GC</sup></b>	54,2%	2,5%	2349	0,16
<b>CICV20<sup>100AE</sup></b>	42,4%	1,8%	1509	0,24
<b>CICV20<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	42,2%	3,5%	2109	0,20
<b>CICV20<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	39,6%	2,7%	2013	0,19
<b>CICV20<sup>100A</sup></b>	13,1%	2,7%	2013	0,34
<b>CICV35<sup>100GC</sup></b>	61,1%	4,2%	2013	0,18
<b>CICV35<sup>100AE</sup></b>	38,4%	1,7%	1029	0,18
<b>CICV35<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	39,9%	2,6%	1941	0,17
<b>CICV35<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	34,2%	2,8%	1941	0,18
<b>CICV35<sup>100A</sup></b>	13,1%	1,8%	1845	0,28
<b>CICV50<sup>100GC</sup></b>	57,5%	3,5%	1941	0,17
<b>CICV50<sup>100AE</sup></b>	35,2%	1,6%	885	0,23
<b>CICV50<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	42,6%	2,0%	1845	0,15
<b>CICV50<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	41,8%	1,7%	1509	0,16
<b>CICV50<sup>100A</sup></b>	13,5%	1,6%	1077	0,27
<b>CICV10CA40<sup>100GC</sup></b>	77,5%	7,5%	2061	0,21
<b>CICV10CA40<sup>100AE</sup></b>	42,1%	3,3%	2061	0,20
<b>CICV10CA40<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	63,9%	6,0%	2061	0,22
<b>CICV10CA40<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	58,9%	5,0%	2061	0,21
<b>CICV10CA40<sup>100A</sup></b>	15,6%	1,7%	1509	0,29

Legenda:  $W_i$  - teor de água no início do ensaio;  $W_f$  - teor de água no final do ensaio;  $t_f$  - tempo final do ensaio; IS - índice de secagem.

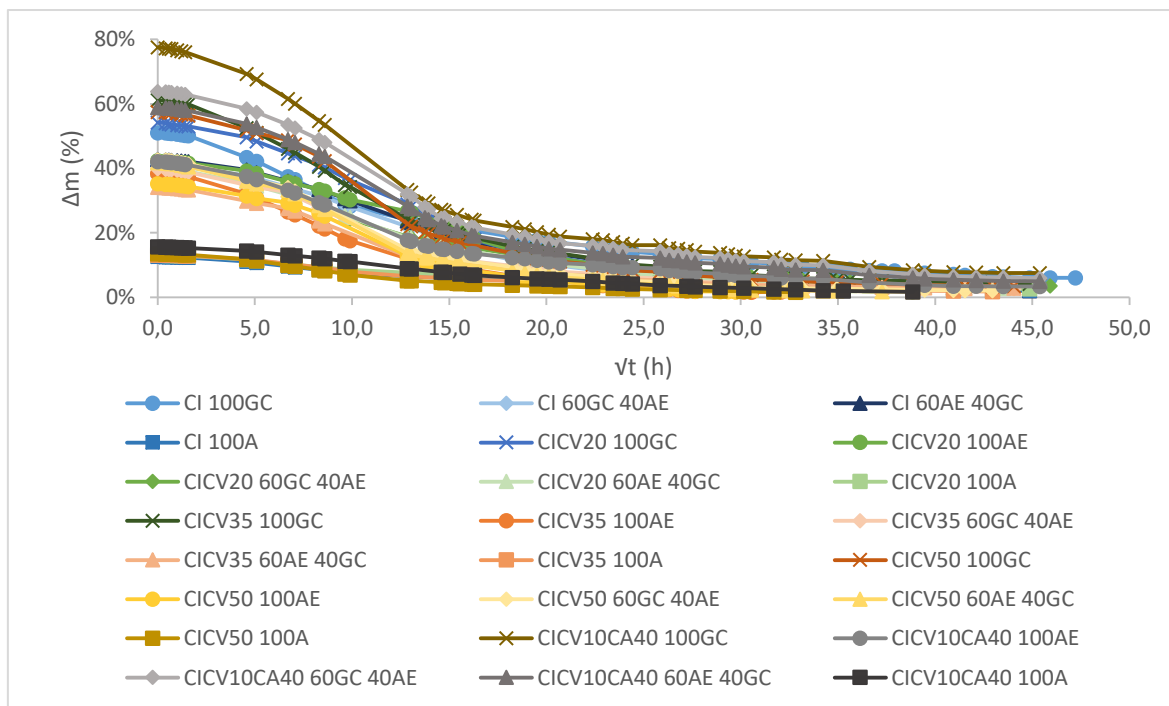


Figura 4.37 - Curvas de secagem

Sendo a secagem fortemente influenciada pelas condições ambientais (temperatura e humidade), a explicação para estes resultados pode residir na sua grande variação ao longo de 15 semanas de ensaio (temperaturas entre 19,2 e 25°C e humidade relativa entre 42 e 77,3% da sala onde foram realizadas as medições). Uma análise mais detalhada da porosidade das argamassas, que incluía a dimensão e distribuição dos poros, poderá também ajudar a clarificar os resultados obtidos.

#### 4.3.10 Permeabilidade à água líquida sob baixa pressão (tubo de *Karsten*)

Os valores médios para o volume de água absorvido aos 60 min e coeficiente de absorção de água sob baixa pressão, aos 28 dias, podem ser consultados na Tabela 4.16, sendo que os coeficientes de absorção são também representados na Figura 4.38. Os resultados individuais de cada ensaio encontram-se no Anexo A14.

Existem três argamassas que se destacam das demais pelo grande volume de água absorvido e elevado coeficiente de absorção: as argamassas CICV50<sup>100GC</sup> (20,9 cm<sup>3</sup> / 4,74 kg/m<sup>2</sup>.min<sup>0.5</sup>), CICV50<sup>100A</sup> (30,4 cm<sup>3</sup> / 6,89 kg/m<sup>2</sup>.min<sup>0.5</sup>) e CICV10CA40<sup>100A</sup> (26,1 cm<sup>3</sup> / 5,91 kg/m<sup>2</sup>.min<sup>0.5</sup>); de facto, parece existir uma tendência para o aumento do coeficiente de absorção, em relação às argamassas de cimento, nas argamassas de cortiça expandida e areia com a introdução de cinzas volantes (ou cinzas volantes e cal aérea). No entanto, a análise de resultados é condicionada pelos elevados coeficientes de variação registados; estes poderão dever-se a uma insuficiente selagem dos tubos, devido à elevada rugosidade das argamassas, ou ainda à colocação de parte deles em zonas com microfissuras.

Assim, e tal como no ensaio de secagem, não foi possível avaliar a influência das diferentes percentagens de substituição do cimento ou dos dos agregados isolantes, nem estabelecer uma relação com a porosidade aparente e o coeficiente de capilaridade.

Tabela 4.16 - Volume de água absorvido aos 60 min e coeficiente de absorção de água sob baixa pressão

	Volume de água absorvido aos 60 min (cm <sup>3</sup> )	DP (cm <sup>3</sup> )	CV (%)	C <sub>A</sub> (kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )
CI <sup>100GC</sup>	4,2	1,7	40	0,94
CI <sup>100AE</sup>	11,7	0,0	0	2,22
CI <sup>100A</sup>	6,3	0,3	5	1,43
CICV20 <sup>100GC</sup>	12,2	0,0	0	2,76
CICV20 <sup>100AE</sup>	5,5	1,6	28	1,25
CICV20 <sup>100A</sup>	5,9	3,2	54	1,34
CICV50 <sup>100GC</sup>	20,9	3,8	18	4,74
CICV50 <sup>100AE</sup>	4,2	2,2	51	0,96
CICV50 <sup>100A</sup>	30,4	5,7	19	6,89
CICV10CA40 <sup>100GC</sup>	14,6	1,8	12	3,31
CICV10CA40 <sup>100AE</sup>	7,6	1,8	23	1,72
CICV10CA40 <sup>100A</sup>	26,1	4,3	16	5,91

Legenda: C<sub>A</sub> - coeficiente de absorção de água sob baixa pressão; DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

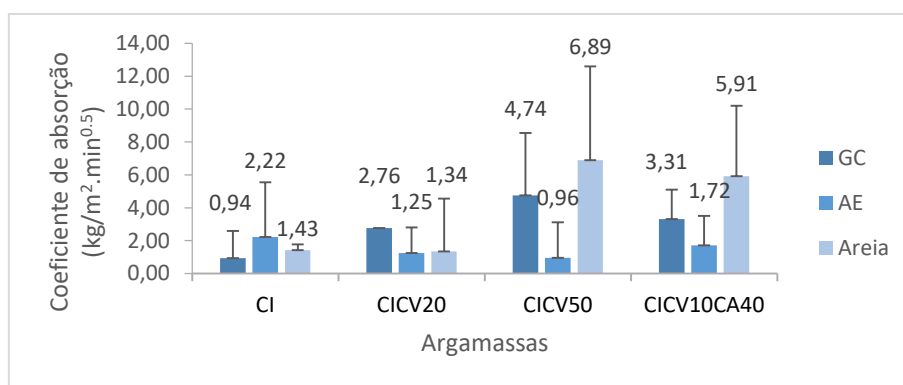


Figura 4.38 - Coeficientes de absorção de água sob baixa pressão aos 60 min

#### 4.3.11 Coeficiente de condutibilidade térmica

O coeficiente de condutibilidade térmica médio obtido para cada argamassa, em provetes (aos 28 dias e após secagem) e em modelos argamassa-tijolo, encontra-se na Tabela 4.17, enquanto no Anexo A15 podem ser consultados os resultados individuais de cada ensaio.

Após a secagem, a condutibilidade térmica diminuiu em todas as argamassas, tendo os valores mínimos sido obtidos para as argamassas CICV35<sup>100GC</sup>, CICV50<sup>100GC</sup> e CICV10CA40<sup>100GC</sup>, isto é, argamassas com granulado de cortiça expandida e uma substituição mínima de cimento de 35%. No entanto, a análise que se segue corresponde aos valores determinados em provetes aos 28 dias, de modo a possibilitar a sua comparação com os modelos argamassa-tijolo.

Ainda na Tabela 4.17, está indicada a classificação de cada uma das argamassas segundo a EN 998-1 (2010), no que diz respeito ao seu coeficiente de condutibilidade térmica. De acordo com a referida norma, este deverá ser inferior a 0,2 W/m.K para a argamassa ser considerada térmica



(classe T2). Se for inferior a 0,1 W/m.K, a classe será T1. Tal como para a resistência à compressão, todas as argamassas com agregados isolantes se enquadram nesta classificação.

#### i) Influência da pasta ligante

Na Figura 4.39, estão representadas as percentagens de variação do coeficiente de condutibilidade térmica de cada argamassa quando comparada com a sua argamassa de cimento equivalente (C1<sup>100GC</sup>, C1<sup>100AE</sup>, C1<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub>, C1<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub> ou C1<sup>100A</sup>).

Verifica-se que a substituição de 20% do cimento por cinzas volantes (argamassas CICV20) não causou variações significativas no coeficiente de condutibilidade térmica (reduções entre 4 e 10%). Com o aumento da percentagem de substituição, maior foi a redução na condutibilidade térmica, com as argamassas com 35 e 50% de cinzas volantes (argamassas CICV35 e CICV50) a registarem reduções entre 12 e 21% e entre 19 e 28%, respectivamente. As argamassas com substituição por cinzas volantes e cal aérea (argamassas CICV10CA40) apresentam coeficientes de condutibilidade térmica semelhantes aos das argamassas CICV50. Neste caso, nenhum dos agregados se mostrou mais ou menos susceptível a alterações na pasta ligante.

Tabela 4.17 - Coeficientes de condutibilidade térmica aos 28 dias, em provetes secos e em modelos argamassa-tijolo (Fase 2)

	$\lambda_{28d}$ (W/m.K)	$\lambda_{seco}$ (W/m.K)	$\lambda_{tijolo}$ (W/m.K)	Classificação EN 998-1	Rc / $\lambda_{28d}$
C1 <sup>100GC</sup>	0,099	0,087	0,084	T1	14
C1 <sup>100AE</sup>	0,198	0,174	0,148	T2	21
C1 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	0,138	0,119	n/a	T2	17
C1 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	0,167	0,141	n/a	T2	18
C1 <sup>100A</sup>	1,636	1,466	1,267	n/a	n/a
CICV20 <sup>100GC</sup>	0,091	0,081	0,083	T1	13
CICV20 <sup>100AE</sup>	0,184	0,167	0,168	T2	23
CICV20 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	0,128	0,117	n/a	T2	18
CICV20 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	0,151	0,140	n/a	T2	20
CICV20 <sup>100A</sup>	1,575	1,461	0,818	n/a	n/a
CICV35 <sup>100GC</sup>	0,084	0,075	n/a	T1	13
CICV35 <sup>100AE</sup>	0,168	0,152	n/a	T2	22
CICV35 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	0,121	0,111	n/a	T2	14
CICV35 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	0,133	0,123	n/a	T2	15
CICV35 <sup>100A</sup>	1,354	1,319	n/a	n/a	n/a
CICV50 <sup>100GC</sup>	0,080	0,075	0,066	T1	8
CICV50 <sup>100AE</sup>	0,155	0,144	0,126	T2	18
CICV50 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	0,108	0,106	n/a	T2	10
CICV50 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	0,126	0,119	n/a	T2	11
CICV50 <sup>100A</sup>	1,171	1,079	0,995	n/a	n/a
CICV10CA40 <sup>100GC</sup>	0,079	0,072	0,087	T1	7
CICV10CA40 <sup>100AE</sup>	0,168	0,154	0,138	T2	13
CICV10CA40 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	0,113	0,107	n/a	T2	7
CICV10CA40 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	0,130	0,123	n/a	T2	9
CICV10CA40 <sup>100A</sup>	1,076	1,012	0,771	n/a	n/a

Legenda:  $\lambda_{28d}$  - coeficiente de condutibilidade térmica aos 28 dias;  $\lambda_{seco}$  - coeficiente de condutibilidade térmica em provetes secos;  $\lambda_{tijolo}$  - coeficiente de condutibilidade térmica em argamassas aplicadas em tijolo; n/a - não aplicável.

De facto, a condutibilidade térmica aumenta com o aumento do teor em cimento e da condutibilidade térmica do agregado (Gul *et al.* (1997), Orung (1996) e Ashworth & Ashworth (1991), citados por Demirboga (2003b)).

Demirboga (2003a; 2003b) produziu argamassas de areia com percentagens crescentes de substituição de cimento por cinzas volantes (entre 10 e 70%), tendo verificado que, quanto maior a percentagem de cinzas volantes, maior é a redução do coeficiente de condutibilidade térmica, quando comparado com uma argamassa de referência. Para percentagens de 20, 30 e 50% (com formulações semelhantes às argamassas CICV20<sup>100A</sup>, CICV35<sup>100A</sup> e CICV50<sup>100A</sup>), o autor registou, respectivamente, coeficientes de condutibilidade térmica 26, 33 e 47% mais baixos do que a referência; estes resultados são superiores aos obtidos neste estudo para as argamassas referidas, que sofreram diminuições de 4, 17 e 28%, respectivamente. Esta diferença pode ser explicada pelo traço mais forte usado pelo autor (1:2 por oposição a 1:4), o que torna as argamassas mais susceptíveis a alterações na pasta ligante.

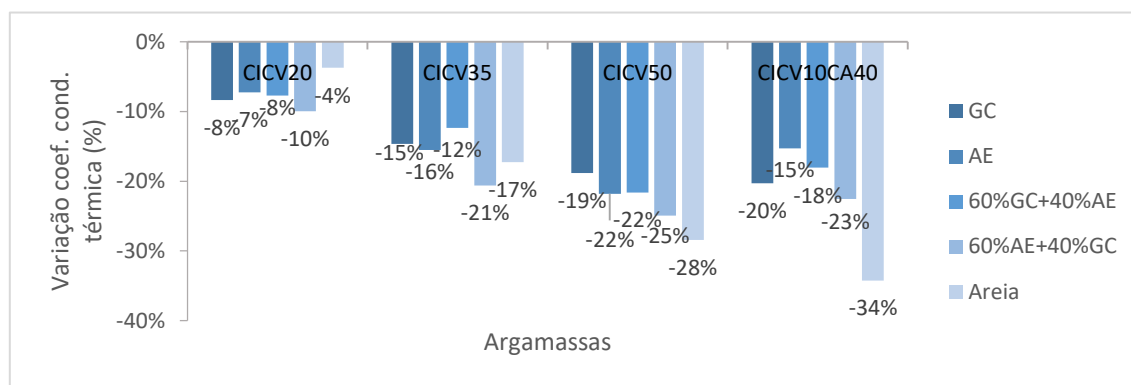


Figura 4.39 - Variação do coeficiente de condutibilidade térmica relativamente às argamassas de cimento (CI<sup>100GC</sup>, CI<sup>100AE</sup>, CI<sup>60GC40AE</sup>, CI<sup>60AE40GC</sup> e CI<sup>100A</sup>, respectivamente)

## ii) Influência do agregado

Na Figura 4.40, estão representadas as percentagens de variação do coeficiente de condutibilidade térmica de cada argamassa quando comparada com a sua argamassa de areia equivalente (CI<sup>100A</sup>, CICV20<sup>100A</sup>, CICV35<sup>100A</sup>, CICV50<sup>100A</sup> ou CICV10CA40<sup>100A</sup>).

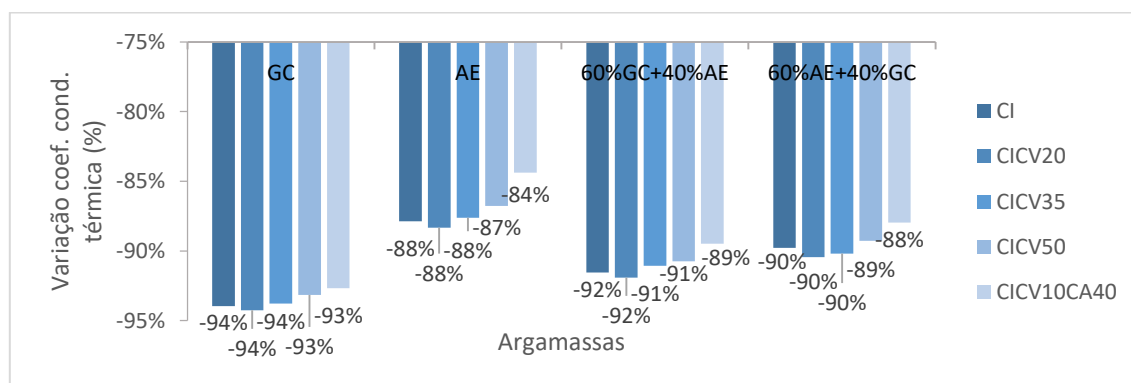


Figura 4.40 - Variação do coeficiente de condutibilidade térmica relativamente às argamassas de areia (CI<sup>100A</sup>, CICV20<sup>100A</sup>, CICV35<sup>100A</sup>, CICV50<sup>100A</sup> e CICV10CA40<sup>100A</sup>, respectivamente)

Constata-se que, de entre as argamassas com agregados isolantes, são as constituídas por granulado de cortiça expandida que apresentam menor condutibilidade térmica, com valores a variar entre 0,079 e 0,09 W/m.K, aos 28 dias. Por outro lado, as argamassas constituídas por argila expandida têm coeficientes mais elevados, entre 0,155 e 0,198 W/m.K, aos 28 dias. Estes resultados vão ao encontro do esperado, devido à menor baridade do granulado de cortiça expandida, quando comparada com a argila expandida.

Comparando as argamassas referidas com a respectiva argamassa de areia, verifica-se uma grande diminuição no coeficiente de condutibilidade térmica, com reduções, em média de 94% para as argamassa de granulado de cortiça expandida e de 87% para as argamassas de argila expandida; as argamassas constituídas pelos dois agregados apresentam valores intermédios (91 e 89%). Esta redução tão significativa deve-se principalmente à menor baridade dos agregados isolantes em relação à areia, mas também à presença do tensioactivo nas argamassas isolantes, como verificado na Fase 1.

Afonso (2015) produziu duas argamassas de cimento com substituição da areia por granulado de cortiça expandida ou argila expandida, semelhantes às argamassas CI<sup>100GC</sup> e CI<sup>100AE</sup>, respectivamente; o autor observou uma redução no coeficiente de condutibilidade térmica de 94% para a argamassa de granulado de cortiça expandida e de 90% para a argamassa de argila expandida, face à referência. Estes resultados são idênticos aos obtidos no presente estudo (diminuição de 94 e de 88%, respectivamente para CI<sup>100GC</sup> e CI<sup>100AE</sup>).

Com o objectivo de perceber quais as argamassas com melhor compromisso em termos de resistência à compressão e condutibilidade térmica, foi calculado o rácio entre estas duas propriedades (Tabela 4.17). Os maiores valores estão associados às argamassas CI<sup>100AE</sup>, CICV20<sup>100AE</sup> e CICV35<sup>100AE</sup>, isto é, são estas as que, sendo ainda classificadas como térmicas, apresentam resistências mais elevadas.

Também na Tabela 4.17 são apresentados os valores do coeficiente de condutibilidade térmica obtidos para as argamassas aplicadas em tijolo, constatando-se que estes são inferiores aos obtidos em provetes; ainda assim, existe uma elevada correlação ( $R^2 = 0,92$ ) entre ambos. Soares *et al.* (2015c) concluíram que a rugosidade da superfície da argamassa altera os valores do coeficiente de condutibilidade térmica, com um aumento deste coeficiente quando a rugosidade diminui, o que justifica os maiores valores obtidos em provetes, cuja superfície é lisa.

Relativamente às argamassas com agregados isolantes, verificou-se uma elevada correlação entre o coeficiente de condutibilidade térmica e a massa volúmica aparente (Figura 4.41). Vale *et al.* (2014) e Afonso (2015) também obtiveram correlações de potência com  $R^2$  superior a 0,90 entre a condutibilidade térmica e a massa volúmica aparente de argamassas com agregados isolantes, tanto tradicionais como industriais. No entanto, para as argamassas de areia, o  $R^2$  é de apenas 0,55. Este resultado demonstra que as alterações efectuadas na pasta ligante, apesar de não alterarem a massa volúmica, levaram a uma redução no coeficiente de condutibilidade térmica.

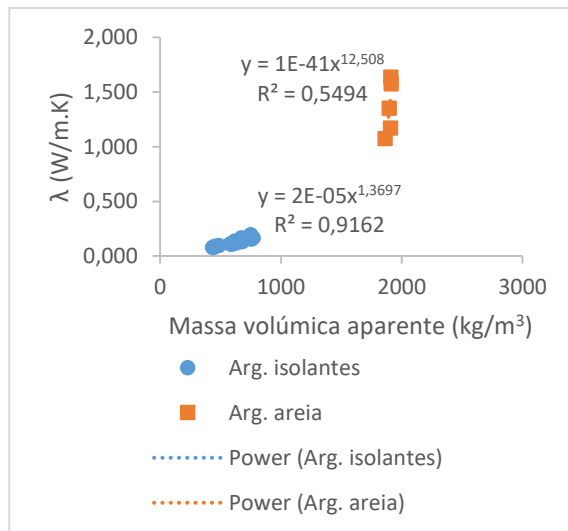


Figura 4.41 - Relação entre o coeficiente de condutibilidade térmica e a massa volúmica aparente

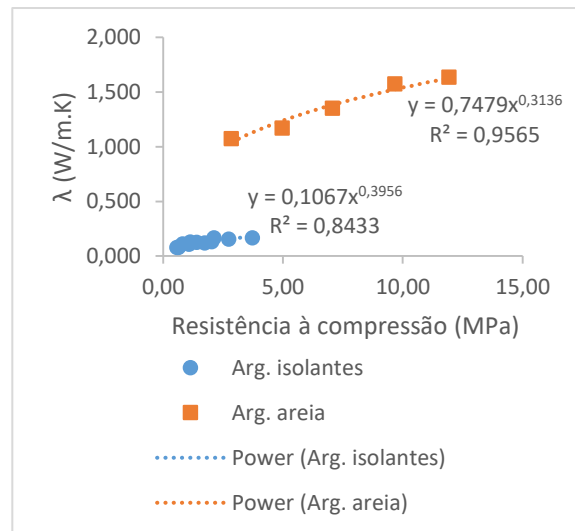


Figura 4.42 - Relação entre o coeficiente de condutibilidade térmica e a resistência à compressão

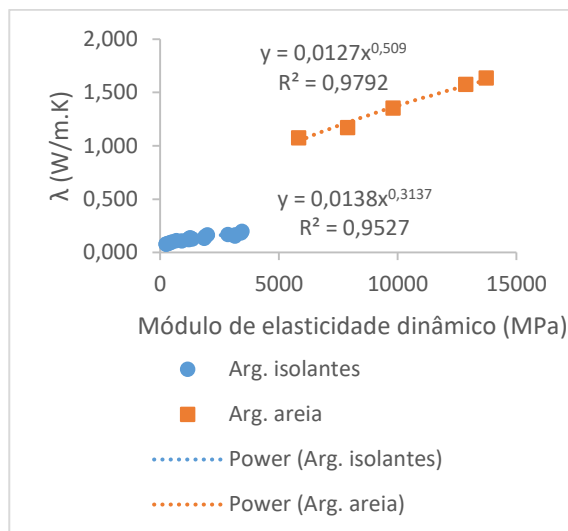


Figura 4.43 - Relação entre o coeficiente de condutibilidade térmica e módulo de elasticidade dinâmico

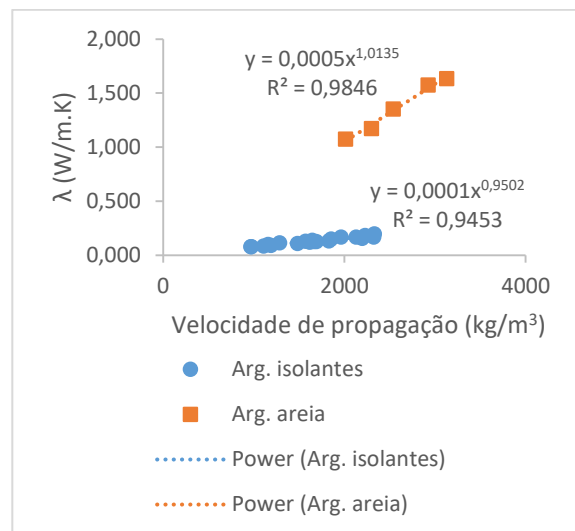


Figura 4.44 - Relação entre o coeficiente de condutibilidade térmica e a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas

A condutibilidade térmica também está fortemente relacionada com a resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico e velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, como se pode observar nas Figuras 4.42, 4.43 e 4.44, respectivamente; em todos os casos observa-se correlações de potência com  $R^2$  superior a 0,84. Esta relação seria expectável, pois a argamassas menos resistentes e menos compactas estão geralmente associadas menores massas volúmicas aparentes o que, como se viu, se traduz em menores condutibilidades térmicas. Vale (2014) também obteve uma correlação elevada entre a condutibilidade térmica de argamassas tradicionais e industriais com substituição de agregados; no entanto, o mesmo não se verificou para o módulo de elasticidade dinâmico e para a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas. Já Afonso (2015) obteve correlações com  $R^2$  entre 0,76 e 0,99 entre o coeficiente de condutibilidade térmica e as propriedades referidas.

#### 4.4 Síntese dos resultados

Na campanha preliminar (fase 1), foi efectuada uma campanha preliminar que permitiu aferir a influência dos adjuvantes utilizados (0,075% de éter de celulose e 0,05% de tensioactivo) em algumas características mecânicas e físicas de argamassas de areia. Assim sendo, verificou-se que a introdução de éter de celulose e tensioactivo não provocou alterações significativas na resistência à tracção por flexão (diminuição de 5%), mas a resistência à compressão diminuiu 18%. Seguindo a mesma tendência, o módulo de elasticidade dinâmico também diminuiu em relação à referência (cerca de 15%). Tal como a resistência à tracção, a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas não variou significativamente devido à presença de adjuvantes, com uma diminuição de 8% face à argamassa de referência. A massa volúmica aparente e o coeficiente de condutibilidade térmica variaram de forma idêntica quando foram introduzidos adjuvantes, com uma redução de 11 e 12%, respectivamente.

Conclui-se portanto que a adição conjunta de éter de celulose e tensioactivo provocou uma redução em todas as propriedades estudadas, ainda que, no caso da resistência à tracção e da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, tal redução tenha tido pouca expressão (inferior a 8%). Estes resultados podem ser explicados devido à formação de bolhas de ar nas misturas, resultantes da acção do tensioactivo, e que se traduzem numa massa volúmica aparente mais baixa; consequentemente, as argamassas serão menos resistentes e compactas e mais isolantes.

Ainda na campanha preliminar, estudou-se qual a influência da substituição de 50% do cimento por cinzas volantes em argamassas de areia. Relativamente à resistência à tracção por flexão, esta diminuiu em 20% devido à referida substituição, sendo que a resistência à compressão variou de forma semelhante, com uma redução de 27%. O módulo de elasticidade dinâmico teve uma quebra acentuada, de 42%. Já a variação na velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas teve a mesma ordem de grandeza registada para as resistências mecânicas, com uma redução de 23% em relação à referência. Também o coeficiente de condutibilidade térmica seguiu a mesma tendência, diminuindo em 30%. No entanto, a massa volúmica aparente manteve-se praticamente constante com a substituição de cimento por cinzas volantes.

Apesar de este tema ser discutido mais em pormenor na Fase 2, esta campanha preliminar permitiu perceber que, ao substituir metade do cimento por cinzas volantes, as argamassas tornam-se menos resistentes, mais deformáveis e apresentam um melhor comportamento térmico.

Na Fase 2, foi avaliada qual a influência de diferentes pastas ligantes e agregados nas características mecânicas e físicas de argamassas de desempenho térmico melhorado.

A porosidade aparente e a massa volúmica aparente mantiveram-se praticamente constantes para todas as constituições de pasta ligante. No entanto, não foi possível obter a porosidade aparente das argamassas de granulado de cortiça expandida, pois a baixa baridade deste agregado não permitiu a pesagem hidrostática. A massa volúmica aparente foi conseguida através do método geométrico.

Quanto ao módulo de elasticidade dinâmico, para argamassas de granulado de cortiça expandida, a substituição de cimento por 20% de cinzas volantes provocou uma redução de 20% no seu valor.

Para as restantes argamassas, apenas a partir de 50% de substituição se verificaram alterações significativas. No entanto, as argamassas de argila expandida mostraram uma menor susceptibilidade às alterações na pasta ligante.

Em relação à resistência à tracção por flexão e à compressão, apenas a partir de uma substituição de 35% de cimento por cinzas volantes é que se registou uma diminuição na resistência para argamassas de granulado de cortiça expandida e areia. A diminuição foi transversal a todas as argamassas a partir de 50% de substituição, excepto as de argila expandida, cuja resistência se manteve praticamente constante.

De um modo geral, apenas houve reduções na velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas a partir de 50% de substituição de cimento, com excepção, mais uma vez, das argamassas de argila expandida, cuja velocidade de propagação praticamente não se alterou. Esta propriedade foi medida por dois métodos distintos (directo e indirecto), tendo-se obtido uma elevada correlação entre ambos, quer através do cálculo das médias, quer através das dromocrónicas.

Os resultados obtidos para a tensão de aderência e o índice esclerométrico foram inconclusivos, não tendo sido possível a recolha de uma amostra significativa de dados; no primeiro caso devido a um método de corte inadequado ou colagem deficiente das pastilhas, e no segundo devido à necessidade de preservar as argamassas para a realização de outros ensaios (já que o embate da massa do esclerómetro tende a compactar a superfície da argamassa). Também o ensaio de permeabilidade à água líquida sob baixa pressão não permitiu tirar conclusões; a rugosidade das argamassas poderá ter afectado o correcto isolamento dos tubos e, adicionalmente, estes poderão ter sido colocados em zonas com microfissuras, o que originou coeficientes de variação elevados.

De uma forma geral, o coeficiente de absorção por capilaridade aumentou com a substituição de cimento por cinzas volantes, isto é, existe uma maior sucção de água na fase inicial do ensaio. No entanto, não foi encontrada uma relação entre a presença de cinzas volantes e o teor de água no final do ensaio. Já as argamassas com cimento, cinzas volantes e cal aérea, registaram os valores mais elevados para o coeficiente de absorção por capilaridade, assim como a maior quantidade de água absorvida.

Relativamente ao ensaio de secagem, verificou-se que as argamassas de granulado de cortiça expandida e de argila expandida registaram índices de secagem semelhantes, apesar de as primeiras terem secado de forma mais lenta. Ainda assim, constatou-se que o índice de secagem é inferior em argamassas com agregados isolantes, quando comparadas com argamassas de areia. Contudo, não foi possível estabelecer uma relação entre as alterações na pasta ligante e o índice de secagem. A grande variação nas condições ambientais no decorrer do ensaio pode também ter contribuído para algumas discrepâncias nos resultados.

Houve alterações significativas no coeficiente de condutibilidade térmica para percentagens de substituição de cimento iguais ou superiores a 35%. Os coeficientes foram semelhantes para as argamassas em que metade do cimento foi substituído por cinzas volantes ou por 10% de cinzas

volantes e 40% de cal aérea. Neste caso, nenhum dos agregados se mostrou mais ou menos susceptível a alterações na pasta ligante.

Relativamente aos agregados isolantes, as argamassas com argila expandida foram aquelas que apresentaram menor perda de propriedades mecânicas face às argamassas de areia. As argamassas de granulado de cortiça expandida, por outro lado, registaram as maiores perdas, enquanto as argamassas constituídas por uma mistura dos dois agregados apresentaram, naturalmente, valores intermédios. A mesma tendência foi verificada para a massa volúmica aparente e para o coeficiente de condutibilidade térmica. Com efeito, as argamassas que mostram um melhor compromisso entre menor condutibilidade térmica e maior resistência são as argamassas de argila expandida apenas com cimento ou com uma percentagem de cinzas volantes até 35%.

Quanto à porosidade aparente, observou-se que esta aumentou bastante (entre 95 e 124%) nas argamassas com agregados isolantes, face às argamassas de areia. No entanto, para além da maior porosidade do granulado de cortiça expandida e da argila expandida comparativamente à areia, a introdução de adjuvantes também pode ter contribuído para este resultado, já que um dos efeitos do tensioactivo é aumentar a porosidade das argamassas.

Como visto no Capítulo 2, para uma argamassa ser considerada térmica, segundo a EN 998-1, deve cumprir alguns requisitos quanto às suas propriedades. Assim, no que diz respeito à condutibilidade térmica e à resistência à compressão, todas as argamassas com agregados isolantes cumprem o requerido, com  $\lambda < 0,1 \text{ W/m.K}$  (todas as argamassas de granulado de cortiça expandida) ou  $\lambda < 0,2 \text{ W/m.K}$  (as restantes argamassas com agregado isolantes) e resistência à compressão entre 0,4 e 5 MPa. Contudo, quanto ao critério referente ao coeficiente de absorção de água por capilaridade, nenhuma das argamassas em estudo cumpre o exigido pela norma ( $C < 0,40 \text{ kg/m}^2.\text{min}^{0.5}$ ).

Na Tabela 4.18 estão sintetizados os resultados médios obtidos em todos os ensaios realizados.

Tabela 4.18 - Síntese dos resultados (Fases 1 e 2)

	$R_t$ (MPa)	$R_c$ (MPa)	$E_d$ (MPa)	$\nu$	$V_{us}$ (m/s)			$f_u$ (MPa)	IE	$MV_{ap}$ (kg/m <sup>3</sup> )		$P_{ap}$ (%)	$C$ (kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0.5</sup> )	IS	$C_A$ (kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0.5</sup> )	$\lambda_{28d}$ (W/m.K)		$\lambda_{seco}$ (W/m.K)
					Provetes	Tijolo				Método Geométrico	Pesagem Hidrostática					Provetes	Tijolo	
						Médias	Dromo-crônicas											
<b>A<sup>CP</sup><sub>Cl</sub></b>	2,36	8,91	11942	0,30	2930	n/a	n/a	n/a	n/a	1849	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	1,581	n/a	1,445
<b>B<sup>CP</sup><sub>Cl</sub></b>	2,18	7,95	10251	0,14	2793	n/a	n/a	n/a	n/a	1791	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	1,551	n/a	1,436
<b>D<sup>CP</sup><sub>Cl</sub></b>	2,21	8,09	10561	0,14	2702	n/a	n/a	n/a	n/a	1653	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	1,384	n/a	1,289
<b>J<sup>CP</sup><sub>CICV50</sub></b>	1,77	5,90	6154	0,15	2086	n/a	n/a	n/a	n/a	1588	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	1,016	n/a	0,898
<b>CI<sup>100GC</sup></b>	0,64	1,37	505	0,25	1160	1745	1387	0,11	71	487	(-)	(-)	0,71	0,07	0,94	0,099	0,084	0,087
<b>CI<sup>100AE</sup></b>	1,40	4,21	3446	0,24	2331	3244	2295	0,09	66	751	780	57,6	0,64	0,17	2,22	0,198	0,148	0,174
<b>CI<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	0,93	2,35	1267	0,2	1648	n/a	n/a	n/a	n/a	618	639	54,7	0,94	0,13	n/a	0,138	n/a	0,119
<b>CI<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	1,12	3,06	1994	0,22	1963	n/a	n/a	n/a	n/a	674	699	56,6	0,99	0,26	n/a	0,167	n/a	0,141
<b>CI<sup>100A</sup></b>	2,45	9,42	13729	0,15	3131	3999	2745	(-)	103	1909	1868	25,7	1,65	0,06	1,43	1,636	1,267	1,466
<b>CICV20<sup>100GC</sup></b>	0,59	1,21	404	0,24	1190	1617	1418	0,03	89	456	(-)	(-)	1,07	0,15	2,76	0,091	0,083	0,081
<b>CICV20<sup>100AE</sup></b>	1,40	4,18	3414	0,25	2228	3140	2391	0,29	81	749	779	55,1	1,28	0,26	1,25	0,184	0,168	0,167
<b>CICV20<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	0,92	2,29	1216	0,24	1664	n/a	n/a	n/a	n/a	615	623	53,9	1,47	0,09	n/a	0,128	n/a	0,117
<b>CICV20<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	1,10	2,97	1897	0,26	1857	n/a	n/a	n/a	n/a	669	667	57,5	1,45	0,11	n/a	0,151	n/a	0,140
<b>CICV20<sup>100A</sup></b>	2,39	9,07	12860	0,14	2925	3877	3038	0,65	107	1913	1880	25,8	1,54	0,05	1,34	1,575	0,818	1,461
<b>CICV35<sup>100GC</sup></b>	0,55	1,10	345	0,16	1110	n/a	n/a	n/a	n/a	451	(-)	(-)	2,01	0,11	n/a	0,084	n/a	0,075
<b>CICV35<sup>100AE</sup></b>	1,35	4,00	3162	0,31	2324	n/a	n/a	n/a	n/a	741	738	57,9	1,24	0,25	n/a	0,168	n/a	0,152
<b>CICV35<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	0,92	2,28	1210	0,23	1618	n/a	n/a	n/a	n/a	631	634	53,1	1,03	0,11	n/a	0,121	n/a	0,111
<b>CICV35<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	1,09	2,94	1862	0,23	1831	n/a	n/a	n/a	n/a	680	677	52,5	1,21	0,09	n/a	0,133	n/a	0,123
<b>CICV35<sup>100A</sup></b>	2,14	7,74	9807	0,14	2540	n/a	n/a	n/a	n/a	1898	1863	26,4	2,23	0,07	n/a	1,354	n/a	1,319
<b>CICV50<sup>100GC</sup></b>	0,49	0,93	256	0,15	974	1297	837	(-)	92	434	(-)	(-)	1,64	0,12	4,74	0,080	0,066	0,075
<b>CICV50<sup>100AE</sup></b>	1,35	4,00	3154	0,24	2196	2518	1854	0,08	79	754	738	52,9	1,03	0,30	0,96	0,155	0,126	0,144
<b>CICV50<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	0,82	1,94	910	0,23	1483	n/a	n/a	n/a	n/a	593	589	51,9	1,21	0,15	n/a	0,108	n/a	0,106



Tabela 4.18 - Síntese dos resultados (Fases 1 e 2) (continuação)

	$R_t$ (MPa)	$R_c$ (MPa)	$E_d$ (MPa)	$\nu$	$V_{us}$ (m/s)			$f_u$ (MPa)	IE	$MV_{ap}$ (kg/m <sup>3</sup> )		$P_{ap}$ (%)	$C$ (kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0.5</sup> )	IS	$C_A$ (kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0.5</sup> )	$\lambda_{28d}$ (W/m.K)		$\lambda_{seco}$ (W/m.K)
					Provetes	Tijolo				Mét. Geo.	Pes. Hidro.					Provetes	Tijolo	
						Média	Dromo-crónicas											
<b>CICV50<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	0,96	2,45	1365	0,28	1693	n/a	n/a	n/a	n/a	601	638	53,3	1,19	0,20	n/a	0,126	n/a	0,119
<b>CICV50<sup>100A</sup></b>	1,96	6,82	7899	0,18	2301	3004	2260	(-)	92	1908	1870	26,6	2,30	0,11	6,89	1,171	0,995	1,079
<b>CICV10CA40<sup>100GC</sup></b>	0,48	0,91	249	0,14	968	1555	1165	0,08	95	440	(-)	(-)	2,36	0,08	3,31	0,079	0,087	0,072
<b>CICV10CA40<sup>100AE</sup></b>	1,30	3,77	2852	0,26	2132	2554	2076	0,03	78	771	770	58,7	1,76	0,10	1,72	0,168	0,138	0,154
<b>CICV10CA40<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	0,73	1,64	685	0,21	1287	n/a	n/a	n/a	n/a	580	575	56,7	2,35	0,09	n/a	0,113	n/a	0,107
<b>CICV10CA40<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	0,92	2,30	1225	0,23	1573	n/a	n/a	n/a	n/a	651	663	57,9	2,22	0,10	n/a	0,130	n/a	0,123
<b>CICV10CA40<sup>100A</sup></b>	1,74	5,72	5830	0,15	2015	2800	2138	(-)	85	1863	1817	29,1	2,64	0,11	5,91	1,076	0,771	1,012

Legenda:  $R_t$  - resistência à tracção;  $R_c$  - resistência à compressão;  $E_d$  - módulo de elasticidade dinâmico;  $\nu$  - Coeficiente de *Poisson*;  $V_{us}$  - Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas;  $f_u$  - tensão de aderência; IE - índice esclerométrico;  $MV_{ap}$  - massa volúmica aparente;  $P_{ap}$  - porosidade aparente;  $C$  - coeficiente de absorção de água por capilaridade; IS - índice de secagem;  $C_A$  - coeficiente de absorção de água sob baixa pressão;  $\lambda$  - coeficiente de condutibilidade térmica; n/a - não aplicável; (-) - ensaio nulo



## 5. Conclusões e desenvolvimentos futuros

### 5.1 Considerações finais

A presente dissertação teve como objectivo principal avaliar a influência da pasta ligante, em associação com diferentes agregados isolantes, nas propriedades no estado endurecido de argamassas com desempenho térmico melhorado. Para tal, foram realizados vários ensaios laboratoriais, divididos em duas fases distintas. Foram analisadas a porosidade aberta e massa volúmica aparente, módulo de elasticidade dinâmico, coeficiente de *Poisson*, resistências à tracção por flexão e à compressão, velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, tensão de aderência, índice esclerométrico, absorção de água por capilaridade, índice de secagem, permeabilidade à água líquida sob baixa pressão e coeficiente de condutibilidade térmica. As conclusões resultantes desta campanha experimental são apresentadas de seguida.

### 5.2 Conclusões gerais

O primeiro objectivo da presente dissertação passou pela determinação da influência de adjuvantes em algumas propriedades de argamassas de areia. Os adjuvantes utilizados foram éter de celulose (retentor de água) e um tensoactivo (introdutor de ar), em quantidades correspondentes a 0,075 e 0,05% da massa de ligante, respectivamente. Esta formulação, quando comparada com a argamassa de referência, originou argamassas menos compactas (redução de 11% na massa volúmica aparente), menos resistentes (redução de 18% na resistência à compressão), mais isolantes (redução de 12% no coeficiente de condutibilidade térmica) e mais deformáveis (redução de 18% no módulo de elasticidade dinâmico).

Seguidamente, pretendeu-se avaliar a influência da pasta ligante, em conjunto com diferentes agregados isolantes, nas propriedades no estado endurecido de argamassas com desempenho térmico melhorado.

Tanto a massa volúmica aparente como a porosidade aberta não sofreram alterações significativas resultantes das modificações na pasta ligante. Já o desempenho mecânico das argamassas foi afectado de forma mais ou menos relevante, em função da percentagem de substituição do cimento e dos agregados utilizados.

O módulo de elasticidade dinâmico e as resistências à tracção por flexão e à compressão diminuíram de forma significativa nas argamassas de granulado de cortiça expandida a partir de uma substituição de 20% do cimento por cinzas volantes, enquanto nas argamassas de areia o mesmo só aconteceu para uma substituição mínima de 35%, e para as argamassas com uma mistura de granulado de cortiça expandida e argila expandida só a partir de 50%. Já as argamassas de argila expandida mostraram ser pouco sensíveis a variações na pasta ligante. Importa, no entanto, referir que os ensaios foram realizados aos 28 dias; tendo em conta estudos de outros autores, a diferença entre a resistência de argamassas de cinzas volantes e argamassas de cimento tenderá a diminuir em idades mais avançadas.

De um modo geral, a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas apenas diminuiu significativamente a partir de uma percentagem de substituição do cimento de 50%. As excepções ocorreram para a argamassa de areia com 35% de cinzas volantes e, mais uma vez, para todas as argamassas de argila expandida. Os resultados obtidos pelo método directo, em provetes, e pelo método indirecto (cálculo das médias e dromocrónicas) em modelos argamassa-tijolo, apresentaram uma correlação elevada. Constatou-se também que, ao analisar os dados resultantes do método indirecto, o método das dromocrónicas fornece resultados mais próximos dos obtidos no método directo.

Os ensaios de arrancamento por tracção, índice esclerométrico e permeabilidade à água líquida sob baixa pressão apresentaram resultados inconsistentes. Nos ensaios de arrancamento e índice esclerométrico, não foi possível obter um número significativo de resultados; no primeiro caso devido a um método de corte inadequado ou colagem deficiente das pastilhas e, no segundo, devido à necessidade de preservar as argamassas para a realização de outros ensaios (já que o embate da massa do esclerómetro tende a compactar a superfície da argamassa). Já no ensaio de permeabilidade à água líquida foram registados coeficientes de variação muito elevados, possivelmente devido à colocação de tubos de *Karsten* em zonas com microfissuras ou a um deficiente isolamento dos mesmos, devido à grande rugosidade de algumas argamassas.

Em relação ao coeficiente de absorção de água por capilaridade, este foi mais elevado nas argamassas constituídas por cimento, cinzas volantes e cal aérea, quando comparadas com argamassas de cimento; foi também nestas argamassas que se registou uma maior quantidade de água absorvida. Apesar de o coeficiente de capilaridade ser mais elevado nas argamassas com cinzas volantes quando comparadas com argamassas só de cimento, não foi encontrada uma relação entre este coeficiente e a percentagem de substituição. Também nenhum dos agregados se mostrou mais ou menos susceptível às alterações na pasta ligante.

Relativamente ao ensaio de secagem, verificou-se que a substituição da areia por agregados isolantes originou argamassas com um menor índice de secagem. No entanto, as argamassas de granulado de cortiça expandida e argila expandida apresentaram índices de secagem semelhantes, apesar de as primeiras terem secado de forma mais lenta. Não foi também possível relacionar este índice com a composição da pasta ligante. A grande variação nas condições ambientais no decorrer do ensaio pode também ter contribuído para algumas discrepâncias nos resultados.

A substituição de cimento por cinzas volantes (ou por cinzas volantes e cal aérea), mostrou ser vantajosa do ponto de vista térmico. Para uma percentagem de substituição por cinzas volantes de 20, 35 e 50%, a diminuição no coeficiente de condutibilidade térmica, aos 28 dias, em relação às argamassas de cimento foi, em média, de 7, 16 e 23%, respectivamente. As argamassas com cimento, cinzas volantes e cal aérea registaram uma diminuição de 22%. Os valores do coeficiente de condutibilidade térmica medidos nos modelos argamassa-tijolo foram inferiores aos obtidos em provetes, devido à maior rugosidade da superfície; ainda assim, a correlação entre os dois métodos foi elevada ( $R^2$  igual a 0,92).

Comparando agora o comportamento das argamassas com diferentes agregados isolantes, verificou-se que as argamassas de argila expandida são mais resistentes e compactas e menos deformáveis e isolantes do que as argamassas de granulado de cortiça expandida. As argamassas com uma mistura dos dois agregados apresentaram características intermédias. Assim, a escolha de um ou outro agregado (ou uma combinação de ambos) dependerá, naturalmente, do desempenho que se pretende obter com a aplicação da argamassa.

Combinando a influência da pasta ligante e agregados, se o objectivo passar pela utilização de uma argamassa que apresente um bom compromisso entre isolamento térmico e resistência mecânica, as mais adequadas serão argamassas de argila expandida apenas com cimento ou com cimento e cinzas volantes; de facto, os melhores rácios entre resistência à compressão e condutibilidade térmica foram obtidos para argamassas de argila expandida com uma percentagem de cinzas volantes até 35%. Por outro lado, se se pretender maximizar o isolamento térmico, a escolha deverá incidir sobre argamassas de granulado de cortiça expandida, preferencialmente com cinzas volantes (ou cinzas volantes e cal aérea) a substituir parte do cimento.

De acordo com a norma EN 998-1 (CEN, 2010), as argamassas estudadas cumprem os requisitos de condutibilidade térmica ( $\lambda < 0,1$  W/m.K para todas as argamassas de granulado de cortiça expandida e  $\lambda < 0,2$  W/m.K para as restantes argamassas com agregados isolantes) e de resistência à compressão ( $0,4 < R_c < 5$  MPa). No entanto, os coeficientes de absorção de água por capilaridade são muito elevados, não cumprindo o requisito para argamassas térmicas ( $C < 0,40$  kg/m<sup>2</sup>.min<sup>0.5</sup>); para alterar esta situação, as argamassas necessitam da incorporação de hidrófugos, de modo a controlar a absorção de água e, assim, cumprir o preconizado na norma.

O presente trabalho, contribuiu assim para o estudo de argamassas de desempenho térmico melhorado com a introdução de agregados isolantes, mas também com a substituição do cimento por cinzas volantes (ou cinzas volantes e cal aérea). Geralmente, a melhoria térmica em argamassas é conseguida através da substituição da areia por agregados isolantes; no entanto, com a campanha experimental realizada, concluiu-se que a alteração conjunta de agregados e pasta ligante induz reduções ainda maiores no coeficiente de condutibilidade térmica, o que faz destas argamassas soluções atractivas para o isolamento térmico de paredes.

### **5.3 Propostas de desenvolvimentos futuros**

Tendo em conta a campanha laboratorial desenvolvida e as conclusões retiradas, é notória a necessidade de desenvolvimento de novos estudos que possam complementar e aprofundar o que foi aqui apresentado. Nesse sentido, são propostos os seguintes desenvolvimentos:

- análise do efeito de diferentes adjuvantes, e em dosagens distintas, em argamassas de desempenho térmico melhorado;
- avaliação das propriedades mecânicas de argamassas com cinzas volantes a várias idades, de modo a compreender a evolução das propriedades mecânicas;

- estudo da influência da pasta ligante em argamassas com outros tipos de agregados isolantes, como EPS ou aerogel;
- caracterização de argamassas de desempenho térmico melhorado com maior percentagem de incorporação de cinzas volantes e com diferentes proporções cinzas volantes/cal aérea;
- análise da microestrutura e composição química das argamassas de desempenho térmico melhorado;
- análise da permeabilidade ao vapor e resistência ao choque das argamassas estudadas;
- medição da porosidade aberta e tensão de arrancamento através de ensaios mais adequados a argamassas leves;
- introdução de hidrófugos nas argamassas estudadas, de modo a melhorar o seu comportamento à água.

## 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 (2013), pp. 533-544.

**Afonso, P. (2015)** - "Comportamento acústico de argamassas de desempenho térmico melhorado". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 195 p.

**Al-Ajlan, S.A. (2006)** - "Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique". *Applied Thermal Engineering* 26 (2006), pp. 2184-2191.

**Alves, N. J. D. (2002)** - "Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento". Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, 175 p.

**Arandigoyen, M.; Alvarez, J. I. (2007)** - "Pore structure and mechanical properties of cement-lime mortars". *Cement and Concrete Research* 37 (2007), pp. 767-775.

**Arromba, J. (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, 122 p.

**Asdrubali, F.; Horoshenkov, K.V. (2002)** - "The acoustic properties of expanded clay granulates". *Journal of Building Acoustics* 9, N.º 2 (2002), pp. 85-98.

**Ashworth, T.; Ashworth, E. (1991)** - "Insulation materials: testing and applications". In: R.S. Graves, D.C. Wysocki (Eds.), *ASTM STP 1116*, 1991, Philadelphia, pp. 415-429.

**ASTM (2006)** - "Standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus, and poisson's ratio by impulse excitation of vibration". *ASTM E1876-01*. American Society for Testing Materials, 2006.

**Bartolini, R.; Filippozzi, S.; Princi, E.; Schenone, C.; Vicini, S. (2010)** - "Acoustic and mechanical properties of expanded clay granulates consolidated by epoxy resin". *Applied Clay Science* 48 (2010), pp. 460-465.

**Bauer, E. (2005)** - "Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades". Brasília: LEM-UnB, Sinduscon, 2005.

**Betioli, A.M.; Gleize, P.J.P.; Silva, D.A.; John, V.M.; Pileggi, R.G. (2009)** - "Effect of HMEC on the consolidation of cement pastes: isothermal calorimetry versus oscillatory rheometry". *Cement and Concrete Research* 39 (2009), pp. 440-445.

**Brás, A.; Leal, M.; Faria, P. (2013)** - "Cement-cork mortars for thermal bridges correction. Comparison with cement-eps mortars performance". *Construction and Building Materials* 49 (2013),

pp. 315–327.

**CEN (1998)** - “Methods of test for mortar for masonry - Part 1: Determination of particle size distribution (by sieve analysis)”. EN 1015-1. Comité Européen de Normalisation.

**CEN (1999a)** - “Methods of test for mortar for masonry - Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar”. EN 1015-10. Comité Européen de Normalisation.

**CEN (1999b)** - “Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar”. EN 1015-11. 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. Comité Européen de Normalisation.

**CEN (2002)** - “Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar”. EN 1015-18. Comité Européen de Normalisation.

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

**CEN (2010)** - “Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar”. EN 998-1. Comité Européen de Normalisation.

**CEN (2011)** - “Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements”. EN 197-1. Comité Européen de Normalisation.

**Charola, A.E.; Faria-Rodrigues, P.; McGhie, A.R.; Henriques, F.M.A. (2005)** - “Pozzolanic components in lime mortars: correlating behaviour, composition and microstructure”. *Int. J. Restoration of Buildings and Monuments* 11 (2005), pp. 111-118.

**Coutinho, A. S. (1973)** - “Fabrico e Propriedades do Betão”. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol 1, 1973.

**Coutinho, A. S. (1988)** - “Fabrico e Propriedades do Betão”. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol 2, 1988.

**Decreto-Lei nº 118/2013 (2013)** - “Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH)”. *Diário da República, I Série - A, N.º 159, 20 de Agosto de 2013.*

**Demirboga, R. (2003a)** - “Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength of mortar”. *Energy and Buildings* 35 (2003), pp. 189-192.

**Demirboga, R. (2003b)** - “Thermo-mechanical properties of sand and high volume mineral admixtures”. *Energy and Buildings* 35 (2003), pp. 435-439.



**Fanghui, H.; Qiang, W.; Jingjing, F. (2015)** - "The differences among the roles of ground fly ash in the paste, mortar and concrete". *Construction and Building Materials* 93 (2015), pp. 172-179.

**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, 2012, pp. 1-9.

**Ferreira, A. S.; de Brito, J.; Branco, F. (2007)** - "Desempenho relativo das argamassas de argila expandida na execução de camadas de forma". Congresso APFAC, 2007, CD.

**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, Lisboa, Instituto Superior Técnico, 487 p.

**Fonseca, T; Parresol, B. (2001)** - "A new model for cork weight estimation in Northern Portugal with methodology for construction of confidence intervals". *Forest Ecology and Management* 152 (2001), pp. 131-139.

**Frade D.; Tadeu A.; Torres I.; Mendes P.; Simões N.; Matias, G.; Neves A. (2012)** - "Argamassas industriais com incorporação de granulado de cortiça", em 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Coimbra, 2012.

**Franco, A. (2007)** – "An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient hot-wire method". *Applied Thermal Engineering* 27 (2007), pp. 2495-2504.

**Gil, L. (2007)** - "A Cortiça como material de construção" - Manual Técnico. APCOR, 2007.

**Gomes, A.; Ferreira Pinto, A.P.; Pinto, J.B. (2013)** - "Cimento Portland e Adições". *Apontamentos de Materiais de Construção*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2013.

**Gonçalves, P.; Frade, D.; Brites, J. (2012)** - "Argamassas Térmicas: Uma solução no cumprimento do RCCTE", em 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Coimbra 2012, pp.1-10.

**Gul, R.; Uysal, H.; Demirboga, R. (1997)** - "Investigation of the thermal conductivity of lightweight concrete made with kocapinar's pumice aggregate". *Advanced in Civil Engineering III*, in: Proceedings of the Technical Congress, Vol.2, METU, Turquia, 1997, pp. 553-562 (em Turco).

**IPQ (1994)** - "Cortiça. Granulados. Classificação e características". NP 114 (3ª Ed.). Lisboa, Instituto Português da Qualidade, 1994.

**IPQ (2002)** - "Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios". NP EN 1097-3. Lisboa, Instituto Português da Qualidade, 2002.

**IPQ (2006)** - “Métodos de ensaio de cimentos - Parte 1: Determinação das resistências mecânicas”. NP EN 196- 1:2006 (3ª Ed.). Lisboa, Instituto Português da Qualidade. 2006.

**IPQ (2011)** - “Cal de construção. Parte 1 - Definições, especificações e critérios de conformidade”. NP EN 459-1:2011. Lisboa, Instituto Português da Qualidade, 2011.

**ISO (2007)** - “Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values”. ISO 10456:2007. International Organization for Standardization, 2007.

**Karade, S.R., Irle, M., Maher, K. (2006)** - “Influence of granule properties and concentration on cork-cement compatibility”. Holz als Roh- und Werkstoff 64 (2006), pp. 281-286.

**Kalhuri, E.M.; Yetilmezsoy, K., Uygur, N.; Zarrabi, M.; Shmeis, R.M.A. (2013)** - “Modelling of adsorption of toxic chromium on natural and surface modified lightweight expanded clay aggregate (LECA)”. Applied Surface Science 287 (2013), pp. 428-442.

**Khan, M.I. (2002)** - “Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models”. Building and Environment 37 (2002), pp. 607-614.

**Khayat, K.H. (1998)** – “Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials - an overview”. Cement and Concrete Composites 20 (1998), pp. 171-188.

**Labrincha, J.; Samagaio A.; Vicente R. (2006)** - “Associação para o desenvolvimento da casa do futuro”. Sub projecto de Isolamento Térmico - 1º Relatório de Progresso, Universidade de Aveiro, 2006, 57 p.

**Leal, M. M. R. (2012)** - “Desenvolvimento de argamassas de revestimento com desempenho térmico melhorado”. Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Setúbal, 2012, 144p.

**LNEC (1968)** - “Recomendações para execução de revestimentos exteriores de argamassa”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

**LNEC (2002)** - “Revestimentos de paredes. Ensaio de absorção de água sob baixa pressão”. Ficha de ensaio FE Pa 39.1. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

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

**Melo, H. (2014)** - “Caracterização experimental do comportamento físico de argamassas de desempenho térmico melhorado”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 139 p.

**Ng, S.; Low, K. (2010)** - “Thermal conductivity of newspaper sandwiched aerated

lightweight concrete panel". *Energy and Buildings* 42 (2010), pp. 2452-2456.

**CNR - ICR (1991)** - "NORMAL 29/88 - Drying index", Rome, 1991.

**Orung, I. (1996)** - "A research on usage possibilities of ground lightweight aggregate in agricultural buildings". *Journal of the Faculty of Agriculture, Ataturk University* (1996), pp. 90-111 (em Turco).

**Ozguven, A.; Gunduz, L. (2012)** - "Examination of effective parameters for the production of expanded clay aggregate". *Cement and Concrete Composites* 34 (2012), pp. 781-787.

**Paiva, H.; Silva, L. M.; Labrincha, J. A.; Ferreira, V. M. (2007)** - "Efeito de Adjuvantes sobre a reologia de uma argamassa". In: *Congresso APFAC, 2007, Lisboa, CD*.

**Panesar, D.; Shindman, B. (2012)** - "The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork". *Cement and Concrete Composites* 34 (2012), pp. 982-992.

**Patural, L.; Marchal, P.; Govin, A.; Grosseau, P.; Ruot, B.; Devès, O. (2011)** - "Cellulose ethers influence on water retention and consistency in cement-based mortars". *Cement and Concrete Research* 41 (2011), pp. 46-55.

**Peschard, A.; Govin, A.; Grosseau, P.; Guilhot, B.; Guyonnet, R. (2004)** - "Effect of polysaccharides on the hydration of cement paste at early ages". *Cement and Concrete Research* 34 (2004), pp. 2153-2158.

**Petit, J.; Wirquin, E. (2013)** - "Evaluation of various cellulose ethers performance in ceramic tile adhesive mortars". *International Journal of Adhesion & Adhesives* 40 (2013), pp. 202-209.

**Pourchez, J.; Peschard, A.; Grosseau, P.; Guyonnet, R.; Guilhot, B.; Vallée, F. (2006a)** - "HPMC and HEMC influence on cement hydration". *Cement and Concrete Research* 36 (2006), pp. 288-294.

**Pourchez, J.; Grosseau, P.; Guyonnet, R.; Ruot, B. (2006b)** - "HEC influence on cement hydration measured by conductometry". *Cement and Concrete Research* 36 (2006), pp. 1777-1780.

**Rashad, A.M. (2015)** - "A brief on high-volume class F fly ash as cement replacement - a guide for civil engineer". *International Journal of Sustainable Built Environment* 4 (2015), pp. 278-306.

**RILEM (1980)** - "Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods, Commission RILEM/25-PEM: Protection et Erosion des Monuments", pp.175-253.

**Seabra, M.P.; Paiva, H.; Labrincha, J.A.; Ferreira, V.M. (2009)** - "Admixtures effect on fresh state properties of aerial lime based mortars". *Construction and Building Materials* 23 (2009), pp. 1147-1153.

**Shaikh, F.U.A.; Supit; S.W.M.; Sarker, P.K. (2014)** - "A study on the effect of nano silica on

compressive strength of high volume fly ash mortars and concretes". *Materials & Design* 60 (2014), pp. 433-442.

**Silva, S.P.; Sabino, M.A.; Fernandes, E.M.; Correlo, V.M.; Boesel, L.F.; Reis, R.L. (2005)** - "Cork: properties, capabilities and applications". *International Materials Reviews* 50 (2005), pp. 345-365.

**Silva, B. (2010)** - "Influência da mistura ligante no desempenho de argamassas bastardas para rebocos de edifícios antigos". Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 188 p.

**Silva, A.; Soares, A.; Flores-Colen, I.; de Brito, J. (2015)** - "Avaliação de propriedades mecânicas de argamassas de revestimento através do módulo de elasticidade dinâmico - Ensaios em provetes de dimensões reduzidas". In: Congresso PATORREB, Lisboa, 2015, 7 p.

**Soares, A.; Júlio, M.; Flores-Colen, I.; Ilharco, L.; de Brito, J.; Gaspar Martinho, J. (2015a)** - "Water resistance of mortars with lightweight aggregates". *Key Engineering Materials* 634, pp. 46-53.

**Soares, A.; Flores-Colen, I.; de Brito, J. (2015b)** - "Use of Non-Standard Specimens to Study the Compressive Strength of Multi-Coat Renders". *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 43, No. 5 (2015), pp. 1055-1065.

**Soares, A.; Melo, H.; Gomes, M.G.; Flores-Colen, I.; de Brito, J. (2015c)** - "Evaluation of the thermal behaviour of mortars applied on brick substrate". In: 1<sup>st</sup> International Symposium on Building Pathology, Porto, 2015, 7 p.

**Supit, S.W.M.; Shaikh, F.U.A.; Sarker, P. K. (2014)** - "Effect of ultrafine fly ash on mechanical properties of high volume fly ash mortar". *Construction and Building Materials* 51 (2014), pp.278-286.

**Vale, H.; Melo, H.; Soares, A.; Flores-Colen, I.; Gomes, M.G. (2014)** - "Performance of industrial thermal insulation renders". In: 9<sup>th</sup> International Masonry Conference, Guimarães, 2014, 11 p.

**Vašina, M.; Hughes, D.C.; Horoshenkov, K.V.; Lapčík Jr., L. (2006)** - "The acoustical properties of consolidated expanded clay granulates". *Applied Acoustics* 67 (2006), pp. 787–796.

**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, 522 p.

**Veiga, M. R. (2010)** - "Contribuição das argamassas e dos ETICS para a eficiência energética dos edifícios". Seminário TEKTÓNICA 2010, LNEC, Lisboa.

**Veiga, M. R. (2012)** - "ETICS e argamassas térmicas: novos desafios de desempenho e sustentabilidade". Seminário TEKTÓNICA 2012, LNEC, Lisboa.

**Xu, A.; Sarkar, S.L.; Nilsson, L.O. (1993)** - "Effect of fly ash on the microstructure of cement mortar". *Materials and Structures* 26 (1993), pp. 414-424.

### **Referências de *internet***

**[W1]** Amorim Isolamentos - <http://www.amorimisolamentos.com/en/>, consultado em Fevereiro de 2016

**[W2]** Argex - Argila expandida - <http://www.argex.pt>, consultado em Fevereiro de 2016

**[W3]** Calera Bellavista - <http://www.calerabellavista.com>, consultado em Março de 2016



## **Anexos**

## Anexo A1 - Massa volúmica aparente (Fase 1)

Tabela A1.1 - Resultados individuais da massa volúmica aparente (Fase 1)

	m (g)	V (m <sup>3</sup> )	MV <sub>ap</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	MV <sub>ap</sub> média (kg/m <sup>3</sup> )	DP (kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)
A <sub>Cl</sub>	476,1	0,000256	1860	1849	10	1
	472,6	0,000256	1846			
	471,2	0,000256	1841			
B <sub>Cl</sub>	459,5	0,000256	1795	1791	5	0
	457,2	0,000256	1786			
	459,1	0,000256	1793			
D <sub>Cl</sub>	423,3	0,000256	1654	1653	3	0
	422,5	0,000256	1650			
	423,9	0,000256	1656			
I <sub>ClCV50</sub>	404,4	0,000256	1580	1588	15	1
	404,2	0,000256	1579			
	410,9	0,000256	1605			

Legenda: m - massa do provete; V - volume do provete; MV<sub>ap</sub> - massa volúmica aparente; DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

## Anexo A2 - Módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de Poisson (Fase 1)

Tabela A2.1 - Resultados individuais das frequências de ressonância e respectivos valores do módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de Poisson (Fase 1)

	m (g)	Frequência de flexão (kHz)	Frequência de torção (kHz)	E <sub>d</sub> (MPa)	v
A <sub>Cl</sub>	476,1	3,42	3,42	11846	0,30
	472,6	3,42	3,42	11884	0,30
	471,2	3,46	3,46	12096	0,30
B <sub>Cl</sub>	459,5	3,23	4,50	10130	0,15
	457,2	3,21	4,48	9952	0,14
	464,0	3,30	4,61	10672	0,14
D <sub>Cl</sub>	423,3	3,43	4,84	10499	0,12
	422,5	3,48	4,81	10831	0,17
	423,9	3,40	4,74	10354	0,15
I <sub>ClCV50</sub>	404,4	2,67	3,73	6089	0,14
	404,2	2,67	3,71	6092	0,16
	410,9	2,69	3,75	6282	0,15

Legenda: m - massa do provete; E<sub>d</sub> - módulo de elasticidade dinâmico; v - coeficiente de Poisson.



## Anexo A3 - Resistência à tracção por flexão (Fase 1)

Tabela A3.1 - Resultados individuais da resistência à tracção por flexão (Fase 1)

	<b>F<sub>t</sub> (kN)</b>	<b>l (m)</b>	<b>b (m)</b>	<b>d (m)</b>	<b>R<sub>t</sub> (MPa)</b>	<b>R<sub>t</sub> média (MPa)</b>	<b>DP (MPa)</b>	<b>CV (%)</b>
<b>A<sub>Cl</sub></b>	1,363	0,10	0,04	0,04	3,19	2,87	0,30	10
	1,110	0,10	0,04	0,04	2,60			
	1,205	0,10	0,04	0,04	2,82			
<b>B<sub>Cl</sub></b>	0,806	0,10	0,04	0,04	1,89	2,09	0,20	10
	0,891	0,10	0,04	0,04	2,09			
	0,976	0,10	0,04	0,04	2,29			
<b>D<sub>Cl</sub></b>	1,174	0,10	0,04	0,04	2,75	2,74	0,26	9
	1,277	0,10	0,04	0,04	2,99			
	1,059	0,10	0,04	0,04	2,48			
<b>I<sub>cicv50</sub></b>	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)

Legenda: F<sub>t</sub> - carga máxima aplicada; l - distância entre os apoios da prensa; b - largura do provete; d - espessura do provete; R<sub>t</sub> - resistência à tracção; DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; (-) - ensaio nulo.

## Anexo A4 - Resistência à compressão (Fase 1)

Tabela A4.1 - Resultados individuais da resistência à compressão (Fase 1)

	<b>F<sub>c</sub> (kN)</b>	<b>A<sub>c</sub> (m<sup>2</sup>)</b>	<b>R<sub>c</sub> (MPa)</b>	<b>R<sub>c</sub> média (MPa)</b>	<b>DP (MPa)</b>	<b>CV (%)</b>
<b>A<sub>Cl</sub></b>	17,11	0,0016	10,69	10,08	1,12	11
	17,22	0,0016	10,76			
	14,07	0,0016	8,77			
<b>B<sub>Cl</sub></b>	12,60	0,0016	7,88	8,05	0,19	2
	12,85	0,0016	8,03			
	13,20	0,0016	8,25			
<b>D<sub>Cl</sub></b>	13,67	0,0016	8,54	8,49	0,47	6
	12,79	0,0016	7,99			
	14,28	0,0016	8,93			
<b>I<sub>cicv50</sub></b>	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)

Legenda: F<sub>c</sub> - carga máxima aplicada; A<sub>c</sub> - área da secção comprimida R<sub>c</sub> - resistência à compressão; DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; (-) - ensaio nulo.

## Anexo A5 - Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas (Fase 1)

Tabela A5.1 - Resultados individuais da velocidade de propagação de ultra-sónicas (Fase 1)

	L (mm)	t <sub>1</sub> (µs)	t <sub>2</sub> (µs)	t <sub>3</sub> (µs)	t médio (µs)	V <sub>us</sub> (m/s)	V <sub>us</sub> média (m/s)	DP (m/s)	CV (%)
A <sub>Cl</sub>	160	53,7	54,9	55,2	54,6	2930	2930	5	0
	160	54,7	54,6	54,2	54,5	2936			
	160	53,6	54,6	55,9	54,7	2925			
B <sub>Cl</sub>	160	57,9	58,1	59,1	58,4	2741	2793	75	3
	160	57,9	58,7	57,4	58,0	2759			
	160	55,7	55,4	55,6	55,6	2879			
D <sub>Cl</sub>	160	59,4	58,9	58,6	59,0	2713	2702	12	0
	160	59,4	59,4	59,7	59,5	2689			
	160	58,7	59,4	59,4	59,2	2704			
I <sub>ClCV50</sub>	160	76,9	76,9	77,2	77,0	2078	2086	16	1
	160	77,9	76,4	76,9	77,1	2076			
	160	76,1	76,6	75,4	76,0	2104			

Legenda: L - distância percorrida pelas ondas ultra-sónicas; t<sub>i</sub> - tempo que as ondas demoram a percorrer os provetes; V<sub>us</sub> - velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas; DP - Desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

## Anexo A6 - Coeficiente de condutibilidade térmica (Fase 1)

Tabela A6.1 - Resultados individuais do ensaio de condutibilidade térmica (Fase 1)

	λ <sub>28d</sub> (W/m.K)	λ <sub>28d</sub> médio (W/m.K)	λ <sub>seco</sub> (W/m.K)	λ <sub>seco</sub> médio (W/m.K)
A <sub>Cl</sub>	1,609	1,581	1,405	1,445
	1,553		1,485	
B <sub>Cl</sub>	1,544	1,551	1,439	1,436
	1,558		1,434	
D <sub>Cl</sub>	1,367	1,384	1,250	1,289
	1,400		1,329	
I <sub>ClCV50</sub>	1,031	1,016	0,925	0,898
	1,001		0,871	

Legenda: λ<sub>28d</sub> - Coeficiente de condutibilidade térmica aos 28 dias; λ<sub>seco</sub> - Coeficiente de condutibilidade térmica em provetes secos.

## Anexo A7 - Porosidade aparente e massa volúmica aparente (Fase 2)

Tabela A7.1 - Resultados individuais da porosidade aparente e da massa volúmica aparente (Fase 2)

	Método hidrostático											Método geométrico						
	m <sub>seco</sub> (g)	m <sub>imerso</sub> (g)	m <sub> saturado</sub> (g)	P <sub>ap</sub> (%)	P <sub>ap</sub> média (%)	DP (%)	CV (%)	MV <sub>ap</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	MV <sub>ap</sub> média (kg/m <sup>3</sup> )	DP (kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)	m (g)	V (m <sup>3</sup> )	MV <sub>ap</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	MV <sub>ap</sub> média (kg/m <sup>3</sup> )	DP (kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)	
CI <sup>100GC</sup>	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	125,0	0,000256	488	487	4	1	
	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.				n.e.				n.e.	125,4	0,000256				490
	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.				n.e.				n.e.	126,0	0,000256				492
	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.				n.e.				n.e.	124,8	0,000256				488
	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.				n.e.				n.e.	124,3	0,000256				486
	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.				n.e.				n.e.	122,7	0,000256				479
CI <sup>100AE</sup>	15,00	6,93	25,98	57,6	57,6	0,8	1	787	780	12	2	192,7	0,000256	753	751	6	1	
	18,79	8,66	32,45	57,4				790				192,1	0,000256	750				
	18,02	8,17	30,90	56,7				793				192,5	0,000256	752				
	20,27	9,13	35,13	57,2				780				192,7	0,000256	753				
	22,64	10,18	39,68	57,8				767				189,4	0,000256	740				
	18,39	8,55	32,58	59,1				765										
CI <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	15,00	4,11	27,65	53,7	54,7	1,6	3	637	639	13	2	153,8	0,000256	601	618	11	2	
	13,94	3,97	25,31	53,3				653				161,5	0,000256	631				
	16,25	4,71	29,66	53,7				651				159,1	0,000256	621				
	11,85	3,40	21,77	54,0				645				160,9	0,000256	629				
	23,93	7,26	45,65	56,6				623				156,8	0,000256	613				
	19,19	5,97	36,67	56,9				625				157,2	0,000256	614				
CI <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	18,08	6,59	33,37	57,1	56,6	0,8	1	675	699	19	3	170,6	0,000256	666	674	12	2	
	22,87	8,51	41,50	56,5				693				171,1	0,000256	668				
	22,28	8,98	39,58	56,5				728				170,2	0,000256	665				
	26,39	9,95	48,51	57,4				684				173,4	0,000256	677				
	35,93	13,77	65,11	56,8				700				171,1	0,000256	668				
	25,46	9,41	45,10	55,0				713				178,3	0,000256	696				

Legenda: m - massa do provete; V - volume do provete; P<sub>ap</sub> - Porosidade aparente; MV<sub>ap</sub> - Massa volúmica aparente; DP - Desvio padrão; CV - coeficiente de variação; n.e. - argamassa não ensaiada devido à impossibilidade de pesagem hidrostática.

Tabela A7.1 - Resultados individuais da porosidade aparente e da massa volúmica aparente (Fase 2) - continuação

	Método hidrostático								Método geométrico								
	m <sub>seco</sub> (g)	m <sub>imerso</sub> (g)	m <sub>saturoado</sub> (g)	P <sub>ap</sub> (%)	P <sub>ap</sub> média (%)	DP (%)	CV (%)	MV <sub>ap</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	MV <sub>ap</sub> média (kg/m <sup>3</sup> )	DP (kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)	m (g)	V (m <sup>3</sup> )	MV <sub>ap</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	MV <sub>ap</sub> média (kg/m <sup>3</sup> )	DP (kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)
<b>CI<sup>100A</sup></b>	60,78	36,6	69,12	25,6	25,7	0,5	2	1869	1868	13	1	485,2	0,000256	1895	1909	18	1
	64,19	38,64	73,17	26,0				1859				485,1	0,000256	1895			
	67,28	40,64	76,68	26,1				1867				483,6	0,000256	1889			
	69,79	42,1	78,97	24,9				1893				492,2	0,000256	1923			
	63,27	38,05	71,98	25,7				1865				494,7	0,000256	1932			
	66,49	40,06	75,86	26,2				1857				490,7	0,000256	1917			
<b>CICV20<sup>100GC</sup></b>	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	116,1	0,000256	454	456	5	1
	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.				n.e.				118,4	0,000256	463			
	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.				n.e.				114,9	0,000256	449			
	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.				n.e.				117,8	0,000256	460			
	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.				n.e.				116,7	0,000256	456			
	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.				n.e.				116,6	0,000256	455			
<b>CICV20<sup>100AE</sup></b>	26,17	10,13	44,36	53,1	55,1	1,2	2	765	779	12	2	191,1	0,000256	746	749	8	1
	20,80	8,76	35,75	55,4				771				188,3	0,000256	736			
	15,24	6,48	26,25	55,7				771				192,0	0,000256	750			
	20,42	8,55	34,50	54,3				787				191,9	0,000256	750			
	19,24	8,54	32,76	55,8				794				194,0	0,000256	758			
	23,55	10,58	40,46	56,6				788				192,9	0,000256	754			
<b>CICV20<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	17,69	4,67	33,84	55,4	53,9	2,0	4	606	623	17	3	157,1	0,000256	614	615	7	1
	21,93	5,49	39,56	51,7				644				159,7	0,000256	624			
	22,06	5,01	39,80	51,0				634				158,9	0,000256	621			
	21,44	5,73	41,06	55,5				607				154,6	0,000256	604			
	20,58	5,54	39,22	55,3				611				157,0	0,000256	613			
	21,21	6,08	39,47	54,7				635				156,6	0,000256	612			
<b>CICV20<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	23,40	8,54	43,35	57,3	57,5	0,2	0	672	667	4	1	169,6	0,000256	663	669	6	1
	25,67	9,24	48,11	57,7				660				170,4	0,000256	666			
	25,21	9,18	46,79	57,4				670				172,8	0,000256	675			
	23,34	8,53	43,60	57,8				666				170,5	0,000256	666			
	24,87	9,03	46,40	57,6				666				170,9	0,000256	668			
	22,20	8,07	41,31	57,5				668				173,1	0,000256	676			

Legenda: m - massa do provete; V - volume do provete; P<sub>ap</sub> - Porosidade aparente; MV<sub>ap</sub> - Massa volúmica aparente; DP - Desvio padrão; CV - coeficiente de variação; n.e. - argamassa não ensaiada devido à impossibilidade de pesagem hidrostática.

Tabela A7.1 - Resultados individuais da porosidade aparente e da massa volúmica aparente (Fase 2) - continuação

	Método hidrostático											Método geométrico					
	m <sub>seco</sub> (g)	m <sub>imerso</sub> (g)	m <sub>saturoado</sub> (g)	P <sub>ap</sub> (%)	P <sub>ap</sub> média (%)	DP (%)	CV (%)	MV <sub>ap</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	MV <sub>ap</sub> média (kg/m <sup>3</sup> )	DP (kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)	m (g)	V (m <sup>3</sup> )	MV <sub>ap</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	MV <sub>ap</sub> média (kg/m <sup>3</sup> )	DP (kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)
<b>CICV20<sup>100A</sup></b>	66,40	40,01	74,92	24,4	25,8	0,7	3	1902	1880	12	1	488,6	0,000256	1909	1913	8	0
	56,06	33,90	63,83	26,0				1873				488,4	0,000256	1908			
	54,35	32,95	61,95	26,2				1874				490,4	0,000256	1916			
	50,00	30,33	57,00	26,2				1875				493,7	0,000256	1929			
	48,04	29,07	54,58	25,6				1883				488,3	0,000256	1907			
	52,79	31,94	60,16	26,1				1871				489,3	0,000256	1911			
	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.				n.e.				n.e.	n.e.	n.e.			
n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	117,6	0,000256	459										
n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	117,1	0,000256	457										
n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	115,8	0,000256	452										
n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	112,8	0,000256	441										
n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	112,5	0,000256	439										
<b>CICV35<sup>100AE</sup></b>	23,31	10,21	41,91	58,7	57,9	2,6	5	735	738	13	2	192,1	0,000256	750	741	15	2
	25,05	11,09	45,15	59,0				735				190,3	0,000256	743			
	26,18	11,48	47,38	59,1				729				188,1	0,000256	735			
	24,84	10,91	45,32	59,5				722				182,6	0,000256	713			
	25,85	9,59	43,87	52,6				754				192,6	0,000256	752			
	27,52	12,26	48,84	58,3				752				191,8	0,000256	749			
	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.				53,1				1,1	2	624			
29,38	7,81	54,67	54,0	627	159,3	0,000256	622										
26,52	6,93	48,92	53,3	632	165,6	0,000256	647										
22,87	5,81	41,79	52,6	636	160,3	0,000256	626										
28,11	7,29	51,71	53,1	633	162,0	0,000256	633										
21,35	5,40	38,15	51,3	652	163,9	0,000256	640										
n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	52,5	0,9	2	669		677	11	2			171,5	0,000256	670	680
24,81	6,72	43,82	51,2				668	169,5				0,000256	662				
29,78	9,00	53,61	53,4				666	170,8				0,000256	667				
28,08	8,39	50,58	53,3				687	177,7				0,000256	694				
22,30	6,85	39,30	52,4				686	179,2				0,000256	700				
22,02	6,90	38,99	52,9				688	176,1				0,000256	688				
25,05	7,39	43,81	51,5														

Legenda: m - massa do provete; V - volume do provete; P<sub>ap</sub> - Porosidade aparente; MV<sub>ap</sub> - Massa volúmica aparente; DP - Desvio padrão; CV - coeficiente de variação; n.e. - argamassa não ensaiada devido à impossibilidade de pesagem hidrostática.

Tabela A7.1 - Resultados individuais da porosidade aparente e da massa volúmica aparente (Fase 2) - continuação

	Método hidrostático											Método geométrico					
	m <sub>seco</sub> (g)	m <sub>imerso</sub> (g)	m <sub>saturoado</sub> (g)	P <sub>ap</sub> (%)	P <sub>ap</sub> média (%)	DP (%)	CV (%)	MV <sub>ap</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	MV <sub>ap</sub> média (kg/m <sup>3</sup> )	DP (kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)	m (g)	V (m <sup>3</sup> )	MV <sub>ap</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	MV <sub>ap</sub> média (kg/m <sup>3</sup> )	DP (kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)
CICV35 <sup>100A</sup>	56,37	34,11	63,96	25,4	26,4	0,7	3	1888	1863	17	1	488,8	0,000256	1909	1898	8	0
	57,20	34,61	65,15	26,0				1873				485,1	0,000256	1895			
	59,90	36,37	68,44	26,6				1868				487,7	0,000256	1905			
	58,60	35,28	66,81	26,0				1859				484,9	0,000256	1894			
	61,77	37,39	70,93	27,3				1842				483,7	0,000256	1889			
	60,70	36,68	69,49	26,8				1850				484,4	0,000256	1892			
CICV50 <sup>100GC</sup>	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	114,6	0,000256	448	434	12	3
	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.				n.e.				112,9	0,000256	441			
	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.				n.e.				111,7	0,000256	436			
	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.				n.e.				112,2	0,000256	438			
	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.				n.e.				108,7	0,000256	425			
	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.				n.e.				106,3	0,000256	415			
CICV50 <sup>100AE</sup>	27,3	10,0	46,9	53,1	52,9	0,9	2	739	738	5	1	192,2	0,000256	751	754	6	1
	32,6	12,4	56,1	53,7				746				192,8	0,000256	753			
	22,6	8,5	39,0	53,9				740				191,5	0,000256	748			
	24,8	8,4	42,1	51,3				737				192,0	0,000256	750			
	26,2	9,2	45,0	52,4				732				194,6	0,000256	760			
	18,5	6,6	31,8	52,8				736				195,2	0,000256	763			
CICV50 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	24,56	4,86	46,13	52,3	51,9	0,7	1	595	589	4	1	152,0	0,000256	594	593	3	0
	20,33	3,48	37,91	51,1				590				152,9	0,000256	597			
	21,87	3,87	40,89	51,4				591				151,5	0,000256	592			
	22,10	4,12	41,98	52,5				584				152,3	0,000256	595			
	22,73	4,39	43,09	52,6				587				150,8	0,000256	589			
	23,73	4,11	44,58	51,5				586				152,0	0,000256	594			
CICV50 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	24,63	6,41	44,26	51,9	53,3	0,9	2	651	638	7	1	162,9	0,000256	636	634	8	1
	22,32	5,84	40,83	52,9				638				161,0	0,000256	629			
	23,32	6,19	42,87	53,3				636				159,3	0,000256	622			
	22,01	5,97	40,55	53,6				636				165,4	0,000256	646			
	27,14	7,63	50,39	54,4				635				162,0	0,000256	633			
	24,85	6,67	46,03	53,8				631				163,1	0,000256	637			

Legenda: m - massa do provete; V - volume do provete; P<sub>ap</sub> - Porosidade aparente; MV<sub>ap</sub> - Massa volúmica aparente; DP - Desvio padrão; CV - coeficiente de variação; n.e. - argamassa não ensaiada devido à impossibilidade de pesagem hidrostática.

Tabela A7.1 - Resultados individuais da porosidade aparente e da massa volúmica aparente (Fase 2) - continuação

	Método hidrostático								Método geométrico								
	m <sub>seco</sub> (g)	m <sub>imerso</sub> (g)	m <sub>saturoado</sub> (g)	P <sub>ap</sub> (%)	P <sub>ap</sub> média (%)	DP (%)	CV (%)	MV <sub>ap</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	MV <sub>ap</sub> média (kg/m <sup>3</sup> )	DP (kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)	m (g)	V (m <sup>3</sup> )	MV <sub>ap</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	MV <sub>ap</sub> média (kg/m <sup>3</sup> )	DP (kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)
CICV50 <sup>100A</sup>	59,88	36,46	68,79	27,6	26,6	0,6	2	1852	1870	10	1	486,3	0,000256	1900	1908	8	0
	57,60	35,02	65,82	26,7				1870				486,4	0,000256	1900			
	63,78	38,81	72,91	26,8				1870				489,8	0,000256	1913			
	63,94	38,75	73,00	26,5				1867				488,4	0,000256	1908			
	54,56	33,05	62,08	25,9				1879				491,7	0,000256	1921			
	64,18	38,90	73,05	26,0				1879				487,6	0,000256	1905			
CICV10CA40 <sup>100GC</sup>	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	116,2	0,000256	454	440	14	3
	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.				n.e.				117,5	0,000256	459			
	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.				n.e.				110,9	0,000256	433			
	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.				n.e.				111,9	0,000256	437			
	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.				n.e.				109,5	0,000256	428			
	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.				n.e.				109,4	0,000256	427			
CICV10CA40 <sup>100AE</sup>	21,77	9,97	38,57	58,7	58,7	0,4	1	761	770	15	2	199,4	0,000256	779	771	15	2
	26,45	12,20	46,63	58,6				768				197,5	0,000256	771			
	23,74	10,71	41,87	58,2				762				197,9	0,000256	773			
	23,10	10,58	41,34	59,3				751				189,8	0,000256	741			
	21,91	10,38	38,25	58,6				786				199,7	0,000256	780			
	23,43	11,10	40,81	58,5				789				199,2	0,000256	778			
CICV10CA40 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	18,03	4,33	35,79	56,5	56,7	0,7	1	573	575	8	1	147,0	0,000256	574	580	7	1
	19,81	4,94	39,85	57,4				567				147,8	0,000256	577			
	18,48	4,60	36,89	57,0				572				149,4	0,000256	584			
	17,56	4,32	35,21	57,1				568				146,0	0,000256	570			
	20,62	4,97	40,79	56,3				576				149,0	0,000256	582			
	19,76	4,89	38,38	55,6				590				151,0	0,000256	590			
CICV10CA40 <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	20,67	7,43	38,80	57,8	57,9	0,6	1	659	663	8	1	169,1	0,000256	661	651	10	2
	20,73	7,50	38,63	57,5				666				169,6	0,000256	663			
	23,29	8,58	43,54	57,9				666				168,5	0,000256	658			
	21,56	7,83	40,99	58,6				650				165,3	0,000256	646			
	20,21	7,77	37,84	58,6				672				163,6	0,000256	639			
	18,92	6,74	35,11	57,1				667				164,1	0,000256	641			

Legenda: m - massa do provete; V - volume do provete; P<sub>ap</sub> - Porosidade aparente; MV<sub>ap</sub> - Massa volúmica aparente; DP - Desvio padrão; CV - coeficiente de variação; n.e. - argamassa não ensaiada devido à impossibilidade de pesagem hidrostática.

Tabela A7.1 - Resultados individuais da porosidade aparente e da massa volúmica aparente (Fase 2) - continuação

	Método hidrostático						Método geométrico										
	m <sub>seco</sub> (g)	m <sub>imerso</sub> (g)	m <sub> saturado</sub> (g)	P <sub>ap</sub> (%)	P <sub>ap</sub> média (%)	DP (%)	CV (%)	MV <sub>ap</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	MV <sub>ap</sub> média (kg/m <sup>3</sup> )	DP (kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)	m (g)	V (m <sup>3</sup> )	MV <sub>ap</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	MV <sub>ap</sub> média (kg/m <sup>3</sup> )	DP (kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)
<b>CICV10CA40<sup>100A</sup></b>	63,69	38,73	73,84	28,9	29,1	0,5	2	1814	1817	12	1	476,4	0,000256	1861	1863	6	0
	52,58	32,06	61,22	29,6				1803				476,9	0,000256	1863			
	62,79	38,25	73,01	29,4				1806				475,6	0,000256	1858			
	57,18	34,96	66,38	29,3				1820				478,6	0,000256	1870			
	63,69	38,74	73,66	28,6				1824				475,3	0,000256	1857			
	62,79	38,36	72,55	28,5				1837				479,1	0,000256	1871			

Legenda: m - massa do provete; V - volume do provete; P<sub>ap</sub> - Porosidade aparente; MV<sub>ap</sub> - Massa volúmica aparente; DP - Desvio padrão; CV - coeficiente de variação; n.e. - argamassa não ensaiada devido à impossibilidade de pesagem hidrostática.



## Anexo A8 - Módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de Poisson (Fase 2)

Tabela A8.1 - Resultados individuais das frequências de ressonância e respectivos valores do módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de *Poisson* (Fase 2)

	m (g)	Frequência de flexão (kHz)	Frequência de torção (kHz)	E <sub>d</sub> (MPa)	ν
<b>CI<sup>100GC</sup></b>	125,0	1,36	1,87	490	0,18
	125,4	1,39	1,85	519	0,28
	126,0	1,40	1,87	528	0,27
	124,8	1,39	1,88	514	0,23
	124,3	1,36	1,83	491	0,24
	122,7	1,36	1,81	486	0,28
<b>CI<sup>100AE</sup></b>	192,7	2,89	3,90	3431	0,23
	193,8	2,91	3,91	3503	0,25
	192,1	2,84	3,90	3285	0,19
	192,5	2,93	3,90	3541	0,28
	192,7	2,92	3,92	3509	0,25
	189,4	2,90	3,87	3410	0,27
<b>CI<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	153,8	1,92	2,57	1212	0,26
	161,5	1,99	2,71	1359	0,21
	159,1	1,94	2,67	1269	0,18
	160,9	1,94	2,68	1282	0,17
	156,8	1,93	2,64	1240	0,20
	157,2	1,93	2,68	1238	0,16
<b>CI<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	170,6	2,31	3,10	1944	0,25
	171,1	2,30	3,09	1932	0,25
	170,2	2,28	3,12	1878	0,20
	173,4	2,37	3,23	2070	0,21
	171,1	2,32	3,21	1949	0,17
	178,3	2,40	3,23	2191	0,24
<b>CI<sup>100A</sup></b>	485,2	3,63	5,09	13493	0,13
	485,1	3,61	5,05	13348	0,14
	483,6	3,51	4,94	12566	0,12
	492,2	3,68	5,13	14084	0,15
	494,7	3,73	5,16	14567	0,17
	490,7	3,71	5,10	14317	0,18
<b>CICV20<sup>100GC</sup></b>	116,1	1,27	1,74	397	0,19
	118,4	1,28	1,71	415	0,27
	114,9	1,31	1,71	426	0,34
	117,8	1,26	1,72	397	0,20
	116,7	1,26	1,69	396	0,25
	116,6	1,26	1,72	393	0,20
<b>CICV20<sup>100AE</sup></b>	191,1	2,87	3,79	3384	0,30
	188,3	2,84	3,77	3258	0,28
	192,0	2,86	3,83	3357	0,26
	191,9	2,92	3,96	3482	0,22
	194,0	2,89	3,92	3448	0,22
	192,9	2,94	3,96	3556	0,24
<b>CICV20<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	157,1	1,92	2,62	1230	0,20
	159,7	1,93	2,61	1267	0,23
	158,9	1,89	2,60	1203	0,18
	154,6	1,86	2,51	1140	0,23
	157,0	1,94	2,56	1271	0,30
	156,6	1,88	2,51	1185	0,27

Legenda: m - massa do provete; E<sub>d</sub> - módulo de elasticidade dinâmico; ν - coeficiente de *Poisson*.

Tabela A8.1 - Resultados individuais das frequências de ressonância e respectivos valores do módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de *Poisson* (Fase 2) - continuação

	m (g)	Frequência de flexão (kHz)	Frequência de torção (kHz)	E <sub>d</sub> (MPa)	ν
<b>CICV20<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	169,6	2,26	2,99	1861	0,30
	170,4	2,21	2,96	1779	0,26
	172,8	2,28	3,03	1926	0,28
	170,5	2,30	3,07	1931	0,27
	170,9	2,32	3,11	1965	0,25
	173,1	2,28	3,08	1917	0,23
<b>CICV20<sup>100A</sup></b>	488,6	3,52	3,49	12801	0,16
	488,4	3,50	3,53	12616	0,12
	490,4	3,56	3,56	13133	0,15
	493,7	3,63	3,59	13790	0,18
	488,3	3,46	3,46	12333	0,13
	489,3	3,48	3,52	12488	0,11
<b>CICV35<sup>100GC</sup></b>	110,9	1,20	1,68	337	0,14
	117,6	1,19	1,64	353	0,18
	117,1	1,19	1,67	350	0,13
	115,8	1,19	1,63	348	0,19
	112,8	1,20	1,65	344	0,18
	112,5	1,19	1,66	337	0,15
<b>CICV35<sup>100AE</sup></b>	192,1	2,80	3,66	3254	0,33
	190,3	2,80	3,63	3239	0,36
	188,1	2,72	3,57	3001	0,32
	182,6	2,66	3,50	2782	0,31
	192,6	2,85	3,83	3339	0,25
	191,8	2,86	3,82	3357	0,27
<b>CICV35<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	157,6	1,84	2,48	1138	0,24
	159,3	1,88	2,54	1200	0,23
	165,6	1,97	2,71	1362	0,18
	160,3	1,86	2,48	1188	0,27
	162,0	1,85	2,50	1181	0,23
	163,9	1,85	2,51	1194	0,22
<b>CICV35<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	171,5	2,20	3,01	1762	0,20
	169,5	2,24	3,03	1811	0,23
	170,8	2,22	2,98	1798	0,25
	177,7	2,25	3,04	1917	0,23
	179,2	2,26	3,05	1951	0,23
	176,1	2,27	3,06	1935	0,24
<b>CICV35<sup>100A</sup></b>	488,8	3,07	4,35	9705	0,11
	485,1	3,12	4,36	9972	0,14
	487,7	3,10	4,34	9894	0,14
	484,9	3,15	4,33	10199	0,18
	483,7	3,07	4,29	9628	0,14
	484,4	3,04	4,28	9441	0,12
<b>CICV50<sup>100GC</sup></b>	114,6	1,04	1,43	263	0,18
	112,9	1,03	1,40	255	0,21
	111,7	1,03	1,42	251	0,18
	112,2	1,02	1,39	248	0,21
	108,7	1,07	1,55	261	0,06
	106,3	1,07	1,53	256	0,09

Legenda: m - massa do provete; E<sub>d</sub> - módulo de elasticidade dinâmico; ν - coeficiente de *Poisson*.

Tabela A8.1 - Resultados individuais das frequências de ressonância e respectivos valores do módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de *Poisson* (Fase 2) - continuação

	m (g)	Frequência de flexão (kHz)	Frequência de torção (kHz)	E <sub>d</sub> (MPa)	ν
<b>CICV50<sup>100AE</sup></b>	192,2	2,83	3,80	3287	0,25
	192,8	2,81	3,77	3252	0,25
	191,5	2,72	3,69	3015	0,22
	192,0	2,76	3,72	3119	0,24
	194,6	2,75	3,71	3137	0,24
	195,2	2,74	3,72	3118	0,22
<b>CICV50<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	152,0	1,71	2,32	946	0,22
	152,9	1,70	2,29	942	0,24
	151,5	1,68	2,26	912	0,24
	152,3	1,67	2,27	903	0,21
	150,8	1,65	2,22	876	0,24
	152,0	1,65	2,23	882	0,23
<b>CICV50<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	162,9	2,03	2,66	1449	0,32
	161,0	1,97	2,60	1344	0,30
	159,3	1,98	2,61	1344	0,31
	165,4	1,98	2,65	1386	0,26
	162,0	1,96	2,60	1335	0,29
	163,1	1,96	2,65	1335	0,23
<b>CICV50<sup>100A</sup></b>	486,3	2,66	3,65	7297	0,19
	486,4	2,68	3,68	7408	0,19
	489,8	2,74	3,80	7778	0,16
	488,4	2,87	3,93	8536	0,19
	491,7	2,82	3,89	8280	0,17
	487,6	2,80	3,86	8098	0,18
<b>CICV10CA40<sup>100GC</sup></b>	116,2	1,02	1,45	255	0,10
	117,5	1,03	1,43	264	0,16
	110,9	1,02	1,42	244	0,15
	111,9	1,02	1,41	246	0,17
	109,5	1,04	1,44	251	0,16
	109,4	1,01	1,40	235	0,13
<b>CICV10CA40<sup>100AE</sup></b>	199,4	2,63	3,49	2959	0,29
	197,5	2,62	3,48	2908	0,28
	197,9	2,61	3,51	2877	0,24
	189,8	2,55	3,39	2646	0,28
	199,7	2,57	3,49	2806	0,22
	199,2	2,62	3,53	2916	0,24
<b>CICV10CA40<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	147,0	1,48	2,03	683	0,19
	147,8	1,48	2,02	688	0,20
	149,4	1,45	2,02	664	0,15
	146,0	1,47	1,99	672	0,23
	149,0	1,46	1,98	676	0,22
	151,0	1,50	2,01	726	0,26

Legenda: m - massa do provete; E<sub>d</sub> - módulo de elasticidade dinâmico; ν - coeficiente de *Poisson*.

Tabela A8.1 - Resultados individuais das frequências de ressonância e respectivos valores do módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de *Poisson* (Fase 2) - continuação

	<b>m (g)</b>	<b>Frequência de fle- xão (kHz)</b>	<b>Frequência de torção (kHz)</b>	<b>E<sub>d</sub> (MPa)</b>	<b>ν</b>
<b>CICV10CA40<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	169,1	1,89	2,54	1289	0,25
	169,6	1,89	2,55	1291	0,24
	168,5	1,87	2,53	1255	0,23
	165,3	1,81	2,45	1153	0,23
	163,6	1,86	2,52	1205	0,22
	164,1	1,82	2,48	1155	0,21
<b>CICV10CA40<sup>100A</sup></b>	476,4	2,41	3,35	5850	0,15
	476,9	2,41	3,34	5860	0,16
	475,6	2,43	3,42	5923	0,12
	478,6	2,43	3,39	5970	0,15
	475,3	2,36	3,32	5584	0,12
	479,1	2,39	3,31	5791	0,16

Legenda: m - massa do provete; E<sub>d</sub> - módulo de elasticidade dinâmico; ν - coeficiente de *Poisson*.

## Anexo A9 - Resistência à tracção por flexão (Fase 2)

Tabela A9.1- Resultados individuais da resistência à tracção por flexão (Fase 2)

	<b>F<sub>t</sub> (kN)</b>	<b>l (m)</b>	<b>b (m)</b>	<b>d (m)</b>	<b>R<sub>t</sub> (MPa)</b>	<b>R<sub>t</sub> média (MPa)</b>	<b>DP (MPa)</b>	<b>CV (%)</b>
<b>CI<sup>100GC</sup></b>	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)	(-)	(-)	(-)
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
<b>CI<sup>100AE</sup></b>	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)	(-)	(-)	(-)
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
<b>CI<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)	(-)	(-)	(-)
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
<b>CI<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)	(-)	(-)	(-)
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
<b>CI<sup>100A</sup></b>	1,118	0,10	0,04	0,04	2,62	2,83	0,41	14
	1,031	0,10	0,04	0,04	2,42			
	1,016	0,10	0,04	0,04	2,38			
	1,381	0,10	0,04	0,04	3,24			
	1,341	0,10	0,04	0,04	3,14			
	1,369	0,10	0,04	0,04	3,21			
<b>CICV20<sup>100GC</sup></b>	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)	(-)	(-)	(-)
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
<b>CICV20<sup>100AE</sup></b>	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)	(-)	(-)	(-)
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
<b>CICV20<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)	(-)	(-)	(-)
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			

Legenda: F<sub>t</sub> - carga máxima aplicada; l - distância entre os apoios da prensa; b - largura do provete; d - espessura do provete; R<sub>t</sub> - resistência à tracção; DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; (-) - ensaio nulo.

Tabela A9.1 - Resultados individuais da resistência à tracção por flexão (Fase 2) - continuação

	<b>F<sub>t</sub> (kN)</b>	<b>l (m)</b>	<b>b (m)</b>	<b>d (m)</b>	<b>R<sub>t</sub> (MPa)</b>	<b>R<sub>t</sub> média (MPa)</b>	<b>DP (MPa)</b>	<b>CV (%)</b>
<b>CICV20<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)	(-)	(-)	(-)
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
<b>CICV20<sup>100A</sup></b>	0,975	0,10	0,04	0,04	2,29	2,49	0,21	9
	0,972	0,10	0,04	0,04	2,28			
	1,013	0,10	0,04	0,04	2,37			
	1,158	0,10	0,04	0,04	2,71			
	1,181	0,10	0,04	0,04	2,77			
	1,072	0,10	0,04	0,04	2,51			
<b>CICV35<sup>100GC</sup></b>	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)	(-)	(-)	(-)
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
<b>CICV35<sup>100AE</sup></b>	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)	1,27	0,01	1
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	0,539	0,10	0,04	0,04	1,26			
	0,546	0,10	0,04	0,04	1,28			
<b>CICV35<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	0,349	0,10	0,04	0,04	0,82	0,83	0,06	7
	0,383	0,10	0,04	0,04	0,90			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	(-)	0,10	0,04	0,04	(-)			
	0,332	0,10	0,04	0,04	0,78			
<b>CICV35<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	0,329	0,10	0,04	0,04	0,77	0,86	0,06	7
	0,350	0,10	0,04	0,04	0,82			
	0,369	0,10	0,04	0,04	0,86			
	0,393	0,10	0,04	0,04	0,92			
	0,401	0,10	0,04	0,04	0,94			
	0,364	0,10	0,04	0,04	0,85			
<b>CICV35<sup>100A</sup></b>	0,803	0,10	0,04	0,04	1,88	1,83	0,11	6
	0,848	0,10	0,04	0,04	1,99			
	0,723	0,10	0,04	0,04	1,69			
	0,731	0,10	0,04	0,04	1,71			
	0,798	0,10	0,04	0,04	1,87			
	0,786	0,10	0,04	0,04	1,84			
<b>CICV50<sup>100GC</sup></b>	0,180	0,10	0,04	0,04	0,42	0,40	0,04	10
	0,180	0,10	0,04	0,04	0,42			
	0,181	0,10	0,04	0,04	0,42			
	0,179	0,10	0,04	0,04	0,42			
	0,152	0,10	0,04	0,04	0,36			
	0,142	0,10	0,04	0,04	0,33			

Legenda: F<sub>t</sub> - carga máxima aplicada; l - distância entre os apoios da prensa; b - largura do provete; d - espessura do provete; R<sub>t</sub> - resistência à tracção; DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; (-) - ensaio nulo.

Tabela A9.1 - Resultados individuais da resistência à tracção por flexão (Fase 2) - continuação

	<b>F<sub>t</sub> (kN)</b>	<b>l (m)</b>	<b>b (m)</b>	<b>d (m)</b>	<b>R<sub>t</sub> (MPa)</b>	<b>R<sub>t</sub> média (MPa)</b>	<b>DP (MPa)</b>	<b>CV (%)</b>
<b>CICV50<sup>100AE</sup></b>	0,458	0,10	0,04	0,04	1,07	1,06	0,02	2
	0,454	0,10	0,04	0,04	1,06			
	0,462	0,10	0,04	0,04	1,08			
	0,439	0,10	0,04	0,04	1,03			
	0,460	0,10	0,04	0,04	1,08			
	0,441	0,10	0,04	0,04	1,03			
<b>CICV50<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	0,243	0,10	0,04	0,04	0,57	0,57	0,02	4
	0,257	0,10	0,04	0,04	0,60			
	0,238	0,10	0,04	0,04	0,56			
	0,237	0,10	0,04	0,04	0,56			
	0,246	0,10	0,04	0,04	0,58			
	0,230	0,10	0,04	0,04	0,54			
<b>CICV50<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	0,286	0,10	0,04	0,04	0,67	0,63	0,03	5
	0,258	0,10	0,04	0,04	0,60			
	0,267	0,10	0,04	0,04	0,63			
	0,278	0,10	0,04	0,04	0,65			
	0,251	0,10	0,04	0,04	0,59			
	0,274	0,10	0,04	0,04	0,64			
<b>CICV50<sup>100A</sup></b>	0,592	0,10	0,04	0,04	1,39	1,46	0,07	5
	0,588	0,10	0,04	0,04	1,38			
	0,642	0,10	0,04	0,04	1,50			
	0,615	0,10	0,04	0,04	1,44			
	0,647	0,10	0,04	0,04	1,52			
	0,660	0,10	0,04	0,04	1,55			
<b>CICV10CA40<sup>100GC</sup></b>	0,169	0,10	0,04	0,04	0,40	0,36	0,03	10
	0,169	0,10	0,04	0,04	0,40			
	0,151	0,10	0,04	0,04	0,35			
	0,151	0,10	0,04	0,04	0,35			
	0,135	0,10	0,04	0,04	0,32			
	0,138	0,10	0,04	0,04	0,32			
<b>CICV10CA40<sup>100AE</sup></b>	0,420	0,10	0,04	0,04	0,98	0,89	0,07	8
	0,400	0,10	0,04	0,04	0,94			
	0,381	0,10	0,04	0,04	0,89			
	0,340	0,10	0,04	0,04	0,80			
	0,386	0,10	0,04	0,04	0,90			
	0,351	0,10	0,04	0,04	0,82			
<b>CICV10CA40<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	0,203	0,10	0,04	0,04	0,48	0,46	0,03	5
	0,197	0,10	0,04	0,04	0,46			
	0,208	0,10	0,04	0,04	0,49			
	0,192	0,10	0,04	0,04	0,45			
	0,177	0,10	0,04	0,04	0,41			
	0,193	0,10	0,04	0,04	0,45			

Legenda: F<sub>t</sub> - carga máxima aplicada; l - distância entre os apoios da prensa; b - largura do provete; d - espessura do provete; R<sub>t</sub> - resistência à tracção; DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; (-) - ensaio nulo.

Tabela A9.1 - Resultados individuais da resistência à tracção por flexão (Fase 2) - continuação

	<b>F<sub>t</sub> (kN)</b>	<b>l (m)</b>	<b>b (m)</b>	<b>d (m)</b>	<b>R<sub>t</sub> (MPa)</b>	<b>R<sub>t</sub> média (MPa)</b>	<b>DP (MPa)</b>	<b>CV (%)</b>
<b>CICV10CA40<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	0,254	0,10	0,04	0,04	0,60	0,57	0,02	4
	0,258	0,10	0,04	0,04	0,60			
	0,235	0,10	0,04	0,04	0,55			
	0,234	0,10	0,04	0,04	0,55			
	0,243	0,10	0,04	0,04	0,57			
	0,242	0,10	0,04	0,04	0,57			
<b>CICV10CA40<sup>100A</sup></b>	0,362	0,10	0,04	0,04	0,85	0,95	0,09	10
	0,420	0,10	0,04	0,04	0,98			
	0,471	0,10	0,04	0,04	1,10			
	0,397	0,10	0,04	0,04	0,93			
	0,367	0,10	0,04	0,04	0,86			
	0,421	0,10	0,04	0,04	0,99			

Legenda: F<sub>t</sub> - carga máxima aplicada; l - distância entre os apoios da prensa; b - largura do provete; d - espessura do provete; R<sub>t</sub> - resistência à tracção; DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; (-) - ensaio nulo.



## Anexo A10 - Resistência à compressão (Fase 2)

Tabela A10.1 - Resultados individuais da resistência à compressão (Fase 2)

	<b>F<sub>c</sub> (kN)</b>	<b>A<sub>c</sub> (m<sup>2</sup>)</b>	<b>R<sub>c</sub> (MPa)</b>	<b>R<sub>c</sub> média (MPa)</b>	<b>DP (MPa)</b>	<b>CV (%)</b>
<b>CI<sup>100GC</sup></b>	(-)	0,0016	(-)	(-)	(-)	(-)
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
<b>CI<sup>100AE</sup></b>	(-)	0,0016	(-)	(-)	(-)	(-)
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
<b>CI<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	(-)	0,0016	(-)	(-)	(-)	(-)
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
<b>CI<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	(-)	0,0016	(-)	(-)	(-)	(-)
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
<b>CI<sup>100A</sup></b>	18,83	0,0016	11,77	11,93	1,00	8
	17,72	0,0016	11,08			
	16,92	0,0016	10,58			
	20,56	0,0016	12,85			
	19,43	0,0016	12,14			
	21,03	0,0016	13,14			
<b>CICV20<sup>100GC</sup></b>	(-)	0,0016	(-)	(-)	(-)	(-)
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
<b>CICV20<sup>100AE</sup></b>	(-)	0,0016	(-)	(-)	(-)	(-)
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
<b>CICV20<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	(-)	0,0016	(-)	(-)	(-)	(-)
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			

Legenda: F<sub>c</sub> - carga máxima aplicada; A<sub>c</sub> - área comprimida; R<sub>c</sub> - resistência à compressão; DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; (-) - ensaio nulo.

Tabela A10.1 - Resultados individuais da resistência à compressão (Fase 2) - continuação

	<b>F<sub>c</sub> (kN)</b>	<b>A<sub>c</sub> (m<sup>2</sup>)</b>	<b>R<sub>c</sub> (MPa)</b>	<b>R<sub>c</sub> média (MPa)</b>	<b>DP (MPa)</b>	<b>CV (%)</b>
<b>CICV20<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	(-)	0,0016	(-)	(-)	(-)	(-)
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
<b>CICV20<sup>100A</sup></b>	15,31	0,0016	9,57	9,67	0,32	3
	15,15	0,0016	9,47			
	16,50	0,0016	10,31			
	15,16	0,0016	9,48			
	15,24	0,0016	9,53			
	15,46	0,0016	9,66			
<b>CICV35<sup>100GC</sup></b>	(-)	0,0016	(-)	(-)	(-)	(-)
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
<b>CICV35<sup>100AE</sup></b>	(-)	0,0016	(-)	3,73	0,21	6
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
	(-)	0,0016	(-)			
	5,73	0,0016	3,58			
	6,20	0,0016	3,88			
<b>CICV35<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	3,01	0,0016	1,88	1,74	0,20	11
	3,08	0,0016	1,93			
	3,11	0,0016	1,94			
	2,39	0,0016	1,49			
	2,46	0,0016	1,54			
	2,69	0,0016	1,68			
<b>CICV35<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	3,14	0,0016	1,96	2,03	0,09	5
	3,03	0,0016	1,89			
	3,28	0,0016	2,05			
	3,31	0,0016	2,07			
	3,45	0,0016	2,16			
	3,32	0,0016	2,08			
<b>CICV35<sup>100A</sup></b>	11,42	0,0016	7,14	7,07	0,39	6
	10,63	0,0016	6,64			
	12,28	0,0016	7,68			
	11,72	0,0016	7,33			
	11,09	0,0016	6,93			
	10,72	0,0016	6,70			
<b>CICV50<sup>100GC</sup></b>	1,10	0,0016	0,69	0,64	0,04	6
	1,02	0,0016	0,64			
	1,07	0,0016	0,67			
	1,01	0,0016	0,63			
	1,05	0,0016	0,66			
	0,91	0,0016	0,57			

Legenda: F<sub>c</sub> - carga máxima aplicada; A<sub>c</sub> - área comprimida; R<sub>c</sub> - resistência à compressão; DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; (-) - ensaio nulo.

Tabela A10.1 - Resultados individuais da resistência à compressão (Fase 2) - continuação

	<b>F<sub>c</sub> (kN)</b>	<b>A<sub>c</sub> (m<sup>2</sup>)</b>	<b>R<sub>c</sub> (MPa)</b>	<b>R<sub>c</sub> média (MPa)</b>	<b>DP (MPa)</b>	<b>CV (%)</b>
<b>CICV50<sup>100AE</sup></b>	4,01	0,0016	2,51	2,74	0,24	9
	4,85	0,0016	3,03			
	4,80	0,0016	3,00			
	3,96	0,0016	2,48			
	4,39	0,0016	2,74			
	4,30	0,0016	2,69			
<b>CICV50<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	1,75	0,0016	1,09	1,08	0,03	3
	1,73	0,0016	1,08			
	1,69	0,0016	1,06			
	1,73	0,0016	1,08			
	1,83	0,0016	1,14			
	1,68	0,0016	1,05			
<b>CICV50<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	2,18	0,0016	1,36	1,40	0,03	2
	2,23	0,0016	1,39			
	2,30	0,0016	1,44			
	2,25	0,0016	1,41			
	2,20	0,0016	1,38			
	2,32	0,0016	1,45			
<b>CICV50<sup>100A</sup></b>	7,2	0,0016	4,50	4,97	0,33	7
	7,51	0,0016	4,69			
	7,76	0,0016	4,85			
	8,39	0,0016	5,24			
	8,48	0,0016	5,30			
	8,34	0,0016	5,21			
<b>CICV10CA40<sup>100GC</sup></b>	0,99	0,0016	0,62	0,58	0,05	9
	1,06	0,0016	0,66			
	0,89	0,0016	0,56			
	0,92	0,0016	0,58			
	0,86	0,0016	0,54			
	0,86	0,0016	0,54			
<b>CICV10CA40<sup>100AE</sup></b>	3,52	0,0016	2,20	2,13	0,18	8
	3,32	0,0016	2,08			
	3,20	0,0016	2,00			
	3,00	0,0016	1,88			
	3,72	0,0016	2,33			
	3,67	0,0016	2,29			
<b>CICV10CA40<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	1,42	0,0016	0,89	0,82	0,05	6
	1,28	0,0016	0,80			
	1,38	0,0016	0,86			
	1,22	0,0016	0,76			
	1,25	0,0016	0,78			
	1,30	0,0016	0,81			
<b>CICV10CA40<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	1,88	0,0016	1,18	1,14	0,09	8
	1,98	0,0016	1,24			
	1,91	0,0016	1,19			
	1,77	0,0016	1,11			
	1,80	0,0016	1,13			
	1,56	0,0016	0,98			
<b>CICV10CA40<sup>100A</sup></b>	4,58	0,0016	2,86	2,84	0,05	2
	4,58	0,0016	2,86			
	4,62	0,0016	2,89			
	4,43	0,0016	2,77			
	4,6	0,0016	2,88			
	4,5	0,0016	2,81			

Legenda: F<sub>c</sub> - carga máxima aplicada; A<sub>c</sub> - área comprimida; R<sub>c</sub> - resistência à compressão; DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; (-) - ensaio nulo.

## Anexo A11 - Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas (Fase 2)

Tabela A11.1 - Resultados individuais da velocidade de propagação de ultra-sónicas - método directo (Fase 2)

	L (mm)	t <sub>1</sub> (µs)	t <sub>2</sub> (µs)	t <sub>3</sub> (µs)	t médio (µs)	Vus (m/s)	Vus média (m/s)	DP (m/s)	CV (%)
CI <sup>100GC</sup>	160	135,9	135,9	135,7	135,8	1178	1160	13	1
	160	138,1	137,6	137,6	137,8	1161			
	160	136,6	136,7	136,4	136,6	1172			
	160	138,7	138,2	138,7	138,5	1155			
	160	139,6	139,6	139,9	139,7	1145			
	160	139,4	139,2	138,9	139,2	1150			
CI <sup>100AE</sup>	160	67,1	67,1	67,4	67,2	2381	2331	26	1
	160	69,4	68,7	68,7	68,9	2321			
	160	68,4	69,9	69,7	69,3	2308			
	160	69,6	68,1	68,9	68,9	2323			
	160	68,6	68,6	68,1	68,4	2338			
	160	68,7	69,2	69,2	69,0	2318			
CI <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	160	97,6	98,4	98,6	98,2	1629	1648	20	1
	160	97,1	98,2	98,7	98,0	1633			
	160	97,9	97,2	98,7	97,9	1634			
	160	95,4	95,6	95,4	95,5	1676			
	160	96,4	95,6	95,6	95,9	1669			
	160	97,7	97,1	96,6	97,1	1647			
CI <sup>60AE</sup> <sub>40GC</sub>	160	82,1	82,2	81,9	82,1	1950	1963	27	1
	160	80,6	81,1	81,1	80,9	1977			
	160	83,6	83,2	83,2	83,3	1920			
	160	79,9	80,6	79,6	80,0	1999			
	160	81,7	81,4	81,1	81,4	1966			
	160	81,6	80,7	81,9	81,4	1966			
CI <sup>100A</sup>	160	51,9	52,1	52,2	52,1	3073	3131	42	1
	160	51,6	51,2	51,2	51,3	3117			
	160	51,4	51,4	51,1	51,3	3119			
	160	50,2	50,7	50,6	50,5	3168			
	160	50,1	50,2	50,1	50,1	3191			
	160	51,6	51,4	51,1	51,4	3115			
CICV20 <sup>100GC</sup>	160	130,9	131,9	130,6	131,1	1220	1190	18	1
	160	135,4	133,9	134,9	134,7	1188			
	160	136,6	137,9	136,1	136,9	1169			
	160	134,6	133,4	134,2	134,1	1193			
	160	134,4	133,6	134,6	134,2	1192			
	160	135,6	136,6	136,1	136,1	1176			
CICV20 <sup>100AE</sup>	160	71,1	70,9	72,6	71,5	2237	2228	51	2
	160	73,4	74,1	74,6	74,0	2161			
	160	71,4	72,9	71,7	72,0	2222			
	160	69,7	69,1	68,4	69,1	2317			
	160	72,4	72,4	73,1	72,6	2203			
	160	71,6	71,4	72,2	71,7	2230			
CICV20 <sup>60GC</sup> <sub>40AE</sub>	160	97,6	97,6	97,2	97,5	1642	1664	17	1
	160	96,2	95,4	94,6	95,4	1677			
	160	95,4	95,7	96,2	95,8	1671			
	160	96,6	96,9	97,2	96,9	1651			
	160	96,7	96,6	96,4	96,6	1657			
	160	95,2	94,4	95,2	94,9	1685			

Legenda: L - distância percorrida pelas ondas ultra-sónicas; t<sub>i</sub> - tempo que as ondas demoram a percorrer os provetes; Vus - velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas; DP - Desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

Tabela A11.1 - Resultados individuais da velocidade de propagação de ultra-sónicas - método directo  
(Fase 2) - continuação

	L (mm)	t <sub>1</sub> (µs)	t <sub>2</sub> (µs)	t <sub>3</sub> (µs)	t médio (µs)	Vus (m/s)	Vus média (m/s)	DP (m/s)	CV (%)
<b>CICV20<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	160	87,1	87,6	86,9	87,2	1835	1857	51	3
	160	90,2	90,6	91,1	90,6	1765			
	160	84,9	84,9	83,6	84,5	1894			
	160	85,6	85,7	86,9	86,1	1859			
	160	84,7	84,1	84,4	84,4	1896			
	160	85,1	84,6	84,2	84,6	1891			
<b>CICV20<sup>100A</sup></b>	160	55,1	54,7	54,6	54,8	2920	2925	43	1
	160	55,7	55,9	54,9	55,5	2883			
	160	55,1	54,6	54,9	54,9	2916			
	160	54,7	54,1	54,6	54,5	2938			
	160	55,2	55,6	55,2	55,3	2892			
	160	53,6	53,1	53,1	53,3	3004			
<b>CICV35<sup>100GC</sup></b>	160	145,4	145,1	145,4	145,3	1102	1110	10	1
	160	143,7	143,9	143,4	143,7	1114			
	160	144,4	144,2	143,4	143,8	1113			
	160	142,9	143,9	142,9	143,4	1116			
	160	143,4	142,6	143,2	142,9	1120			
	160	147,4	146,2	146,2	146,2	1094			
<b>CICV35<sup>100AE</sup></b>	160	67,6	66,2	66,4	66,3	2413	2324	87	4
	160	70,2	69,7	72,6	71,2	2249			
	160	70,4	70,2	70,2	70,2	2279			
	160	73,1	72,1	72,4	72,3	2215			
	160	67,4	67,1	67,1	67,1	2385			
	160	66,1	66,1	67,1	66,6	2402			
<b>CICV35<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	160	100,7	99,7	99,6	99,7	1606	1618	27	2
	160	99,4	98,4	100,6	99,5	1608			
	160	94,7	95,9	95,4	95,7	1673			
	160	99,7	100,4	99,6	100,0	1600			
	160	98,1	99,4	99,7	99,6	1607			
	160	98,1	99,1	98,9	99,0	1616			
<b>CICV35<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	160	87,6	88,4	88,1	88,3	1813	1831	11	1
	160	87,9	87,4	88,1	87,8	1823			
	160	88,4	86,7	87,9	87,3	1833			
	160	87,1	86,6	86,9	86,8	1844			
	160	86,9	86,4	87,6	87,0	1839			
	160	87,1	87,6	87,1	87,4	1832			
<b>CICV35<sup>100A</sup></b>	160	63,7	63,4	63,7	63,6	2516	2540	16	1
	160	62,6	63,9	63,2	63,2	2530			
	160	63,1	63,1	62,7	63,0	2541			
	160	63,1	62,6	62,6	62,8	2549			
	160	62,9	62,9	63,1	63,0	2541			
	160	62,4	62,4	62,4	62,4	2564			
<b>CICV50<sup>100GC</sup></b>	160	163,9	163,7	163,2	163,5	979	974	19	2
	160	160,1	160,6	161,2	160,9	994			
	160	161,1	161,4	160,4	160,9	994			
	160	165,6	164,4	165,7	165,1	969			
	160	167,7	168,2	168,2	168,2	951			
	160	167,6	167,1	167,7	167,4	956			

Legenda: L - distância percorrida pelas ondas ultra-sónicas; t<sub>i</sub> - tempo que as ondas demoram a percorrer os provetes; Vus - velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas; DP - Desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

Tabela A11.1 - Resultados individuais da velocidade de propagação de ultra-sónicas - método directo (Fase 2) - continuação

	L (mm)	t <sub>1</sub> (µs)	t <sub>2</sub> (µs)	t <sub>3</sub> (µs)	t médio (µs)	Vus (m/s)	Vus média (m/s)	DP (m/s)	CV (%)
<b>CICV50<sup>100AE</sup></b>	160	72,1	71,9	71,6	71,8	2230	2196	39	2
	160	72,1	72,1	71,9	72,0	2222			
	160	73,1	72,1	72,6	72,4	2211			
	160	74,9	75,6	75,2	75,4	2122			
	160	72,6	72,4	73,2	72,8	2198			
	160	72,9	72,9	72,9	72,9	2195			
<b>CICV50<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	160	108,4	107,9	108,9	108,4	1476	1483	24	2
	160	107,2	107,1	106,7	106,9	1497			
	160	105,2	105,6	105,6	105,6	1515			
	160	106,9	107,1	106,7	106,9	1497			
	160	109,7	110,6	110,2	110,4	1449			
	160	109,1	108,9	109,4	109,2	1466			
<b>CICV50<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	160	93,7	94,6	94,9	94,8	1689	1693	13	1
	160	93,2	93,9	93,6	93,8	1707			
	160	95,1	95,4	95,2	95,3	1679			
	160	93,7	93,9	94,1	94,0	1702			
	160	93,7	94,1	93,6	93,9	1705			
	160	95,2	95,9	94,7	95,3	1679			
<b>CICV50<sup>100A</sup></b>	160	69,9	69,1	69,4	69,5	2303	2301	66	3
	160	72,2	72,9	71,9	72,3	2212			
	160	71,7	71,6	71,9	71,7	2230			
	160	68,1	68,7	68,4	68,4	2339			
	160	67,9	68,6	68,1	68,2	2346			
	160	67,6	66,7	67,9	67,4	2374			
<b>CICV10CA40<sup>100GC</sup></b>	160	165,3	164,4	168,2	166,3	962	968	21	2
	160	169,2	168,9	168,1	168,5	950			
	160	157,9	159,6	159,1	159,4	1004			
	160	168,7	168,6	169,4	169,0	947			
	160	169,1	166,1	165,2	165,7	966			
	160	161,4	163,6	163,4	163,5	979			
<b>CICV10CA40<sup>100AE</sup></b>	160	73,9	74,4	74,1	74,3	2155	2132	27	1
	160	74,7	74,7	74,7	74,7	2142			
	160	73,9	73,9	74,2	74,1	2161			
	160	75,9	75,4	75,1	75,3	2126			
	160	77,9	77,1	76,4	76,8	2085			
	160	75,2	75,4	75,2	75,3	2125			
<b>CICV10CA40<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	160	120,6	120,7	122,1	121,4	1318	1287	31	2
	160	121,2	121,2	121,1	121,2	1321			
	160	123,4	123,2	122,7	123,0	1301			
	160	127,1	126,7	126,1	126,4	1266			
	160	126,9	126,2	126,1	126,2	1268			
	160	127,1	128,4	128,2	128,3	1247			
<b>CICV10CA40<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	160	101,7	102,1	102,4	102,3	1565	1573	18	1
	160	101,6	101,1	100,9	101,0	1584			
	160	100,4	101,1	100,7	100,9	1586			
	160	104,1	103,7	103,9	103,8	1541			
	160	101,9	101,4	101,7	101,6	1576			
	160	101,1	101,1	100,6	100,9	1587			
<b>CICV10CA40<sup>100A</sup></b>	160	79,6	79,4	79,6	79,5	2012	2015	28	1
	160	77,6	78,6	78,4	78,2	2046			
	160	79,4	78,9	78,7	79,0	2025			
	160	78,4	79,2	77,9	78,5	2038			
	160	79,4	80,4	79,9	79,9	2003			
	160	80,2	81,7	81,9	81,3	1969			

Legenda: L - distância percorrida pelas ondas ultra-sónicas; t<sub>i</sub> - tempo que as ondas demoram a percorrer os provetes; Vus - velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas; DP - Desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

Tabela A11.2 - Resultados individuais da velocidade de propagação de ultra-sónicas - método indirecto (Fase 2)

	d (mm)	esquerda-direita					direita-esquerda					Vus (m/s)	DP (m/s)	CV (%)
		t <sub>1</sub> (µs)	t <sub>2</sub> (µs)	t <sub>3</sub> (µs)	t médio (µs)	Vus (m/s)	t <sub>1</sub> (µs)	t <sub>2</sub> (µs)	t <sub>3</sub> (µs)	t médio (µs)	Vus (m/s)			
CI <sup>100GC</sup>	60	23,4	23,4	23,4	23,4	2564	25,6	25,4	25,4	25,5	2356	1745	460	26
	120	81,7	81,1	81,2	81,3	1475	83	83,4	83,6	83,3	1440			
	180	122,7	122,1	122,9	122,6	1469	136,1	137,1	137,4	136,9	1315			
	240	143,6	142,7	143,2	143,2	1676	144	143,7	144,1	143,9	1667			
CI <sup>100AE</sup>	60	11,9	12,4	12,4	12,2	4905	14,4	14,4	14,4	14,4	4167	3244	855	26
	120	36,6	36,7	36,7	36,7	3273	39,6	39,9	40,2	39,9	3008			
	180	72,7	72,2	72,3	72,4	2486	65,7	65,6	65,6	65,6	2743			
	240	89,4	89,7	89,4	89,5	2682	89,1	89,1	89,4	89,2	2691			
CI <sup>100A</sup>	60	9,4	8,9	8,9	9,1	6618	11,4	11,4	11,4	11,4	5263	3999	1290	32
	120	31,2	31,4	30,7	31,1	3859	38,9	38,9	38,9	38,9	3085			
	180	49,6	49,4	48,9	49,3	3651	60,4	60,6	60,4	60,5	2977			
	240	68,7	68,4	68,6	68,6	3500	79,2	78,9	78,9	79,0	3038			
CICV20 <sup>100GC</sup>	60	20,9	20,9	20,9	20,9	2871	42,2	42,2	42,1	42,2	1423	1617	525	32
	120	83,1	83,2	83,2	83,2	1443	104,4	104,4	104,7	104,5	1148			
	180	122,9	122,7	121,9	122,5	1469	126,4	126,7	125,9	126,3	1425			
	240	157,9	157,9	158,1	158,0	1519	146,4	145,7	146,6	146,2	1641			
CICV20 <sup>100AE</sup>	60	12,4	11,9	11,9	12,1	4972	16,9	17,9	17,4	17,4	3448	3140	813	26
	120	36,2	36,6	36,4	36,4	3297	48,4	47,7	47,9	48,0	2500			
	180	69,7	69,4	69,1	69,4	2594	62,4	61,7	61,4	61,8	2911			
	240	88,6	87,9	89,4	88,6	2708	89,1	89,1	89,4	89,2	2691			
CICV20 <sup>100A</sup>	60	12,9	12,4	11,9	12,4	4839	10,9	10,9	10,9	10,9	5505	3877	822	21
	120	33,9	34,2	33,9	34,0	3529	33,7	33,7	33,7	33,7	3561			
	180	53,4	53,1	53,2	53,2	3381	52,6	52,4	52,1	52,4	3437			
	240	71,6	70,9	71,2	71,2	3369	71,1	70,7	70,4	70,7	3393			

Legenda: d - distância percorrida pelas ondas ultra-sónicas; t<sub>i</sub> - tempo de propagação; Vus - velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas; DP - Desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

Tabela A11.2 - Resultados individuais da velocidade de propagação de ultra-sónicas - método indirecto (Fase 2) - continuação

<b>CICV50<sup>100GC</sup></b>	60	20,9	20,9	21,4	21,1	2848	37,4	36,9	37,1	37,1	1616	1297	682	53
	120	143,9	143,6	143,7	143,7	835	155,4	155,7	155,4	155,5	772			
	180	167,7	167,7	167,9	167,8	1073	174,1	174,1	172,4	173,5	1037			
	240	188,4	188,4	188,7	188,5	1273	260	260	259	259,7	924			
<b>CICV50<sup>100AE</sup></b>	60	15,4	15,4	14,4	15,1	3982	20,4	19,4	20,4	19,9	3015	2518	676	27
	120	47,2	46,9	46,9	47,0	2553	55,9	57,6	55,6	56,6	2120			
	180	82,7	82,4	82,2	82,4	2184	86,7	87,1	88,1	87,6	2055			
	240	112,1	111,9	112,1	112,0	2142	114,7	115,1	114,7	114,9	2089			
<b>CICV50<sup>100A</sup></b>	60	16,9	15,9	13,4	15,4	3896	13,9	13,4	13,4	13,4	4478	3004	808	27
	120	57,9	58,4	57,9	58,1	2067	37,6	37,6	37,6	37,6	3191			
	180	68,7	68,1	68,4	68,4	2632	72,4	72,4	72,4	72,4	2486			
	240	87,7	87,9	87,2	87,6	2740	94,4	94,4	94,6	94,5	2540			
<b>CICV10CA40<sup>100GC</sup></b>	60	22,4	22,4	22,4	22,4	2679	26,2	26,2	26,6	26,4	2273	1555	597	38
	120	120,6	121,1	120,4	120,7	994	106,2	106,4	106,2	106,3	1129			
	180	145,4	146,6	145,1	145,7	1235	143,9	143,4	143,9	143,7	1253			
	240	167,9	168,1	168,2	168,1	1428	164,9	164,7	165,9	165,3	1452			
<b>CICV10CA40<sup>100AE</sup></b>	60	13,9	13,9	13,9	13,9	4317	20,4	20,4	20,4	20,4	2941	2554	776	30
	120	55,9	55,9	55,4	55,7	2153	63,6	64,2	63,9	64,1	1874			
	180	78,4	76,6	76,9	77,3	2329	86,1	86,1	85,9	86,0	2093			
	240	101,4	101,2	101,2	101,3	2370	101,4	101,4	102,1	101,8	2359			
<b>CICV10CA40<sup>100A</sup></b>	60	18,4	17,4	17,9	17,9	3352	12,9	12,9	12,9	12,9	4651	2800	828	30
	120	45,7	45,6	45,7	45,7	2628	53,4	53,4	54,1	53,8	2233			
	180	76,6	77,2	76,4	76,7	2346	78,4	79,1	79,1	79,1	2276			
	240	96,9	96,7	96,9	96,8	2478	98,9	98,4	98,7	98,6	2435			

Legenda: d - distância percorrida pelas ondas ultra-sónicas; t<sub>i</sub> - tempo de propagação; V<sub>us</sub> - velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas; DP - Desvio padrão; CV - coeficiente de variação.



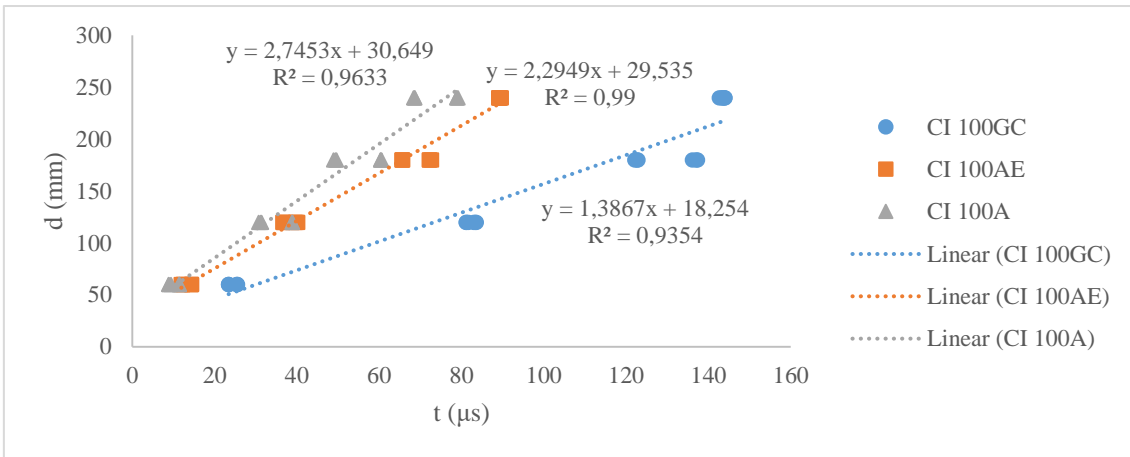


Figura A11.45 - Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas das argamassas CI (método das dromocrónicas)

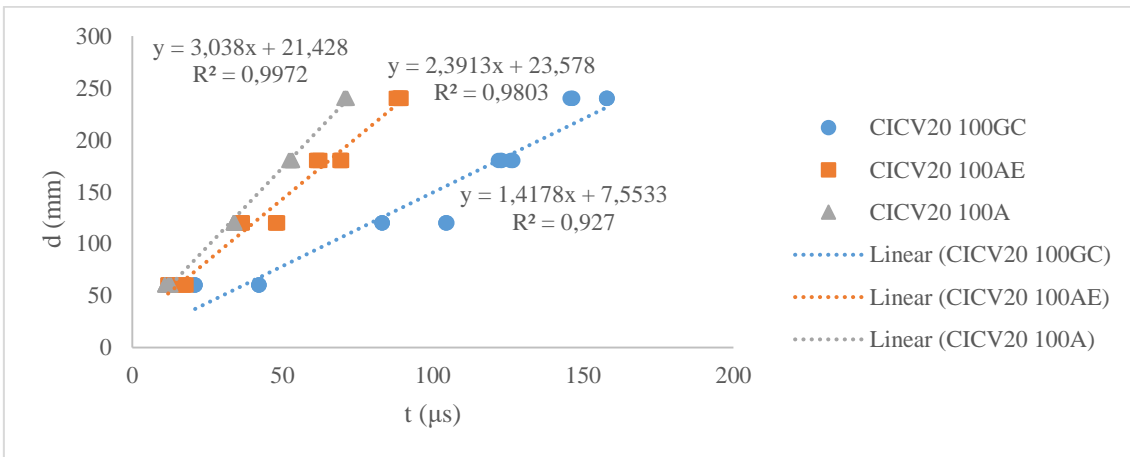


Figura A11.46 - Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas das argamassas CICV20 (método das dromocrónicas)

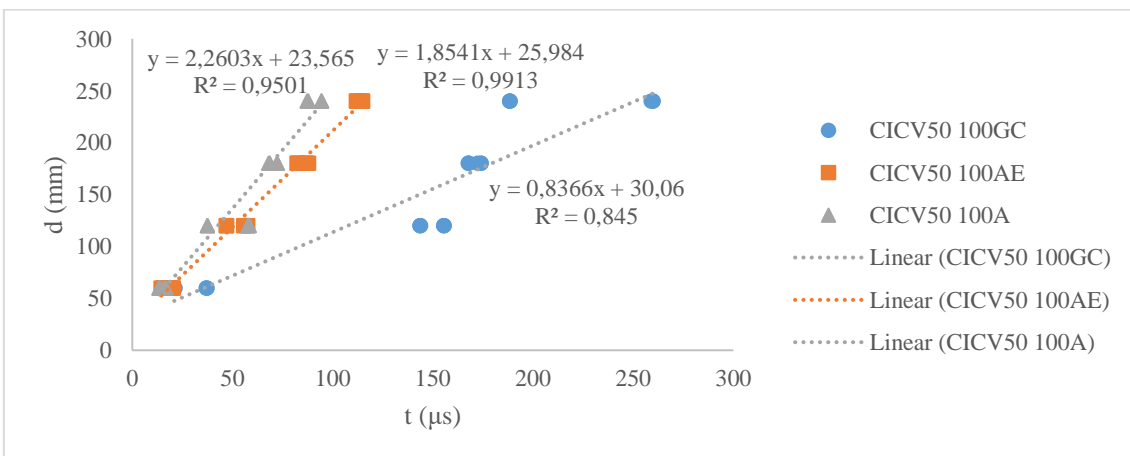


Figura A11.47 - Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas das argamassas CICV50 (método das dromocrónicas)

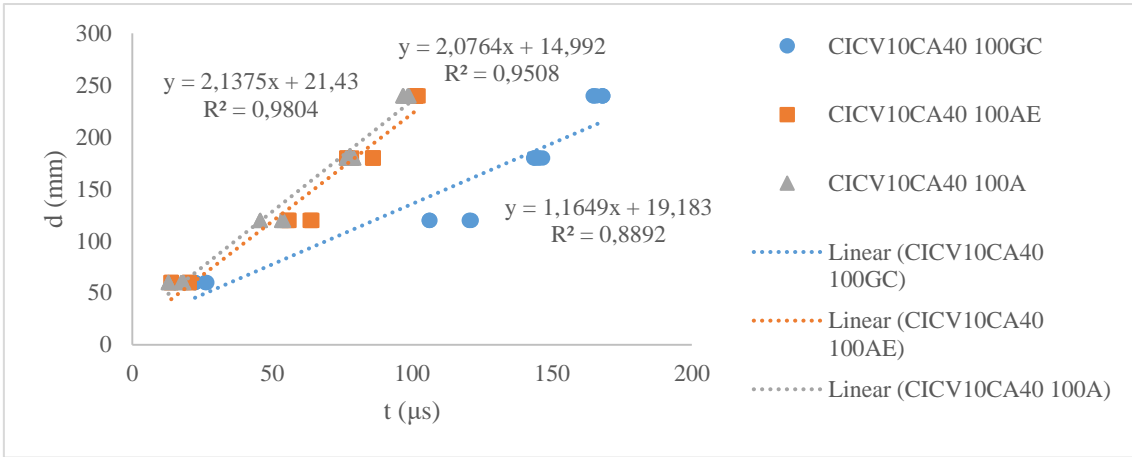


Figura A11.48 - Velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas das argamassas CICV10CA40 (método das dromocrónicas)

## Anexo A12 - Ensaio de arrancamento por tracção (Fase 2)

Tabela A12.1 - Resultados individuais do ensaio de arrancamento por tracção

	Carote 1			Carote 2			Carote 3			f <sub>u</sub> média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
	F <sub>u</sub> (kN)	f <sub>u</sub> (MPa)	Tipo rotura	F <sub>u</sub> (kN)	f <sub>u</sub> (MPa)	Tipo rotura	F <sub>u</sub> (kN)	f <sub>u</sub> (MPa)	Tipo rotura			
<b>CI<sup>100GC</sup></b>	0,10	0,06	a	0,21	0,13	a	0,23	0,15	a	0,11	0,05	41
<b>CI<sup>100AE</sup></b>	0,14	0,09	a	0,15	0,10	a	(-)	(-)	(-)	0,09	0,01	7
<b>CI<sup>100A</sup></b>	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
<b>CICV20<sup>100GC</sup></b>	0,05	0,03	a	0,04	0,02	a	0,04	0,03	a	0,03	0,00	15
<b>CICV20<sup>100AE</sup></b>	0,34	0,21	a	0,51	0,32	a	0,56	0,35	a	0,29	0,07	25
<b>CICV20<sup>100A</sup></b>	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	1,04	0,65	a	0,65	0,00	0
<b>CICV50<sup>100GC</sup></b>	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
<b>CICV50<sup>100AE</sup></b>	0,18	0,11	a	0,14	0,09	b	0,06	0,04	b	0,08	0,04	47
<b>CICV50<sup>100A</sup></b>	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
<b>CICV10CA40<sup>100GC</sup></b>	0,15	0,09	b	0,05	0,03	b	0,18	0,11	b	0,08	0,04	54
<b>CICV10CA40<sup>100AE</sup></b>	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0,05	0,03	a	0,03	0,00	0
<b>CICV10CA40<sup>100A</sup></b>	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)

Legenda: F<sub>u</sub> - força de arrancamento; f<sub>u</sub> - tensão de aderência; DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; (-) - ensaio nulo.

## Anexo A13 - Índice esclerométrico (Fase 2)

Tabela A13.1 - Resultados individuais para o índice esclerométrico

	IE		IE médio	DP	CV (%)
<b>CI<sup>100GC</sup></b>	70	72	71	1	2
<b>CI<sup>100AE</sup></b>	65	67	66	1	2
<b>CI<sup>100A</sup></b>	101	105	103	3	3
<b>CICV20<sup>100GC</sup></b>	88	89	89	1	1
<b>CICV20<sup>100AE</sup></b>	82	80	81	1	2
<b>CICV20<sup>100A</sup></b>	108	105	107	2	2
<b>CICV50<sup>100GC</sup></b>	92	91	92	1	1
<b>CICV50<sup>100AE</sup></b>	76	81	79	4	5
<b>CICV50<sup>100A</sup></b>	95	89	92	4	5
<b>CICV10CA40<sup>100GC</sup></b>	91	99	95	6	6
<b>CICV10CA40<sup>100AE</sup></b>	79	77	78	1	2
<b>CICV10CA40<sup>100A</sup></b>	84	85	85	1	1

Legenda: IE - índice esclerométrico; DP - Desvio padrão; CV - coeficiente de variação

## Anexo A14 - Permeabilidade à água líquida sob baixa pressão - tubo de *Karsten* (Fase 2)

Tabela A14.1 - Resultados individuais do ensaio de permeabilidade à água líquida sob baixa pressão

Tempo (min)	Volume de água absorvido (cm <sup>3</sup> )						Média (cm <sup>3</sup> )	DP (cm <sup>3</sup> )	CV (%)	C <sub>A</sub> (kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0.5</sup> )
	5	10	15	30	60	Total				
CI <sup>100GC</sup>	0,60	0,50	0,30	0,90	1,40	3,70	4,2	1,7	40	0,94
	1,60	0,70	0,60	1,30	1,80	6,00				
	0,60	0,35	0,25	0,60	1,00	2,80				
CI <sup>100AE</sup>	1,60	0,90	0,60	1,40	1,45	5,95	9,8	3,3	34	2,22
	3,20	1,60	0,95	2,45	3,50	11,70				
	2,70	2,00	1,55	2,60	2,90	11,75				
CI <sup>100A</sup>	0,90	0,60	0,60	1,60	2,80	6,50	6,3	0,3	5	1,43
	0,80	0,60	0,50	1,40	2,60	5,90				
	0,90	0,60	0,60	1,50	2,90	6,50				
CICV20 <sup>100GC</sup>	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	12,2	0,0	0	2,76
	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)				
	2,00	1,00	0,80	1,80	6,60	12,20				
CICV20 <sup>100AE</sup>	1,20	0,55	0,45	0,90	1,30	4,40	5,5	1,6	28	1,25
	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)				
	0,60	0,80	0,80	1,80	2,60	6,60				
CICV20 <sup>100A</sup>	1,10	0,75	0,65	2,00	3,80	8,30	5,9	3,2	54	1,34
	0,70	0,50	0,45	1,40	2,60	5,65				
	0,60	0,40	0,40	0,90	1,50	3,80				
CICV50 <sup>100GC</sup>	7,80	3,50	2,40	5,00	6,20	24,90	20,9	3,8	18	4,74
	5,20	3,40	1,60	3,40	3,70	17,30				
	3,80	2,90	2,60	5,20	6,10	20,60				
CICV50 <sup>100AE</sup>	0,70	0,75	0,80	1,65	2,80	6,70	4,2	2,2	51	0,96
	0,45	0,30	0,40	0,70	1,00	2,85				
	0,50	0,30	0,30	0,80	1,20	3,10				
CICV50 <sup>100A</sup>	2,30	2,00	2,00	13,90	3,60	23,80	30,4	5,7	19	6,89
	3,70	2,90	2,80	20,70	3,50	33,60				
	3,85	2,90	2,85	20,50	3,70	33,80				
CICV10CA40 <sup>100GC</sup>	1,60	1,80	1,60	4,30	7,20	16,50	14,6	1,8	12	3,31
	1,90	1,40	1,65	3,10	4,90	12,95				
	1,90	1,50	1,40	3,60	6,00	14,40				
CICV10CA40 <sup>100AE</sup>	1,10	0,80	0,70	2,00	3,90	8,50	7,6	1,8	23	1,72
	1,10	0,80	0,75	2,10	4,00	8,75				
	0,85	0,50	0,50	1,30	2,40	5,55				
CICV10CA40 <sup>100A</sup>	2,30	2,00	1,90	5,30	9,70	21,20	26,1	4,3	16	5,91
	2,90	2,60	2,50	7,00	12,90	27,90				
	3,30	2,70	2,60	7,30	13,30	29,20				

Legenda: C<sub>A</sub> - coeficiente de absorção de água sob baixa pressão; DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; (-) - ensaio nulo.

## Anexo A15 - Coeficiente de condutibilidade térmica (Fase 2)

Tabela A15.1 - Resultados individuais do ensaio de condutibilidade térmica (Fase 2)

	$\lambda_{28d}$ (W/m.K)	$\lambda_{28d}$ médio (W/m.K)	$\lambda_{seco}$ (W/m.K)	$\lambda_{seco}$ médio (W/m.K)	$\lambda_{tijolo}$ (W/m.K)	$\lambda_{tijolo}$ médio (W/m.K)
<b>CI<sup>100GC</sup></b>	0,0978	0,099	0,0863	0,087	0,0797	0,084
	0,0968		0,0858		0,0830	
	0,1009		0,0884		0,0884	
	0,0997		0,0864		n/a	
<b>CI<sup>100AE</sup></b>	0,1992	0,198	0,1731	0,174	0,1447	0,148
	0,2011		0,1758		0,1434	
	0,1965		0,1734		0,1572	
	0,1964		0,1718		n/a	
<b>CI<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	0,1389	0,138	0,1210	0,119	n/a	n/a
	0,1366		0,1172		n/a	
	0,1401		0,1216		n/a	
	0,1371		0,1173		n/a	
<b>CI<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	0,1682	0,167	0,1408	0,141	n/a	n/a
	0,1684		0,1396		n/a	
	0,1659		0,1396		n/a	
	0,1664		0,1423		n/a	
<b>CI<sup>100A</sup></b>	1,6128	1,636	1,3862	1,466	1,2860	1,267
	1,6679		1,5476		1,2327	
	1,6285		1,4673		1,2817	
	1,6336		1,4633		n/a	
<b>CICV20<sup>100GC</sup></b>	0,0905	0,091	0,0796	0,081	0,0790	0,083
	0,0907		0,0815		0,0841	
	0,0914		0,0801		0,0857	
	0,0896		0,0813		n/a	
<b>CICV20<sup>100AE</sup></b>	0,1889	0,184	0,1707	0,167	0,1665	0,168
	0,1818		0,1658		0,1523	
	0,1941		0,1696		0,1848	
	0,1711		0,1620		n/a	
<b>CICV20<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	0,1291	0,128	0,1170	0,117	n/a	n/a
	0,1294		0,1175		n/a	
	0,1286		0,1173		n/a	
	0,1231		0,1173		n/a	
<b>CICV20<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	0,1498	0,151	0,1385	0,140	n/a	n/a
	0,1507		0,1395		n/a	
	0,1494		0,1384		n/a	
	0,1524		0,1419		n/a	
<b>CICV20<sup>100A</sup></b>	1,5841	1,575	1,4767	1,461	0,7670	0,818
	1,5381		1,4354		0,9148	
	1,6009		1,4426		0,7708	
	1,5787		1,4899		n/a	
<b>CICV35<sup>100GC</sup></b>	0,0862	0,084	0,0759	0,075	n/a	n/a
	0,0865		0,0775		n/a	
	0,0849		0,0758		n/a	
	0,0798		0,0723		n/a	
<b>CICV35<sup>100AE</sup></b>	0,1703	0,168	0,1556	0,152	n/a	n/a
	0,1676		0,1562		n/a	
	0,1640		0,1525		n/a	
	0,1682		0,145		n/a	

Legenda:  $\lambda_{28d}$  - coeficiente de condutibilidade térmica aos 28 dias;  $\lambda_{seco}$  - coeficiente de condutibilidade térmica em provetes secos;  $\lambda_{tijolo}$  - coeficiente de condutibilidade térmica em argamassas aplicadas em tijolo; n/a - não aplicável.

Tabela A15.1 - Resultados individuais do ensaio de condutibilidade térmica (Fase 2) - continuação

	$\lambda_{28d}$ (W/m.K)	$\lambda_{28d}$ médio (W/m.K)	$\lambda_{seco}$ (W/m.K)	$\lambda_{seco}$ médio (W/m.K)	$\lambda_{tijolo}$ (W/m.K)	$\lambda_{tijolo}$ médio (W/m.K)
<b>CICV35<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	0,1219	0,121	0,1167	0,111	n/a	n/a
	0,1202		0,1089		n/a	
	0,1220		0,1089		n/a	
	0,1204		0,1080		n/a	
<b>CICV35<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	0,1364	0,133	0,1250	0,123	n/a	n/a
	0,1302		0,1216		n/a	
	0,1320		0,1222		n/a	
	0,1324		0,1226		n/a	
<b>CICV35<sup>100A</sup></b>	1,3972	1,354	1,3646	1,319	n/a	n/a
	1,3229		1,2533		n/a	
	1,4013		1,3469		n/a	
	1,2943		1,3123		n/a	
<b>CICV50<sup>100GC</sup></b>	0,0803	0,080	0,0733	0,075	0,0647	0,066
	0,0797		0,0745		0,0670	
	0,0804		0,0761		0,0671	
	0,0804		0,0753		n/a	
<b>CICV50<sup>100AE</sup></b>	0,1581	0,155	0,1394	0,144	0,1264	0,126
	0,1565		0,1415		0,1224	
	0,1521		0,1528		0,1278	
	0,1534		0,1416		n/a	
<b>CICV50<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	0,1058	0,108	0,1037	0,106	n/a	n/a
	0,1067		0,1039		n/a	
	0,1097		0,1064		n/a	
	0,1110		0,1085		n/a	
<b>CICV50<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	0,1278	0,126	0,1223	0,119	n/a	n/a
	0,1231		0,1181		n/a	
	0,1269		0,1157		n/a	
	0,1245		0,1196		n/a	
<b>CICV50<sup>100A</sup></b>	1,2108	1,171	1,1165	1,079	1,0397	0,995
	1,1743		1,1543		1,0187	
	1,2070		1,0854		0,9270	
	1,0914		0,9615		n/a	
<b>CICV10CA40<sup>100GC</sup></b>	0,0784	0,079	0,0714	0,072	0,0864	0,087
	0,0814		0,0749		0,0869	
	0,0774		0,0707		0,0884	
	0,0778		0,0723		n/a	
<b>CICV10CA40<sup>100AE</sup></b>	0,1723	0,168	0,1627	0,154	0,1390	0,138
	0,1678		0,1478		0,1397	
	0,1654		0,1488		0,1359	
	0,1666		0,156		n/a	
<b>CICV10CA40<sup>60GC</sup><sub>40AE</sub></b>	0,1127	0,113	0,1067	0,107	n/a	n/a
	0,1125		0,1070		n/a	
	0,1147		0,1081		n/a	
	0,1130		0,1079		n/a	
<b>CICV10CA40<sup>60AE</sup><sub>40GC</sub></b>	0,1299	0,130	0,1211	0,123	n/a	n/a
	0,1278		0,1218		n/a	
	0,1312		0,1242		n/a	
	0,1293		0,1235		n/a	
<b>CICV10CA40<sup>100A</sup></b>	1,0401	1,076	1,0069	1,012	0,7336	0,771
	1,1439		1,0811		0,7448	
	1,0533		0,9598		0,8344	
	1,0659		1,0011		n/a	

Legenda:  $\lambda_{28d}$  - coeficiente de condutibilidade térmica aos 28 dias;  $\lambda_{seco}$  - coeficiente de condutibilidade térmica em provetes secos;  $\lambda_{tijolo}$  - coeficiente de condutibilidade térmica em argamassas aplicadas em tijolo; n/a - não aplicável.