



TÉCNICO
LISBOA

Caracterização experimental de argamassas térmicas a temperaturas elevadas

Manuel António Mendonça da Cunha Pereira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em:

Engenharia Civil

Orientadores:

Prof.^a Dr.^a Inês dos Santos Flores Barbosa Colen

Prof. Dr. João Pedro Ramôa Ribeiro Correia

Júri:

Presidente: Prof. Dr. Augusto Martins Gomes

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

Vogal: Prof.^a Dr.^a Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues

Outubro 2016

*“Sê todo em cada coisa. Põe quanto és
no mínimo que fazes.”*

(Fernando Pessoa)

Agradecimentos

A realização deste trabalho, com muito esforço e dedicação, marca o final de um ciclo de aprendizagem e auto-conhecimento. Este processo só foi possível graças à colaboração e encorajamento de uma vasta lista de pessoas e amigos, a quem passo a agradecer.

À Professora Inês Flores-Colen e ao Professor João Râmoa Correia, orientadores científicos desta dissertação, pela informação e conhecimentos partilhados, pela disponibilidade sempre demonstrada, pelo rigor e eficácia na análise de resultados e revisão da dissertação, e acima de tudo, por todo o incentivo, motivação e confiança demonstrados ao longo do trabalho, especialmente na fase final.

Ao Eng. António Soares, bolsheiro de investigação no IST, pela paciência e disponibilidade constantes, e por todos os conhecimentos partilhados ao longo de todo o trabalho.

Ao Sr. Leonel Silva e ao Sr. João Lopes, técnicos do Laboratório de Construção do IST, por todo o apoio prestado na realização dos ensaios desta dissertação.

Às empresas Weber, Secil, Diasen, Amorim e Argex pelo fornecimento dos materiais utilizados neste trabalho.

À FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia), pelo financiamento do projecto de investigação FCT PTDC/ECM/11826/2010 NANORENDER – *Performance of sílica nanoaerogel – based renders*, em que esta dissertação se enquadrou.

A toda a minha família e amigos, em especial aos meus pais e irmãos, pela ajuda, motivação e constante apoio ao longo desta etapa, contribuindo sempre da melhor forma para a minha formação universitária e pessoal.

Por último, um agradecimento especial à Rosarinho por toda a força, paciência e carinho incondicionais demonstrados em todas as fases, em especial nas mais difíceis.

Resumo

Recentemente, a preocupação com a redução do impacto ambiental e o aumento do conforto térmico têm assumido uma relevância cada vez maior na concepção e construção de edifícios. Os novos regulamentos nacionais para edifícios (o REH, entre outros) têm impulsionado a utilização de novas tecnologias para a produção de novos materiais e sistemas de revestimento, capazes de garantir um elevado desempenho térmico, sem comprometer a sua resistência mecânica. Entre estas soluções, incluem-se as argamassas térmicas, obtidas através da incorporação de agregados isolantes. Para algumas aplicações (industriais) ou situações de acidente (incêndios), é importante avaliar a capacidade destas argamassas manterem as suas características quando expostas a temperaturas elevadas.

O objectivo deste estudo consistiu na caracterização do comportamento físico e mecânico de argamassas térmicas com incorporação de agregados isolantes (argila expandida, granulado de cortiça expandida e aerogel de sílica) quando submetidas a temperaturas elevadas. Para tal, foram produzidas em laboratório sete argamassas (três argamassas térmicas, uma argamassa de referência e três argamassas de areia com adjuvantes), que foram expostas a temperaturas de 20 °C a 250 °C numa câmara térmica.

Foram realizados diversos ensaios, antes e após a exposição térmica, para avaliar as seguintes propriedades: massa volúmica aparente (estado fresco e endurecido), velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, módulo de elasticidade dinâmico, módulo de torção, coeficiente de *Poisson*, resistência à compressão e condutibilidade térmica. Foi analisada a influência da temperatura no desempenho das argamassas e foi efectuado um estudo comparativo sobre a variação das diferentes propriedades.

Os resultados obtidos mostram que a exposição a temperaturas elevadas provoca, de uma forma geral, uma redução da resistência mecânica, nomeadamente para as argamassas de aerogel e de areia com adjuvantes na sua constituição. Por outro lado, o bom desempenho térmico das argamassas manteve-se (ou melhorou) após a exposição a temperaturas elevadas.

Palavras-chave

Argamassa térmica; agregado isolante; aerogel; temperatura elevada; comportamento mecânico e físico

Abstract

Recently, the concern with the reduction of the environmental impact and the increase of thermal comfort have been assuming an increasing relevance in the design and construction of buildings. The new portuguese regulation for buildings (REH, among others) have boosted the use of new technologies for the production of new materials and coating systems able to ensure a high thermal performance, without compromising their mechanical strength. Among these solutions are the thermal mortars obtained through the incorporation of insulating aggregates. It is also important that this type of mortars can keep its properties even when exposed to high temperatures, particularly when exposed to accidents (such as a fire), or in service conditions, for certain industrial applications.

This study aims to characterize the physical and mechanical behavior of thermal mortars incorporating insulating aggregates (expanded clay, granulated cork and silica aerogel) when exposed to high temperatures. For this, seven mortars were produced in the laboratory (three thermal mortars, one reference mortar and three sand mortars with admixtures) and exposed to high temperatures in a thermal chamber.

For this purpose, bulk density (fresh and hardened state), ultrasonic pulse velocity, dynamic elasticity modulus, dynamic shear modulus and *Poisson* coefficient, compressive strength and thermal conductivity tests were performed. Finally, a comparative study was made between the results of these various properties.

In general, the exposure to high temperatures caused a loss of mechanical resistance, namely for aerogel and sand mortars, both with admixtures. The good thermal performance of the mortars remained (or even improved) after the exposure to high temperatures.

Keywords

Thermal mortar; insulating aggregate; high temperature; mechanical behaviour; thermal performance

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice de figuras	x
Índice de tabelas	xiii
Abreviaturas	xv
Simbologia	xv
Argamassas	xv
Alfabeto latino	xvi
1. Introdução	1
1.1. Considerações gerais	1
1.2. Objectivos e metodologia da dissertação.....	2
1.3. Estrutura e organização da dissertação	2
2. Estado da arte	3
2.1. Considerações gerais	3
2.2. Classificação das argamassas.....	3
2.3. Constituintes das argamassas.....	4
2.3.1. Ligantes	4
2.3.2. Agregados pétreos.....	5
2.3.3. Água	5
2.3.4. Adjuvantes e adições	6
2.3.5. Agregados isolantes.....	8
2.4. Argamassas térmicas	12
2.4.1. Revestimentos de desempenho térmico melhorado	12
2.4.2. Características das argamassas de desempenho térmico melhorado.....	13
2.5. Estudos sobre argamassas	14
2.5.1. Argamassas térmicas	14
2.5.2. Argamassas cimentícias expostas a temperaturas elevadas	17
2.6. Síntese do capítulo	18
3. Caracterização do trabalho experimental	21
3.1. Considerações iniciais	21

3.2. Formulação das argamassas.....	21
3.3. Caracterização dos materiais constituintes das argamassas.....	23
3.3.1. Cimento	23
3.3.2. Areia.....	23
3.3.3. Agregados leves.....	23
3.3.3. Adjuvantes	25
3.4. Produção das argamassas.....	25
3.5. Provetes	26
3.6. Ensaio realizado no estado fresco	28
3.6.1. Consistência por espalhamento	28
3.6.2. Massa volúmica aparente no estado fresco.....	29
3.7. Exposição a temperaturas elevadas.....	30
3.8. Ensaio realizado em estado endurecido	31
3.8.1. Massa volúmica aparente no estado endurecido.....	31
3.8.2. Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas.....	32
3.8.3. Módulo de elasticidade dinâmico, módulo de torção e coeficiente de <i>Poisson</i>	33
3.6.4. Propriedades mecânicas estáticas	35
3.6.5. Condutibilidade térmica	36
3.7. Síntese do capítulo.....	37
4. Apresentação e discussão dos resultados.....	39
4.1. Considerações gerais	39
4.2. Caracterização das argamassas no estado fresco	39
4.2.1. Massa volúmica aparente.....	39
4.2.2. Consistência por espalhamento	41
4.3. Observações visuais durante e após a exposição a temperaturas elevadas.....	42
4.4. Caracterização das argamassas no estado endurecido	43
4.4.1. Massa volúmica aparente no estado endurecido.....	43
4.4.2. Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas.....	46
4.4.3. Módulos de elasticidade e de torção dinâmicos e coeficiente de <i>Poisson</i>	51
4.4.6 Resistência à compressão	64
4.4.7. Coeficiente de condutibilidade térmica	69
4.4. Conclusão do capítulo.....	74

5. Conclusões e desenvolvimentos futuros	75
5.1. Considerações finais	75
5.2. Conclusões finais	75
5.3. Propostas de desenvolvimentos futuros.....	77
Referências bibliográficas	79
Anexos.....	I
Anexo A.1. Produção das argamassas	II
Anexo A.2. Massa volúmica em estado endurecido	III
Anexo A.3. Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas	VI
Anexo A.4. Módulo de elasticidade dinâmico, módulo de torção dinâmico e coeficiente de <i>Poisson</i>	IX
Anexo A.5. Resistência à compressão	XIV
Anexo A.6. Condutibilidade térmica	XVII

Índice de figuras

Figura 2.1 - Granulado de cortiça expandida (à esq.); aglomerado de cortiça (à dta.) (W1, 2015)	9
Figura 2.2 - Agregados de argila expandida com 2 a 3 mm de diâmetro (Asdrubali & Horoshenkov, 2002)	10
Figura 2.3 - Agregado de aerogel de sílica (W2, 2012)	11
Figura 3.1 - Molde de 3 provetes prismáticos de 160x40x40mm (à esq.); molde com 4 provetes cilíndricos de diâmetro 60 mm e espessura 20 mm (à dta.)	22
Figura 3.2 - Argila expandida (à esq.); granulado de cortiça expandida (ao centro); aerogel (à dta.)	24
Figura 3.3 - Peneiração dos agregados	24
Figura 3.4 - introdutores de ar em pó (à esq.); éter de celulose em pó (ao centro); resina líquida com água (à dta.)	25
Figura 3.5 - Adição de introdutores de ar à argamassa de aerogel (à esq.); amassadura da argamassa de aerogel (ao centro); segregação visível da argamassa com 10% de resina na fase de moldagem dos provetes (à dta.)	26
Figura 3.6 - Esquema dos provetes cilíndricos (à esq.); exemplo de dois provetes cilíndricos (E^{CT} e C^{AERO}) (à dta.)	27
Figura 3.7 - Esquema dos provetes prismáticos (à esq.); compactação das argamassas com pilão metálico (ao centro); compactação mecânica das argamassas (à dta.)	28
Figura 3.8 - Colocação da argamassa no molde troncocónico (à esq.); compactação da argamassa com o pilão (ao centro); aplicação de 15 pancadas na mesa de espalhamento (à dta.)	29
Figura 3.9 - Enchimento de recipiente com a argamassa para determinação da massa volúmica	30
Figura 3.10 - Equipamento Tinius Olsen Environmental Chamber antes e durante o ensaio (à esq. e ao centro); estrutura metálica construída para suporte dos provetes durante exposição a temperaturas elevadas (à dta.)	31
Figura 3.11 - Curvas de exposição térmica definidas na câmara térmica para cada temperatura-alvo	31
Figura 3.12 - Equipamento Pundit Lab+ (à esq.); aplicação de material de contacto nos transdutores (ao centro); medição do tempo de propagação das ondas ultra-sónicas (à dta.)	32
Figura 3.13 - Equipamento GrindoSonic MK5 (à esq.); ensaio para a obtenção da frequência de vibração à flexão (ao centro); ensaio para a obtenção da frequência de vibração à torção (à dta.)	33
Figura 3.14 - Esquema do ensaio à tração por flexão (EN 1015-11 (CEN, 1999)) (à esq.); ensaio de resistência à flexão por tracção (ao centro e à dta.)	36
Figura 3.15 - Ensaio de resistência à compressão	36
Figura 3.16 - Equipamento ISOMET 2114 utilizado para ensaio de condutibilidade térmica	37
Figura 4.1 - Massa volúmica no estado fresco das argamassas em estudo (à esq.); variação (em %) da massa volúmica no estado fresco relativamente à argamassa D^{ref}	40
Figura 4.2 - Condensações no interior da câmara térmica aquando do ensaio (à esq.); escurecimento dos provetes após submetidos à temperatura de 250 °C (à dta.)	43

Figura 4.3 – Massa volúmica aparente em estado endurecido das argamassas térmicas (em cima); variação (em %) da massa volúmica aparente em estado endurecido das argamassas térmicas submetidas a temperaturas elevadas relativamente à temperatura de controlo, 20 °C (em baixo)	45
Figura 4.4 – Massa volúmica aparente em estado endurecido das argamassas com agregado de areia (em cima); variação (em %) da massa volúmica aparente em estado endurecido das argamassas com agregado de areia submetidas a temperaturas elevadas relativamente à temperatura de controlo, 20 °C (em baixo)	46
Figura 4.5 – Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas das argamassas térmicas (em cima); variação (em %) da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas das argamassas térmicas submetidas a temperaturas elevadas relativamente à temperatura de controlo, 20 °C (em baixo).....	49
Figura 4.6 – Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas das argamassas com agregado de areia (em cima); variação (em %) da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas das argamassas com agregado de areia submetidas a temperaturas elevadas relativamente à temperatura de controlo, 20 °C (em baixo)	50
Figura 4.7 – Relação entre a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas e a massa volúmica no estado endurecido para as diferentes temperaturas-alvo	51
Figura 4.8 – Relação entre os valores do módulo de elasticidade dinâmico calculados através da norma ASTM E1876-01 e através do software Genemod para as diferentes temperaturas-alvo.....	52
Figura 4.9 – Módulo de elasticidade dinâmico em estado endurecido das argamassas térmicas (em cima); variação (em %) do módulo de elasticidade dinâmico em estado endurecido das argamassas térmicas submetidas a temperaturas elevadas relativamente à temperatura de controlo, 20 °C (em baixo).....	55
Figura 4.10 – Módulo de elasticidade dinâmico em estado endurecido das argamassas com agregado de areia (em cima); variação (em %) do módulo de elasticidade dinâmico em estado endurecido das argamassas com agregado de areia submetidas a temperaturas elevadas relativamente à temperatura de controlo, 20 °C (em baixo).....	56
Figura 4.11 – Relação entre a massa volúmica e módulo de elasticidade dinâmico para as diferentes temperaturas-alvo.....	57
Figura 4.12 – Relação entre a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas e módulo de elasticidade dinâmico para as diferentes temperaturas-alvo.....	58
Figura 4.13 – Relação entre os valores do módulo de torção dinâmico e o módulo de elasticidade dinâmico para as diferentes temperaturas-alvo	59
Figura 4.14 – Variação (em %) do coeficiente de Poisson no estado endurecido das argamassas térmicas submetidas a temperaturas elevadas relativamente à temperatura de controlo, 20 °C	60
Figura 4.15 – Variação (em %) do coeficiente de Poisson no estado endurecido das argamassas com agregado de areia a temperaturas elevadas relativamente à temperatura de controlo, 20 °C	60
Figura 4.16 – Relação entre o módulo de elasticidade dinâmico obtido experimentalmente e o calculado a partir da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas para as diferentes temperaturas-alvo	62
Figura 4.17 – Resistência à compressão das argamassas térmicas (em cima); variação (em %) da resistência à compressão das argamassas térmicas submetidas a temperaturas elevadas relativamente à temperatura de controlo, 20 °C (em baixo)	66
Figura 4.18 – Resistência à compressão das argamassas com agregado de areia (em cima); variação (em %) da resistência à compressão das argamassas com agregado de areia submetidas a temperaturas elevadas relativamente à temperatura de controlo, 20 °C (em baixo)	67
Figura 4.19 – Relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica em estado endurecido para as diferentes temperaturas-alvo	68

Figura 4.20 – Relação entre a resistência à compressão e a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas para as diferentes temperaturas-alvo.....	68
Figura 4.21 – Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dinâmico para as diferentes temperaturas-alvo	69
Figura 4.22 – Condutibilidade térmica das argamassas (em cima); variação (em %) da condutibilidade térmica das argamassas submetidas a temperaturas elevadas relativamente à temperatura de controlo, 20 °C (em baixo)	71
Figura 4.23 – Relação entre a condutibilidade térmica e a massa volúmica aparente para as diferentes temperaturas-alvo.....	72
Figura 4.24 – Relação entre a condutibilidade térmica e a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas para as diferentes temperaturas-alvo	72
Figura 4.25 – Relação entre a condutibilidade térmica e o módulo de elasticidade dinâmico para as diferentes temperaturas-alvo	73
Figura 4.26 – Relação entre a condutibilidade térmica e a resistência à compressão para as diferentes temperaturas-alvo.....	73
Figura A.1.1- Misturadora vibratória.....	II
Figura A.4.1 - Relação entre os valores do módulo de torção dinâmico calculados através da norma ASTM E1876-01 e através do software <i>Genemod</i> para as diferentes temperaturas-alvo	XIII

Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Requisitos para argamassas térmicas no estado endurecido (EN 998-1, CEN 2010)	14
Tabela 2.2 - Características das argamassas estudadas por Soares et al. (2015) e Silva et al. (2015)	15
Tabela 3.1 – Composição das argamassas tradicionais	22
Tabela 3.2 – Distribuição granulométrica da curva utilizada (% de volume)	24
Tabela 3.3 – Baridade média dos agregados constituintes das argamassas tradicionais	25
Tabela 3.4 – Relação entre a massa volúmica e o espalhamento segundo a EN 1015-2 (CEN, 1998)	29
Tabela 3.5 – Número de provetes ensaiados no estado endurecido para as várias temperaturas	38
Tabela 4.1 – Massa volúmica aparente no estado fresco	39
Tabela 4.2 – Valores de espalhamento obtidos	42
Tabela 4.3 – Massa volúmica no estado endurecido das argamassas produzidas	44
Tabela 4.4 – Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas	47
Tabela 4.5 – Módulo de elasticidade dinâmico	53
Tabela 4.6 – Coeficiente médio de <i>Poisson</i>	61
Tabela 4.7 – Módulo de elasticidade dinâmico obtido experimentalmente e calculado a partir da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas	63
Tabela 4.8 – Resistência à compressão	65
Tabela 4.9 – Valores médios do coeficiente de condutibilidade térmica	69
Tabela A.2.1- Resultados individuais da massa volúmica aparente no estado endurecido	III
Tabela A.3.1- Resultados individuais da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas	VI
Tabela A.4.1 - Resultados individuais das frequências de ressonância	IX
Tabela A.5.1 - Resultados individuais da resistência à compressão experimental	XIV
Tabela A.6.1 - Valores individuais do coeficiente de condutibilidade térmica das argamassas estudadas	XVII

Abreviaturas

APFAC – Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas de Construção

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*

IST – Instituto Superior Técnico

ITeCons – Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

REH – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

Simbologia

Argamassas

A^{AE} - Argamassa com agregado de argila expandida

B^{GC} - Argamassa com agregado de granulado de cortiça

C^{AERO} - Argamassa com agregado de aerogel

D^{ref} - Argamassa com agregado de areia

E^{CT} - Argamassa com agregado de areia com adição de éter de celulose e introdutores de ar

F^{5%res} - Argamassa com agregado de areia com adição de 5% de resina líquida

G^{10%res} - Argamassa com agregado de areia com adição de 10% de resina líquida

Alfabeto latino

E_d – módulo de elasticidade dinâmico

G_d – módulo de torção dinâmico

m – massa

MV – massa volúmica

R_c – resistência à compressão

V – volume

V_m – velocidade média de propagação das ondas ultra-sónicas

Alfabeto grego

λ – condutibilidade térmica

ν – coeficiente de *Poisson*

1. Introdução

1.1. Considerações gerais

As argamassas, como elementos de revestimento, constituem uma parte determinante da envolvente dos edifícios e do seu desempenho. São os elementos mais expostos, quer às acções das intempéries, quer às acções mecânicas, pelo que se espera que sejam capazes de proteger os paramentos contra agentes agressivos, conferir características de planeza e regularidade, proporcionar uma fácil limpeza e manutenção e, também, que sejam capazes de contribuir para a uma maior resistência à água.

Nos dias correntes, as exigências de conforto térmico e eficiência energética têm adquirido um papel cada vez mais relevante na concepção e construção dos edifícios. O Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), que entrou em vigor em 2013, é um exemplo de legislação com o objectivo de impor requisitos de conforto térmico na construção, garantindo um desperdício de energia tão reduzido quanto possível.

A importância que as questões energéticas têm assumido, nomeadamente em relação ao comportamento térmico dos edifícios, tem vindo a impor uma procura crescente por materiais de desempenho térmico melhorado e com uma adequada resistência mecânica. Desta forma, surgem as argamassas de desempenho térmico melhorado, obtidas através da substituição do agregado corrente de areia por agregados com características isolantes. São soluções de revestimento que permitem a garantia de uma reduzida condutibilidade térmica, tentando comprometer ao mínimo as suas características mecânicas e de durabilidade.

Este tipo de argamassas tem na sua constituição agregados leves relativamente comuns no sector da construção, como é o caso da cortiça e da argila expandida. No entanto, a tendência é o aparecimento de novos materiais, como é o caso do aerogel de sílica, cuja aplicação em argamassas é recente.

Em certas aplicações (por exemplo, em algumas indústrias, como as centrais de energia), as argamassas de revestimento podem ser sujeitas a condições de serviço que incluam temperaturas elevadas. Por outro lado, em aplicações correntes, existe a possibilidade da ocorrência de acidentes, tais como incêndios (entre outros), que provocam o aumento rápido de temperatura. Neste contexto, torna-se importante conhecer o desempenho deste tipo de argamassas a nível térmico e mecânico após exposição a temperaturas elevadas, sendo esta uma situação ainda pouco estudada na literatura técnico-científica.

O trabalho apresentado nesta dissertação, de índole essencialmente experimental, está inserido num projecto de investigação financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), intitulado *NANORENDER – Performance of Silica Nanoaerogel-Based Renders*, cujo objectivo consiste no estudo do comportamento do aerogel de sílica e das suas aplicações em argamassas de revestimentos de paredes, nomeadamente aquando da exposição a temperaturas elevadas.

1.2. Objectivos e metodologia da dissertação

O objectivo da presente dissertação é caracterizar experimentalmente o comportamento físico e mecânico das argamassas de desempenho térmico melhorado quando submetidas a temperaturas elevadas, tendo em conta os estudos existentes sobre este tipo de argamassas. Assim, os principais objectivos a alcançar seguindo a metodologia descrita, são os seguintes:

- analisar a influência da incorporação de agregados isolantes (argila expandida, granulado de cortiça expandida e aerogel de sílica) e de adjuvantes (resina líquida, éter de celulose e tensioactivos) na constituição de argamassas térmicas;
- estudar a influência da exposição a temperaturas elevadas nas diferentes argamassas, ao nível do seu comportamento físico e mecânico;
- comparar os comportamentos das diferentes argamassas e perceber quais as características de desempenho e correlações entre os parâmetros mais afectados com a exposição a temperaturas elevadas.

1.3. Estrutura e organização da dissertação

A presente dissertação está organizada em 5 capítulos, para além das referências bibliográficas e anexos, nomeadamente os seguintes: introdução, estado da arte, caracterização experimental, apresentação e discussão de resultados, e conclusão e desenvolvimentos futuros.

No capítulo 1 é feito um enquadramento e introdução ao tema no contexto da engenharia civil, e são apresentados os objectivos e a estrutura da dissertação.

No capítulo 2 é apresentada uma síntese do desempenho das argamassas de revestimento, são descritos os seus principais constituintes, são apresentadas as características das argamassas térmicas, e é feito um pequeno resumo de estudos anteriormente realizados sobre argamassas térmicas e argamassas expostas a temperaturas elevadas.

No capítulo 3 é descrito o trabalho experimental, desde a composição das argamassas produzidas à descrição dos ensaios efectuados.

No capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios, sendo feita a respectiva discussão.

Por último, no capítulo 5 apresenta-se as principais conclusões do trabalho realizado nesta dissertação, sendo também apresentadas propostas para desenvolvimentos futuros, tendo em conta os resultados obtidos.

No fim do documento apresentam-se as referências bibliográficas e, em anexo, incluem-se resultados individuais de ensaios realizados na campanha experimental.

2. Estado da arte

2.1. Considerações gerais

No presente capítulo, de revisão do estado da arte, apresenta-se uma visão global sobre argamassas leves e com desempenho térmico melhorado, devido à incorporação de agregados com estas características. As características e requisitos deste tipo de argamassas são apresentadas, assim como os materiais da sua constituição (agregados e adjuvantes), com especial relevo para os utilizados no âmbito da campanha experimental realizada nesta dissertação. São também indicados alguns estudos sobre as argamassas de desempenho térmico melhorado e a sua caracterização, estudos sobre os agregados resultantes da aplicação da nanotecnologia e sobre o efeito da exposição de argamassas a temperaturas elevadas.

2.2. Classificação das argamassas

As argamassas utilizadas na indústria da construção consistem numa mistura de água e areia natural agregada por um ligante, sendo os ligantes mais usados em Portugal a cal aérea, a cal hidráulica e o cimento *Portland*. Existem várias aplicações para argamassas, destacando-se as seguintes: revestimento de paredes e tectos, enchimento e reparação de juntas, assentamento de alvenarias, assentamento de ladrilhos e azulejos, assentamento de placas de pedra, betonilhas e assentamento de tubagens, execução de remates e acabamentos e reparações (Recena, 2008).

A qualidade de uma argamassa não está apenas inerente ao seu traço, sendo também influenciada pelas características dos seus constituintes. É por isso necessário um bom conhecimento sobre esses constituintes de forma a garantir as características específicas pretendidas para a argamassa a produzir.

O traço de uma argamassa traduz-se pela proporção dos componentes relativamente ao ligante. É normalmente calculado em massa, convertendo-se o traço em volume, mais facilmente utilizável em construção civil (Lourenci, 2003).

De forma a garantir um bom desempenho das argamassas de revestimento, deve-se assegurar que estas são *"adequadas à base onde são aplicadas; ter resistência mecânica suficiente; serem relativamente deformáveis, de modo a absorverem deformações naturais a que uma estrutura está sujeita; ter impermeabilidade suficiente; um bom comportamento aos sais; garantir um bom acabamento ao paramento revestido e conceber uma aparência estética agradável"* (Appleton, 2003, citado por Melo, 2014).

As argamassas podem ser tradicionais, quando produzidas em obra, ou industriais, quando produzidas em unidades fabris.

Quanto às argamassas tradicionais, quando estas possuem forte teor de ligante, têm também uma boa trabalhabilidade, boa aderência ao suporte, boa compacidade, mas elevada tendência para a fissuração devido a retracção. Já as argamassas com baixa dosagem de ligante tornam o revestimento demasiado poroso e com reduzida aderência ao suporte (Recena, 2008).

Para a aplicação das argamassas em obra, é necessário o transporte e o armazenamento das matérias

primas no local onde serão fabricadas e aplicadas *in situ*. Por serem produzidas no momento, é necessário afectar mão-de-obra exclusivamente para a actividade de doseamento de matérias-primas e preparação das argamassas, o que torna difícil garantir a similaridade e qualidade das argamassas (devido à dificuldade na quantificação das matérias-primas introduzidas na mistura). Assim, o método tradicional de produção de argamassas *in situ* constitui um dos factores responsáveis pelos problemas inerentes à qualidade das argamassas. Já as argamassas industriais, por serem obtidas através de um processo controlado, em que se estuda o doseamento e a mistura das várias matérias-primas, permitem uma maior garantia de qualidade das matérias primas e das argamassas, diminuem a possibilidade de ocorrência de erros humanos e permitem um maior controlo da operação (APFAC, 2005).

Como nota final, salienta-se o facto de as condições de habitabilidade das construções serem influenciadas pela qualidade dos revestimentos. Estes contribuem em termos funcionais para a estabilidade, a segurança contra incêndios, a higiene, a economia de energia (directamente relacionada com o desempenho térmico do edificado), a protecção contra o ruído e ainda para o desempenho estético (Monteiro, 2008).

2.3. Constituintes das argamassas

Uma argamassa hidráulica é constituída por um ligante mineral hidráulico e que possui a capacidade de endurecer na presença de água (também pode ter na sua constituição um ligante aéreo, como a cal aérea). Dentro das argamassas, estas podem possuir na sua constituição um só ligante ou mais de um ligante inorgânico, sendo estas últimas denominadas por argamassas bastardas (Pinto, 2006). Os constituintes fundamentais da mistura de uma argamassa hidráulica são os ligantes hidráulicos, os agregados pétreos e a água. As argamassas podem ter na sua constituição outros constituintes, tal como os adjuvantes e as adições, com a função de alterar e/ou melhorar as suas propriedades, tanto no estado fresco como no estado endurecido (Paiva *et al.*, 2007).

Devido à evolução do processo de fabrico industrializado dos ligantes hidráulicos, da cal hidráulica e do cimento, a sua utilização aumentou progressivamente. Assim, destaca-se a utilização das cais para as obras de reconstrução e reabilitação, e o cimento como o ligante mais utilizado nas construções novas, devido em grande parte à sua elevada resistência mecânica (Gomes *et al.*, 2005).

Para a execução de uma argamassa deve-se analisar o(s) ligante(s) utilizado(s), o traço da argamassa, a granulometria e a natureza dos agregados, bem como a trabalhabilidade pretendida (Gomes *et al.*, 2005).

2.3.1. Ligantes

Um ligante é uma substância com capacidades aglutinantes, permitindo a ligação entre as partículas constituintes de uma argamassa e garantindo a sua aderência ao suporte. Os ligantes devem garantir que as argamassas apresentem estabilidade, quando em contacto com o meio ambiente (Lourenço, 2009). Os ligantes mais utilizados nas argamassas para revestimentos são o cimento, a cal aérea e as cais com

propriedades hidráulicas. Em certo tipo de acabamentos interiores também se utiliza o gesso como ligante (Faria, 2012). Os ligantes apresentam-se sob a forma de pó fino, sendo os hidráulicos capazes de ganhar presa e endurecer através de reacções de hidratação, ou seja, desencadeadas através do contacto do ligante com a água (Martins, 2010).

O cimento mais utilizado é o cimento de tipo *Portland*, composto na sua maioria por clínquer e produzido a partir de marga calcária entre temperaturas de 1300 a 1500 °C. Em Portugal, o tipo de cimento com uso predominante é o *Portland* composto, existindo, outros tipos de cimento, tal como o *Portland* normal, o *Portland* branco, o cimento de alto-forno e o cimento pozolânico, em que uma pequena parte do clínquer é substituída por pozolanas (Faria, 2012; Veiga, 1998). A norma EN 197-1 (CEN, 2011), referente ao cimento, apresenta as composições dos diferentes tipos de cimentos correntes, as suas especificações e critérios de conformidade, os requisitos mecânicos, físicos e químicos e as classes de resistência e de durabilidade.

2.3.2. Agregados pétreos

Os agregados são materiais granulares, com misturas de partículas de vários tamanhos na sua constituição, que não intervêm na reacção de endurecimento das argamassas, mas que funcionam como "esqueleto" da argamassa, aumentando a sua resistência à compressão e compacidade e melhorando a permeabilidade ao vapor de água e a resistência a ciclos gelo-degelo. Os agregados são normalmente o constituinte maioritário de uma argamassa, com contribuição para a diminuição da retracção e da quantidade de ligante (Veiga, 1998; Bauer, 2000).

No caso das argamassas, o agregado pétreo mais utilizado é a areia. Deve ter uma dimensão compreendida entre 0,063 mm e 4 mm. Trata-se de um material granular obtido através da desagregação natural ou da britagem de rochas (Martins, 2010; IPQ, 2010) Em Portugal, são geralmente utilizadas areias naturais, extraídas do leito dos rios ou de areiros, de natureza siliciosa, calcária ou argilosa (Veiga, 1998).

De forma a reduzir a tendência para a fendilhação, devem utilizar-se areias grossas, enquanto que para reduzir a porosidade e a absorção de água devem utilizar-se areias finas. As argamassas com areias finas exigem maiores quantidades de água para a mesma trabalhabilidade (Martins, 2010; Botas, 2009).

Relativamente à sua composição, as areias são constituídas predominantemente por quartzo que, tratando-se de um mineral frequentemente presente na maioria das rochas granulares, pela sua dureza, durabilidade e insolubilidade é um componente desejável nos agregados finos. A contribuição dos agregados para o bom desempenho da argamassa torna-se mais eficaz, caso estejam isentos de sais ou matéria orgânica na sua constituição (Coutinho, 1973).

2.3.3. Água

A água é um elemento fundamental na formulação das argamassas, sendo responsável por promover as reacções de hidratação, desencadeando as propriedades aglutinantes do ligante. A água de amassadura

deve encontrar-se limpa e isenta de impurezas, especialmente de sais, de forma a não comprometer o desempenho da argamassa por degradação acelerada (Lourenço, 2009).

A relação água/cimento (a/c) calculada determina a quantidade de água a utilizar numa amassadura. Esta relação deve ser criteriosamente calculada, pois tem influência no desempenho da argamassa no seu estado fresco, ao nível da trabalhabilidade, aderência ao suporte e facilidade de aplicação, e também no estado endurecido, ao nível da porosidade, absorção de água, retracção de secagem, resistência mecânica, entre outras propriedades (Coutinho, 1973).

2.3.4. Adjuvantes e adições

Os adjuvantes e adições começaram a ser utilizados na Antiguidade de forma a melhorar as características das argamassas e dos betões.

Os adjuvantes são substâncias adicionadas durante a amassadura, com percentagens inferiores a 5% da massa do ligante, com o objectivo de modificar certas propriedades dos betões e argamassas, no estado fresco ou no estado endurecido (LNEC, 1996).

São na sua maioria substâncias orgânicas ou, por vezes, inorgânicas, capazes de modificar as propriedades químicas da mistura, tal como o tempo de presa, a trabalhabilidade ou a permeabilidade à água. Os adjuvantes mais utilizados em argamassas de reboco são os plastificantes, os promotores de aderência, os introdutores de ar, os fungicidas e os hidrófugos (Veiga, 1998; LNEC, 1996).

As adições são materiais orgânicos ou inorgânicos em pó, que são adicionados com o objectivo de melhorar as propriedades físicas das argamassas, tais como a resistência mecânica, o módulo de elasticidade, a ductilidade, o comportamento aos sulfatos e as reacções sílica/agregados, entre outros. São utilizadas normalmente fibras, cargas leves e pozolanas (Veiga, 1998; LNEC 1996).

Nesta campanha experimental foram utilizados os seguintes adjuvantes, descritos nos parágrafos seguintes: (i) retentores de água, (ii) introdutores de ar; e (iii) uma resina sintética.

i) Retentores de água

Os retentores de água, sob a forma de derivados celulósicos, são polímeros orgânicos utilizados em betões e argamassas correntes como agentes espessantes. Estes adjuvantes retêm a água no interior da argamassa até à reacção de presa, tornando esta reacção mais gradual e completa, o que resulta num aumento de viscosidade e coesão. Produzem um efeito vantajoso, pois permitem reduzir a segregação dos constituintes e melhorar a própria homogeneidade do produto endurecido. Para permitir o aumento da quantidade de retentores de água, é necessário também acrescentar um plastificante à mistura, de modo a garantir uma boa consistência e evitar perdas de resistência à compressão (Patural *et al.*, 2011; Paiva *et al.*, 2007).

O retentor de água utilizado nesta dissertação foi o éter de celulose, devido às características das moléculas que o constituem (polissacarídeos), que actuam como estabilizantes durante o processo de retenção. Há autores que consideram que estas moléculas podem ser responsáveis pelo atraso na

hidratação do cimento (Patural *et al.*, 2011; Petit & Wirquin, 2013). É possível utilizar éter de celulose em argamassas leves numa proporção de 0,05% a 1% da massa total da mistura (Nunes & Jacinto, 2011).

ii) Introdutores de ar

Os introdutores de ar são substâncias, normalmente orgânicas, que são capazes de modificar a tensão superficial da água. São formados por moléculas anfipáticas, ou seja, com uma parte hidrófuga (região apolar) e uma parte hidrófila (região polar). Os tensoactivos são adjuvantes capazes de reduzir a quantidade de água de amassadura (plastificantes) e de introduzir ar na mistura, sendo que o mesmo produto pode servir ambas as funções (Coutinho, 1973).

Como função de plastificante, os tensoactivos dispersam as partículas de cimento na fase aquosa da argamassa, aumentando a sua superfície específica e, conseqüentemente, facilitando a sua hidratação. Têm a finalidade de aumentar a trabalhabilidade, pois permitem reduzir a quantidade de água de amassadura, e eventualmente de ligante, levando a uma menor relação a/c e a uma menor retracção das argamassas; têm também o efeito de reduzir a permeabilidade das argamassas (Coutinho, 1973; Veiga, 1998).

A introdução de ar na mistura irá, por outro lado, permitir transformar os vazios que se formam normalmente durante a mistura em bolhas de ar esféricas, fechadas, de diâmetros entre 10 nm a 1 mm. É um processo que funciona como um corte da capilaridade, traduzindo-se numa diminuição da permeabilidade e conseqüente impermeabilização da argamassa, aumentando a resistência aos ciclos gelo-degelo e, no caso de utilização em betões, uma maior resistência aos sulfatos. O módulo de elasticidade e a massa volúmica reduzem-se, melhorando o comportamento à retracção, mas reduzindo a resistência à tracção e à compressão. A granulometria do ligante e dos agregados, bem como a relação a/c e o tempo de amassadura, influenciam a dosagem óptima de tensoactivos (Coutinho, 1973; Veiga, 1988).

iii) Resina sintética

Este tipo de adjuvantes funciona como agente ligante e é utilizado em argamassas e betões. Consistem em emulsões sintéticas normalmente fabricadas a partir de polímeros e copolímeros orgânicos. Estes polímeros incluem polivinil, acrílicos e estirenos, que podem ser combinados. Em relação à sua resistência à temperatura, as resinas de alto desempenho apresentam uma temperatura de ebulição de 100 °C. Há variados produtos e aplicações no mercado, desde a função de tapa-juntas, reparação de elementos de betão, caldas cimentícias ou promotores de aderência (Gambhir, 2004; LNEC, 1996).

Ao adicionar as resinas à mistura, a água é consumida na reacção de hidratação do cimento, enquanto a resina faz a ligação entre os agregados, complementando assim a função do cimento e conferindo uma maior resistência à argamassa. As resinas facilitam também a ligação entre agregados muito heterogéneos ou de baridades muito diferentes (Gambhir, 2004; Elsen, 2005). Por outro lado, podem também melhorar as propriedades das argamassas térmicas; Fu & Chung (1997) verificaram que a condutibilidade térmica de materiais cimentícios decresce com a introdução de resinas de látex e celulose.

2.3.5. Agregados isolantes

No caso das argamassas de desempenho térmico melhorado, a areia como agregado é substituída parcial ou integralmente por agregados com características isolantes térmicas. Num agregado isolante a “relação resistência térmica/espessura é significativamente superior à que pode ser obtida com os materiais de construção correntes” (Labrincha *et al.*, 2006). Assim, estes materiais devem apresentar uma proporção de matéria sólida (condutora de calor) tão baixa quanto possível, ou seja, a sua porosidade deve ser elevada; com efeito, os isolantes mais eficazes são aqueles que apresentam uma estrutura celular fechada com células de dimensões reduzidas e preenchidas por um gás de baixa condutibilidade térmica. Segundo as normas EN 13055-1 (2002) e EN 206-1 (2000), os agregados com baridade inferior a 1200 kg/m³ podem ser considerados como agregados leves, sendo geralmente utilizados para reduzir a massa volúmica de betões e argamassas e melhorar as suas características térmicas e acústicas. É importante referir que nem sempre se consegue encontrar um equilíbrio entre o desempenho térmico e o desempenho acústico, não resultando necessariamente das características dos materiais, mas da sua concepção e aplicação (Labrincha *et al.*, 2006; Soares *et al.*, 2015).

A sustentabilidade ecológica e o custo também devem ser tidos em conta. Existe uma preocupação crescente na indústria da construção relativamente ao aproveitamento de materiais residuais e provenientes de outras indústrias, como é o caso da cortiça (Brás *et al.*, 2012), ou produzidos com o objectivo específico de melhorar o desempenho dos produtos já existentes, como é o caso do aerogel.

Nesta campanha experimental foram utilizados os seguintes agregados isolantes, descritos nos parágrafos seguintes: (i) granulado de cortiça expandida; (ii) argila expandida; e (iii) aerogel de sílica.

i) Granulado de cortiça expandida

A cortiça é extraída da casca do sobreiro (*Quercus suber L*) sob a forma de pranchas semi-tubulares, com espessura adequada para o seu processamento industrial (Brás *et al.*, 2012). Pode-se aproveitar este material sob a forma de granulados e aglomerados de cortiça (figura 2.1), para uma grande variedade de usos na construção, dos quais, um dos mais importantes é o isolamento térmico e acústico, sendo também utilizados para isolamentos para equipamentos pesados, isolamentos vibráticos e em juntas de dilatação (Carvalho *et al.*, 2012; Gil, 2007).

Devido à sustentabilidade da produção de cortiça e por ser um recurso com bastante exploração em Portugal, torna-se um produto razoavelmente económico. No que respeita à estrutura da cortiça, esta é um material alveolar, cujas membranas celulares são quase impermeáveis, estando cheias de um gás semelhante ao ar, ocupando 85% a 90% do seu volume total, conferindo a este material boas propriedades de isolamento. Possui um conjunto de características únicas quando em comparação com outros produtos da natureza, destacando-se as seguintes: elasticidade e impermeabilidade a líquidos e gases, leveza, isolamento eléctrico, absorção acústica, boa capacidade de absorção e dissipação de energia (aumentando a capacidade de deformação e, por conseguinte, apresentando um módulo de elasticidade reduzido), inocuidade, imputrescibilidade, capacidade de compressão praticamente sem expansão lateral, boa resistência ao fogo, estabilidade química e biológica, reduzida condutibilidade térmica (entre 0,035 e

0,070 W/m.K) e massa volúmica média de 100 a 200 kg/m³ (Martins, 2010; Alves, 2010; Gil, 2007; Nóvoa *et al.*, 2004; Fortes *et al.*, 2004).

Dá-se o nome de granulado cortiça expandida aos fragmentos de cortiça de dimensões entre 0,25 e 22,4 mm, de acordo com a norma NP 114 (IPQ, 2002). Este tipo de granulados (ou regranulados) de cortiça, utilizam-se normalmente como isolamento térmico no enchimento de espaços vazios entre paredes, tectos e coberturas, em pavimentos flutuantes e também na preparação de argamassas e betões leves com o intuito de reduzir o peso dos elementos da construção e para garantir um bom isolamento térmico. O regranulado de cortiça caracteriza-se, para além da granulometria referida, por uma massa volúmica de 70 a 80 kg/m³ e por um coeficiente de condutibilidade térmica de 0,048 W/mK. Contém um teor de humidade que deve ser inferior a 10% e um teor em pó inferior a 0,4% (Gil, 2007; Fortes *et al.*, 2004). A sua temperatura máxima de utilização é cerca de 140 °C, de forma a garantir a não ocorrência de problemas de degradação, de deformação ou de alteração irreversível de propriedades; no entanto, a sua constituição permite a exposição a temperaturas superiores às indicadas, facto que permite suportar sem dano a aplicação de betumes em fusão, utilizados na colagem de sistemas de impermeabilização (Belgas da Costa, 2011; W1, 2015)

A introdução de granulado de cortiça expandida em betões e argamassas, como substituição da areia, altera as suas características no estado fresco e endurecido, melhorando o seu comportamento térmico e a sua massa volúmica, mas piorando o seu comportamento mecânico. A reduzida massa volúmica da cortiça mas também a sua interacção com o processo de hidratação do cimento são responsáveis pela alteração das propriedades mecânicas (Panesar & Shindman, 2012).

Devido à capacidade de deformação da cortiça, esta será responsável pela formulação de argamassas com um módulo de elasticidade dinâmico inferior, ou seja, com uma capacidade de deformação superior na rotura, quando comparadas com argamassas de areia (Leal, 2012; Fortes *et al.*, 2004)



Figura 2.1 - Granulado de cortiça expandida (à esq.); aglomerado de cortiça (à dta.) (W1, 2015)

ii) Argila expandida

A argila é utilizada como material de construção há séculos, em grande parte devido à sua elevada disponibilidade na natureza (Kalhori *et al.*, 2013), sendo que só mais recentemente é que se tem aproveitado as suas propriedades para a produção de argila expandida.

Os agregados de argila expandida (figura 2.2) são um material de massa volúmica reduzida (300 a 700 kg/m³), altamente poroso, de pH neutro e elevada resistência térmica (até 1000 °C) (Moravia, 2006), com uma resistência mecânica relativamente elevada, com uma boa estabilidade física e química e com um custo reduzido, constituindo, assim, um material muito vantajoso na construção (Bartolini *et al.*, 2010;

Vašina *et al.*, 2006), sendo utilizados tanto em betões como em argamassas.

Este material isolante é produzido através da cozedura a temperaturas elevadas (cerca de 1000 a 1250 °C) de grânulos de argila previamente formados por moldagem ou fragmentação. Ao longo deste processo, os gases libertam-se causando a formação de poros no interior do material. A gama de temperaturas utilizada irá condicionar fortemente a qualidade do produto final, devendo ser suficientemente elevada para ocorrer a expansão da argila (Ferreira *et al.*, 2007). Resulta assim um material com uma elevada proporção de poros semi-fechados, podendo chegar a constituir cerca de 90% do seu volume. A sua estrutura porosa é formada pelos vazios entre os agregados individuais e os espaços abertos entre o ligante e os agregados (Vašina *et al.*, 2006), garantindo uma condutibilidade térmica reduzida (cerca de 0,10 W/mK), graças à contribuição dos poros fechados, e uma retenção de humidade e poluentes atmosféricos (Kalhori *et al.*, 2013).

As opções no mercado de agregados de argila expandidas são inúmeras, podendo-se escolher a granulometria dos mesmos conforme as características pretendidas das argamassas a produzir. O comportamento das argamassas é influenciado pela dimensão e distribuição dos agregados, sendo que o uso de partículas de menor dimensão conduz, geralmente, a uma estrutura porosa mais fechada, a uma massa volúmica e resistência à compressão mais elevadas (devido ao aumento da compactidade das argamassas) e também a uma condutibilidade térmica mais elevada (Silva, 2007).

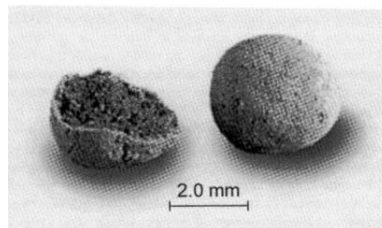


Figura 2.2 - Agregados de argila expandida com 2 a 3 mm de diâmetro (Asdrubali & Horoshenkov, 2002)

iii) Aerogel de sílica

Utiliza-se o termo nanotecnologia para designar um conjunto de materiais cuja manipulação é feita a uma escala nanométrica (<100 nm). Quando se trata de dimensões a esta escala, as propriedades dos materiais são significativamente alteradas, resultando num desempenho melhorado e em novas funcionalidades no sector específico da construção, através da sua interacção com o cimento (ligante) e o aço (Hanus & Harris, 2013).

Ao aplicar os nanomateriais às argamassas de revestimento, verifica-se uma melhoria do seu comportamento mecânico, físico, térmico e acústico, assim como de manutenção das propriedades estéticas e resistência à água. Os nanomateriais mais correntemente utilizados são as partículas de nanosílica, os nanotubos de carbono, as nanopartículas de dióxido de titânio e o aerogel de sílica, este último utilizado no presente estudo (Flores-Colen *et al.*, 2013). Os aerogéis caracterizam-se por terem uma massa volúmica reduzida e uma nanoestrutura porosa, à qual está associada uma melhoria geral no desempenho das argamassas de revestimento.

Existem alguns efeitos interessantes da utilização de nanomateriais, como a capacidade de reparação de

fendas dos nanotubos de carbono ou a capacidade de auto-limpeza e anti-bacteriana das nanopartículas de dióxido de titânio.

Contudo, enunciam-se também alguns inconvenientes, tais como as dificuldades no processo de mistura, a diminuição de resistência mecânica das argamassas e a toxicidade dos materiais. O facto de se tratarem de produtos relativamente recentes, pouco estudados e com elevados custos associados à sua produção, torna-os em soluções ainda pouco utilizadas na construção. Espera-se que estes inconvenientes sejam mitigados no futuro, através da melhoria e desenvolvimento dos processos de fabrico e, a curto prazo, através da sua combinação com produtos cimentícios, de forma a substituir os isolantes térmicos correntes no mercado (Kim *et al.*, 2012).

Normalmente, o processo de fabrico do aerogel envolve a secagem forçada de um gel de sílica; a componente líquida é retirada devido à acção capilar deixando apenas as partículas sólidas. Trata-se de um processo perigoso devido às elevadas pressões e temperaturas necessárias, com custos muito elevados, o que leva ao desenvolvimento de processos alternativos de fabrico, como é o caso da secagem subcrítica (Júlio & Ilharco, 2014; Hanus & Harris, 2013).

O aerogel apresenta uma elevada resistência a temperaturas elevadas, com um ponto de fusão de cerca de 1600 °C e um ponto de ebulição de cerca de 2230 °C (Kim *et al.*, 2012).

Os aerogéis de sílica têm uma resistência à compressão considerável (0,15 a 0,30 MPa), mas, devido à sua estrutura altamente porosa, têm uma massa volúmica extremamente reduzida (3 kg/m³) e a condutividade térmica mais baixa de todos os sólidos (0,014 W/mk) (Qiu *et al.*, 2011). Por isso mesmo, são bons isolantes, uma vez que estes poros são compostos principalmente por gás, que é um mau condutor, que não circula facilmente através da estrutura reticulada do material, minimizando as trocas de calor por convecção. Devido à própria estrutura, a sílica é também uma má condutora de calor, contribuindo para as propriedades térmicas do aerogel (Hanus & Harris, 2013).

Existem várias formas de aerogel disponíveis, sendo as mais correntes encontradas sob a forma de aerogel granular translúcido para materiais de isolamento e de aerogel monolítico transparente (figura 2.3). O aerogel monolítico transparente tem propriedades térmicas e ópticas melhoradas, mas trata-se de um material oneroso, com um processo de fabrico mais demorado e com a necessidade de protecção face a tensões e humidades, sendo por isso mais vulgar utilizar-se aerogel sob a forma de grânulos (Hanus & Harris, 2013). O aerogel granular tem a vantagem de se poder combinar em argamassas de reboco ou com outros agregados isolantes.

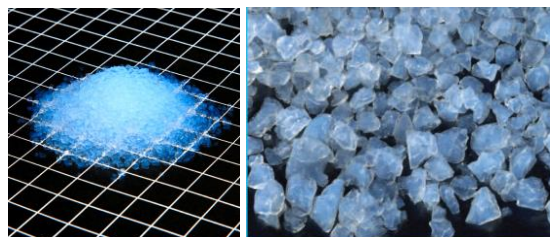


Figura 2.3 - Agregado de aerogel de sílica (W2, 2012)

2.4. Argamassas térmicas

2.4.1. Revestimentos de desempenho térmico melhorado

As argamassas de revestimento, em especial as exteriores, fazem parte da primeira barreira contra os agentes de degradação de qualquer construção. Assim, para além da sua componente estética, desempenham um importante papel de protecção; uma correcta aplicação de uma argamassa, aumenta efectivamente o tempo de vida útil do suporte, desempenhando o seu papel de protecção durante vários anos (Brás *et al.*, 2012; Faria, 2012). O crescente desenvolvimento de novos tipos de argamassas tem como principal objectivo a obtenção de produtos que cumpram com eficiência os requisitos cada vez mais exigentes das argamassas, nomeadamente o desempenho a nível mecânico, acústico e térmico. Desta forma, têm-se vindo a estudar e a testar novos constituintes na sua composição e diferentes métodos de fabrico, garantindo as características físicas e mecânicas mínimas para o seu adequado desempenho (Frade *et al.*, 2012).

Nos últimos anos, o sector da construção tem desempenhado um esforço no sentido de melhorar o comportamento térmico e a eficiência energética dos edifícios. Isto deve-se em grande parte à entrada em vigor na década de 90 do RCCTE (Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios), tendo este regulamento sido actualizado em 2006 e substituído em 2013 pelo REH (Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação, REH, 2013) referente aos requisitos térmicos.

É neste contexto que surgem as argamassas de desempenho térmico melhorado, com o objectivo de reduzir as pontes térmicas e as trocas de calor pela envolvente vertical, contribuindo, assim, para a eficiência energética dos edifícios.

O REH impõe requisitos de conforto térmico nos edifícios novos e remodelados em Portugal, exigindo condições de conforto térmico sem grandes desperdícios de energia (Veiga, 2010).

Para se cumprir estas exigências e requisitos de desempenho dos regulamentos actuais, procuram-se materiais de isolamento com características melhoradas, tanto a nível térmico e acústico, como de impacto ambiental e energético (Labrincha *et al.*, 2006).

Segundo Veiga (2012), a utilização de revestimentos aderentes constituídos por argamassas isolantes constitui um dos principais sistemas de isolamento térmico pelo exterior, que incluem também os revestimentos compósitos de isolamento térmico pelo exterior (ETICS), os revestimentos constituídos por painéis isolantes fixados directamente ao suporte (*Vêtures*) e os revestimentos de fachada ventilada com isolante na caixa de ar. Estes sistemas têm a vantagem de não reduzirem a área interior das habitações, minimizarem as pontes térmicas e condensações, diminuírem o impacto das variações de temperatura e choques térmicos e, conseqüentemente, melhorarem o desempenho energético dos edifícios, pois diminuem a necessidade de aquecimento e arrefecimento ao longo do ano.

No entanto, as argamassas isolantes têm um desempenho térmico limitado, que é directamente proporcional à sua espessura (entre 2 a 10 cm), sendo esse desempenho geralmente inferior ao dos

outros sistemas de isolamento pelo exterior com uma camada isolante (Veiga, 2012; Frade *et al.*, 2012). A sua principal vantagem prende-se com a sua capacidade de minimizar as trocas de calor mantendo as características mecânicas e físicas associadas a um funcionamento normal de um revestimento de um edifício, com custos mais reduzidos face aos dos outros sistema de isolamento pelo exterior; pode também ser utilizado em paredes irregulares e para correcção de pontes térmicas em paredes curvas (Veiga, 1998).

Tendo em conta a importância das argamassas térmicas para a eficiência energética dos edifícios, torna-se relevante estudar as variações das suas propriedades e do seu desempenho quando expostas a temperaturas elevadas. De acordo com Handoo (2002), ao submeter argamassas cimentícias a altas temperaturas, dão-se deteriorações e alterações que levam à perda de capacidade da pasta de cimento, durabilidade, aumento da retracção por secagem, ocorrência de fissuração estrutural e alteração de cor dos agregados. Existem vários tipos de situações que podem provocar uma rápida elevação da temperatura das argamassas, destacando-se o caso dos incêndios ou, em aplicações industriais (centrais de energia, entre outros), alterando as normais condições de serviço (Cunha *et al.*, 2014).

2.4.2. Características das argamassas de desempenho térmico melhorado

As argamassas térmicas ou de desempenho térmico melhorado têm como principal característica a sua capacidade de isolamento: sem perderem as suas funções de revestimento, possuem uma condutibilidade térmica reduzida. A condutibilidade térmica (λ) é uma propriedade física dos materiais que quantifica a sua capacidade de conduzir energia térmica (calor). Equivale numericamente à quantidade de calor transmitida, por unidade de tempo, através de um objecto com espessura e áreas unitárias, devido a uma diferença de temperaturas entre as suas faces também unitária. Esta propriedade varia consoante o tipo de material em questão, a sua massa volúmica, a fase em que se encontra, a porosidade, a idade, a temperatura e humidade, as condições de fabrico, entre outros. No caso dos materiais utilizados na construção de edifícios, a massa volúmica e o teor de humidade são os factores relevantes, sendo que a condutibilidade aumenta proporcionalmente aos parâmetros em questão (Rodrigues *et al.*, 2009; Low *et al.*, 2010).

Sob o ponto de vista da condutibilidade térmica, este tipo de argamassas de revestimento constitui assim uma solução sustentável em relação à eficiência energética e ao conforto térmico de edifícios. São argamassas que têm agregados isolantes na sua composição e uma massa volúmica inferior a 600 kg/m³ (Veiga *et al.*, 2010). Segundo a norma EN 998-1 (CEN, 2010), este tipo de argamassas tem requisitos para além do coeficiente de condutibilidade (inferior a 0,2 W/m.k). Através da observação da tabela 2.1, as argamassas térmicas ("T") devem apresentar valores de resistência à compressão entre o intervalo de 0,4 a 5 MPa, coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (μ) inferior a 0,15, e absorção por capilaridade inferior a 0,40 kg/m².min^{0,5}.

Tabela 2.1 – Requisitos para argamassas térmicas no estado endurecido (EN 998-1, CEN 2010)

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

2.5. Estudos sobre argamassas

Como referido, actualmente, existe uma preocupação e procura cada vez maior por argamassas de desempenho térmico melhorado que ofereçam boas características isolantes sem comprometer a sua resistência e durabilidade através da introdução de agregados isolantes. Como foi discutido, as argamassas de construção podem ser classificadas segundo o local de produção em tradicionais (doseadas em obra) ou industriais (pré-doseadas em fábrica); estes dois tipos também diferem nos materiais constituintes, no modo de fabrico, na execução e aplicação, sendo as argamassas industriais pré-doseadas em fábrica com diversos tipos de adjuvantes e adições. Apesar disso, actualmente, estima-se que entre 62% e 78% dos revestimentos aplicados em edifícios correntes correspondam a argamassas tradicionais doseadas em obra (APFAC, 2005).

Apesar de existirem alguns estudos relativos à utilização de argamassas térmicas e de agregados isolantes, e estudos sobre a exposição a temperaturas elevadas de argamassas cimentícias, existe muito pouca informação sobre a influência da temperatura nas propriedades das argamassas térmicas. Nos parágrafos seguintes, apresentam-se alguns estudos referentes a aplicações de argamassas de desempenho térmico melhorado (tradicionais e industriais) e a argamassas cimentícias expostas a temperaturas elevadas.

2.5.1. Argamassas térmicas

Em Soares *et al.* (2015), foram produzidas argamassas tradicionais de traço volumétrico 1:4 com substituição de areia por percentagens variáveis de aerogel de sílica, granulado de cortiça e argila expandida (entre 20% a 30% em volume), com dimensões entre 0,5 mm e 2 mm, e uma argamassa de controlo com areia. Ensaíram-se as argamassas de forma a estudar os parâmetros da condutibilidade térmica, massa volúmica aparente (por pesagem hidroestática e através de um método com imersão em gás, com um equipamento *Geopyc*) e a porosidade aberta através de pesagem hidroestática. Foi possível concluir que a incorporação de agregados leves teve o efeito de reduzir significativamente a massa volúmica e a condutibilidade térmica, e também de originar um aumento na porosidade aberta (cerca de 26% na argamassa de areia e 31% e 32% nas argamassas de granulado de cortiça e argila expandida, respectivamente, e 40% na de aerogel).

Em Silva *et al.* (2015), efectuaram-se vários estudos de forma a avaliar o comportamento mecânico de argamassas com substituição de agregados. Foram produzidas, além de uma argamassas de referência, duas argamassas com 100% de substituição de areia por argila expandida e granulado de cortiça expandida e duas argamassas com alternância destes dois agregados em proporções de 60% a 40%. As amostras foram ensaiadas quanto aos parâmetros de resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico, tendo-se concluído que a introdução de agregados leves provoca uma diminuição de ambas as características mecânicas (em particular devido ao agregado de cortiça) e tendo sido verificada uma correlação de potência entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão.

Tabela 2.2 - Características das argamassas estudadas por Soares *et al.* (2015) e Silva *et al.* (2015)

Estudo	Argamassa	MV - método hidroestático (kg/m ³)	MV - Geopyc (kg/m ³)	Ed (MPa)	Rc (MPa)
Soares <i>et al.</i> (2015)	Referência	1827	2010	-	-
	30% aerogel	1527	1560	-	-
	30% cortiça	1528	1460	-	-
	30% argila	1582	1540	-	-
Silva <i>et al.</i> (2015)	Referência	-	-	12201	8,89
	100% argila	-	-	4220	1,43
	100% cortiça	-	-	184	0,41

Em duas dissertações de mestrado inseridas no projecto Nanorender, Vale (2014) e Melo (2014) investigaram o comportamento mecânico e físico de argamassas de comportamento térmico melhorado. Foram produzidas 4 argamassas industriais com quantidades variáveis de agregados de EPS (poliestireno expandido) e cortiça, 2 argamassas tradicionais sem adjuvantes em que numa delas a areia foi substituída em 80% por granulado de cortiça e na outra em 85% por EPS, seguindo a curva granulométrica “Mesquita”, e 1 argamassa de referência com areia. Como ligante, utilizou-se cimento *Portland* CEM II B/L 32,5N. Foram realizados ensaios de resistência à compressão e à tracção por flexão, módulo de elasticidade dinâmico, aderência ao suporte, velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, coeficiente de condutibilidade térmica, massa volúmica, porosidade aparente, absorção de água e índice de secagem. Os autores concluíram que são necessárias quantidades superiores a 70% de incorporação de agregados isolantes em argamassas, de forma a ser possível obter reduções significativas na condutibilidade térmica. Obtiveram-se alterações significativas no seu comportamento físico e mecânico, embora a introdução de agregados não seja suficiente, por si só, para que as argamassas sejam classificadas como térmicas segundo a EN998-1 (CEN, 2010). Com a introdução destes agregados, deram-se reduções na massa volúmica ($MV \leq 863 \text{ kg/m}^3$), no módulo de elasticidade dinâmico ($Ed \leq 2110 \text{ MPa}$) e na velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas ($V \leq 2176 \text{ m/s}$) de cerca de 60%, 90% e 40%, respectivamente; uma redução na condutibilidade térmica de cerca de 80%; uma redução na resistência à compressão (valores

obtidos entre 0,4 e 4,44MPa); e um aumento da porosidade (contudo, devido ao facto do método de ensaio não ser adequado, algumas argamassas não foram ensaiadas).

Em Martins (2010), foram produzidas argamassas tradicionais de revestimento com introdução de três granulometrias distintas de regranulado negro de cortiça (regranulado fino, grosso e pó de cortiça), com inclusão de cal hidráulica e cimento em traços 1:3 nas argamassas com cal e 0,5:0,5:3 nas argamassas bastardas e sem quaisquer adjuvantes. Utilizaram-se diferentes percentagens de substituição de cortiça por areia, em proporções de 60% a 80%. Para uma argamassa bastarda com 80% de inclusão de cortiça na sua constituição, observaram-se reduções de cerca de 50% na massa volúmica (944 kg/m^3), de 80% na resistência à compressão (2,4MPa) e de 75% na condutibilidade térmica ($0,2 \text{ W/mK}$), em relação à argamassa de referência. Estes resultados apontaram para o facto do regranulado negro de cortiça ter um bom desempenho térmico, mas induzir uma perda de resistência significativa nas argamassas.

Em Brás *et al.* (2013) foram ensaiadas argamassas de revestimento com substituição de cortiça e EPS em percentagens de 10% a 80% em volume por areia, bem como uma argamassa de referência. Foi utilizado cimento CEM II B/L 32,5N, areia siliciosa de dimensões 0/1 mm, agregados de cortiça e EPS de dimensões 0,5/1 e 2 mm, respectivamente, e superplastificante (PCE). Registaram-se porosidades entre 20% a 30% para as argamassas em que a substituição de agregados foi maior, uma redução de massa volúmica em 30% em relação à argamassa de referência, e uma diminuição da condutibilidade térmica entre 60 a 75%. Em relação à resistência à compressão, registaram-se reduções de cerca de 56% e 84%, para argamassas com 80% de EPS e cortiça, respectivamente, concluindo-se, desta forma, que o efeito de perda de resistência é mais significativo em argamassas com incorporação de cortiça.

Em Nepomuceno & Silva (2014) foram produzidas argamassas tradicionais com PCM (*phase change materials*, materiais com a capacidade de mudar o seu estado em função da temperatura ambiente, absorvendo e armazenando a energia calorífica ambiente) incorporados sob a forma de argila expandida e de cera de parafina, tendo por objectivo avaliar o seu comportamento térmico. Foi utilizado cimento *Portland* CEM II B/L 32,5N como ligante, juntamente com um superplastificante e areia fluvial de granulometria fina e média. Peneirou-se a argila de forma a conseguir uma granulometria com agregados de dimensão inferior a 4 mm. Em seguida, impregnaram-se os agregados de argila com os PCM através de um processo de imersão a altas temperaturas, seguindo-se secagem com ar comprimido. Foram produzidas 3 argamassas com um traço de 1:3, variando a quantidade de substituição de argila com PCM por areia. Obtiveram-se massas volúmicas no estado endurecido de cerca de 1300 kg/m^3 , resistência à compressão de 15 MPa, e condutibilidade térmica de $0,5 \text{ W/mK}$ para as argamassas com maior percentagem de substituição de agregados. Os valores de massa volúmica e de resistência à compressão diminuíram significativamente, embora os valores de condutibilidade térmica tenham melhorado cerca de 30% a 50% em relação às argamassas de referência produzidas.

2.5.2. Argamassas cimentícias expostas a temperaturas elevadas

Aköz *et al.* (1995) estudaram os efeitos das temperaturas elevadas nas propriedades físicas e mecânicas de argamassas correntes (cimento Portland CEM II B/L 32,5N) com agregado de areia e com sílica de fumo. Para isso, para cada temperatura analisada, foram produzidos três provetes prismáticos que, após o processo de cura de 28 dias, foram expostos a temperaturas elevadas (100 °C, 200 °C, 300 °C, 600 °C, 900 °C e 1200 °C) a uma taxa de aquecimento de 6-10 °C/min. Após o aquecimento, foram aplicados dois métodos de arrefecimento: à temperatura ambiente (mais lento) ou em água (mais rápido). Experimentalmente, determinou-se a massa volúmica, a absorção de água, o calor específico, a velocidade de ondas ultra-sónicas, a resistência à compressão e à tracção e o módulo de elasticidade. A resistência à flexão diminuiu a partir da exposição a 100 °C para ambas as argamassas, com perdas aproximadas de 40% para a temperatura de 300 °C; a resistência à compressão diminuiu a partir dos 300 °C, com perdas aproximadas de 30% para 600°C e de 70% para 900 °C; o módulo de elasticidade (determinado a partir da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas) diminuiu a partir de 100 °C, de forma linear, verificando-se uma redução de cerca de 75% do seu valor inicial à temperatura de 300 °C; a massa volúmica diminuiu para temperaturas de exposição entre 200 °C e 1200 °C; quanto à absorção de água e ao calor específico, não se verificaram alterações significativas. Verificou-se que o arrefecimento em água teve um efeito mais gravoso na redução de desempenho das argamassas em comparação ao arrefecimento à temperatura ambiente. Segundo o autor, as temperaturas elevadas influenciam de forma negativa as argamassas estudadas devido à alteração das propriedades dos seus materiais constituintes.

Em Cülfik *et al.* (2001), foi estudado o efeito das temperaturas elevadas nas propriedades mecânicas de argamassas de alta resistência. Para isso, foram produzidas argamassas de cimento *Portland* e areia com adição de grafite (material refractário) e expostas às temperaturas de 300 °C, 600 °C e 900 °C, sem carregamento mecânico. A seguir à exposição, após o arrefecimento, as argamassas foram sujeitas a ensaios de resistência à compressão, tendo-se obtido reduções de cerca de 29% a partir de 300°C e de 65% a partir de 600 °C. Em termos de resistência à flexão, as argamassas estudadas apresentaram reduções de 36% para 300°C e de 87% para 600 °C; a partir de 900 °C, a resistência à compressão foi desprezável. Com o aumento da temperatura de exposição, as argamassas apresentaram reduções no módulo de elasticidade estático de cerca de 44% a partir da temperatura de exposição de 300 °C. Segundo o autor, os principais factores que influenciam as resistências das argamassas são a incompatibilidade térmica entre os seus materiais constituintes (a areia apresenta um coeficiente de dilatação de $11 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ e a pasta de cimento de $16 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) e as propriedades da pasta de cimento, que se traduzem na ocorrência de microfissuras internas.

Em Lion *et al.* (2005), estudou-se o efeito das temperaturas elevadas nas propriedades de argamassas cimentícias (cimento Portland CEM II B/L 32,5N) e agregado de areia ao nível da sua porosidade e permeabilidade. Após exposição às temperaturas de 105 °C, 200 °C e 250 °C, realizaram-se ensaios de permeabilidade e porosidade e verificaram-se alterações micro-estruturais, traduzindo-se em ocorrência de microfissuras devido à dilatação térmica dos agregados, aumento do número de vazios devido à perda

de água da argamassa (a 120 °C existe uma perda total da água livre da argamassa; entre 180 °C e 300 °C perde-se a água de ligação, Farage *et al.*, 2003) e aumento da permeabilidade a partir de 150 °C.

Em Carneiro (2013), foram testadas argamassas com PCM expostas a temperaturas elevadas (200°C e 600°C) com o objectivo de avaliar a influência da exposição térmica na sua resistência mecânica. Para isso, foram testadas 8 composições: 4 argamassas doseadas em laboratório de cimento *Portland*, gesso, cal aérea e cal hidráulica, com o mesmo teor de ligantes e 4 argamassas doseadas em laboratório com incorporação de 40% de PCM em relação à massa do agregado. Efectuaram-se ensaios de resistência à compressão, resistência à flexão e resistência à aderência por tracção em tijolo cerâmico após exposição a temperaturas elevadas. Em termos gerais, verificou-se que a adição de PCM nas argamassas diminuiu a sua resistência mecânica para todas as gamas de temperatura estudadas, comparativamente à argamassa de referência (variando consoante o ligante em causa). Em relação à resistência à flexão, e comparativamente à temperatura de exposição de 20 °C, a argamassa de cimento (sem introdução de PCM) apresentou reduções aproximadas de 4% e 75% para exposição às temperaturas de 200 °C e 600 °C, respectivamente; já a argamassa de cimento com a introdução de PCM apresentou reduções aproximadas de 56% e 96% para exposição às temperaturas de 200 °C e 600 °C, respectivamente. Quanto à resistência à compressão, e comparativamente à temperatura de exposição de 20 °C, a argamassa de cimento (sem introdução de PCM) apresentou reduções de resistência de cerca de 12% e 54% à temperatura de exposição de 200 °C e 600 °C, respectivamente; a argamassa de cimento com introdução de PCM, apresentou reduções de resistência de cerca de 55% e 92% às temperaturas de exposição de 200 °C e 600 °C, respectivamente. Em relação à resistência à aderência por tracção das argamassas, a exposição às temperaturas elevadas levaram à sua redução para os casos estudados. Neste estudo, as argamassas de cal aérea com adição de PCM apresentaram maior deterioração devido às temperaturas elevadas, apresentando os valores de resistência mecânica mais reduzidos. De acordo com o autor, estas alterações devem-se às incompatibilidades nos coeficientes de dilatação dos materiais e à alta pressão de vapor interna gerada nos provetes devido às altas temperaturas que levam à microfissuração da argamassa.

2.6. Síntese do capítulo

As argamassas são utilizadas na construção com a função de revestimento, tendo-se verificado ao longo dos anos grandes mudanças no que se refere aos materiais utilizados e à forma de mistura e aplicação. Hoje em dia, com exigências ambientais e de conforto cada vez mais presentes no sector da construção, torna-se necessário o desenvolvimento de argamassas de revestimento com a capacidade de atingir um bom desempenho térmico e, nalgumas aplicações, de resistir a temperaturas elevadas, sem que as características mecânicas sejam comprometidas.

Assim, as argamassas com incorporação de isolantes térmicos tornam-se numa boa solução de revestimento, caracterizando-se pelos seus coeficientes de condutibilidade térmica inferiores a 0,2 W/m.K. Estas características deste tipo de argamassas devem-se à incorporação de materiais com capacidades isolantes, tais como a argila expandida, o granulado de cortiça expandida ou o aerogel. No entanto, ao utilizar estes materiais em substituição da areia, as argamassas sofrem uma perda de

propriedades mecânicas, nomeadamente na resistência à compressão e no módulo de elasticidade, sendo por isso necessário complementá-los com adjuvantes e/ou adições.

De acordo com a revisão da literatura efectuada, não existem ainda estudos relativos ao comportamento de argamassas de revestimento com incorporação destes agregados quando submetidos a variações de temperatura e a temperaturas elevadas. É também desconhecido o efeito dos adjuvantes em argamassas térmicas, nomeadamente quando expostos a temperaturas elevadas, tendo em conta que as argamassas com incorporação de aerogel necessitam quase sempre do seu uso de forma a garantir coesão e boas características mecânicas da argamassa. Assim, de forma a obter mais informações sobre a influência das temperaturas elevadas nestes agregados e adjuvantes, e do impacto no seu comportamento, foi realizada uma campanha experimental em laboratório, descrita no próximo capítulo.

3. Caracterização do trabalho experimental

3.1. Considerações iniciais

A campanha experimental desenvolvida nesta dissertação teve como principal objectivo caracterizar as argamassas térmicas após serem expostas a diferentes temperaturas elevadas em condições de serviço. Neste capítulo descrevem-se todas as etapas associadas ao estudo das argamassas, desde a sua produção, aos ensaios realizados. O objectivo final consistiu em recolher dados que permitam retirar conclusões relativamente aos efeitos da exposição a temperaturas elevadas ao nível das propriedades mecânicas e físicas das argamassas.

Numa primeira fase, descreve-se o processo de selecção e caracterização dos materiais que incorporam as argamassas, assim como os métodos utilizados na sua preparação. Seguidamente, descreve-se o processo de mistura, produção de provetes e recolha de dados sobre as argamassas no estado fresco, mais especificamente através dos ensaios de espalhamento e de massa volúmica. Em seguida, descreve-se o processo de exposição das argamassas às diferentes temperaturas numa câmara térmica e, finalmente, os ensaios de caracterização física e mecânica das argamassas no estado endurecido.

O programa experimental descrito neste capítulo foi desenvolvido no Laboratório de Construção (LC) do Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos (DECivil) do IST, tendo incluído os seguintes ensaios: determinação da massa volúmica aparente em estado fresco e endurecido, espalhamento, velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, módulo de elasticidade dinâmico, módulo de torção, coeficiente de *Poisson*, resistência à compressão e tracção por flexão e condutibilidade térmica.

3.2. Formulação das argamassas

Para o desenvolvimento desta campanha experimental, produziram-se sete tipos de argamassas doseadas no laboratório.

As argamassas formuladas em laboratório tiveram como único ligante o cimento, e os agregados leves utilizados foram a argila expandida (AE), o granulado de cortiça expandida (GC) e o aerogel de sílica (AERO), excepto no caso de quatro argamassas de controlo, em que o agregado utilizado foi areia lavada Mesquita com dimensão 0/2 mm para analisar o efeito dos adjuvantes isoladamente. As quatro argamassas de controlo correspondem a uma argamassa de referência (D^{ref}) com 100% de areia como agregado, duas argamassas com adição de 5% e 10% de resina e uma última argamassa com introdução de éter de celulose e introdutores de ar (tensioactivos) para aferir a influência dos adjuvantes.

Todas as argamassas foram produzidas com uma proporção de 100% de cada tipo de agregado. A relação a/c utilizada para cada argamassas foi determinada experimentalmente, de forma a aferir a melhor trabalhabilidade e consistência de cada argamassa. Utilizou-se para todas as argamassas um traço volumétrico de 1:4, tendo sido este o traço utilizado em outros estudos no âmbito do projecto *Nanorender*.

As curvas granulométricas utilizadas foram as mesmas para os diferentes agregados de cada argamassa, excepto no caso do aerogel, devido à dificuldade de separação do material em fracções granulométricas, pois trata-se de um material demasiado frágil e com um tamanho de grânulos homogéneo. Utilizou-se assim a curva granulométrica correspondente ao agregado de cortiça e argila expandida (designada por "curva 2"), para todos os agregados em estudo. Esta curva foi escolhida no âmbito do projecto *Nanorender* e corresponde à distribuição granulométrica que permite o melhor aproveitamento dos agregados de cortiça e de argila expandida.

Na tabela 3.1 apresenta-se a especificação dos agregados utilizados, relação a/c e quantidade de adjuvantes utilizados (%) relativamente à massa de cimento utilizada.

Tabela 3.1 – Composição das argamassas tradicionais

Argamassas	Agregado	Ligante	Relação a/c	Adjuvantes (%)		
				Introdutores de ar	Éter de celulose	Resina
A ^{AE}	100% argila expandida	CEM II 32,5N	0,9	-	-	-
B ^{GC}	100% granulado de cortiça		1	-	-	-
C ^{AERO}	100% aerogel		0,9	0,5	0,075	-
D ^{REF}	100% areia		0,65	-	-	-
E ^{CT}			0,55	0,5	0,075	-
F ^{5%RES}			0,65	-	-	5
G ^{10%RES}			0,65	-	-	10

Para cada argamassa foram produzidos 5 provetes prismáticos de 40x40x160 mm (figura 3.1-esq.) para os ensaios de resistência mecânica e 2 provetes cilíndricos com diâmetro de 60 mm e espessura de 20 mm (figura 3.1-dta.) para os ensaios de condutibilidade térmica. Todos os provetes foram curados em sacos de polietileno até à sua desmoldagem em câmara condicionada a uma temperatura de 20 °C ± 2 °C e humidade relativa de 65% ± 5%. Devido à reduzida resistência mecânica das argamassas em estudo, a desmoldagem dos provetes foi feita aos 7 dias, tendo estes permanecido em câmara condicionada até aos 28 dias e, posteriormente, sido colocados em estufa até se atingirem valores de massa constante para posterior análise.



Figura 3.1 - Molde de 3 provetes prismáticos de 160x40x40mm (à esq.); molde com 4 provetes cilíndricos de diâmetro 60 mm e espessura 20 mm (à dta.)

Houve 5 fases correspondentes à produção das argamassas a ensaiar à temperatura ambiente (argamassas de temperatura de controlo, 1ª produção) e a ensaiar após exposição às temperaturas de 100 °C (2ª produção), 150 °C (3ª produção), 200 °C (4ª produção) e 250 °C (5ª produção) na câmara térmica. Assim, foram produzidas as seguintes argamassas:

- Argamassa com agregado de **argila expandida** ($A^{AE}_{controlo}$, $A^{AE}_{100^{\circ}C}$, $A^{AE}_{150^{\circ}C}$, $A^{AE}_{200^{\circ}C}$, $A^{AE}_{250^{\circ}C}$)
- Argamassa com agregado de **granulado de cortiça** ($B^{GC}_{controlo}$, $B^{GC}_{100^{\circ}C}$, $B^{GC}_{150^{\circ}C}$, $B^{GC}_{200^{\circ}C}$, $B^{GC}_{250^{\circ}C}$)
- Argamassa com agregado de **aerogel** ($CAERO_{controlo}$, $CAERO_{100^{\circ}C}$, $CAERO_{150^{\circ}C}$, $CAERO_{200^{\circ}C}$, $CAERO_{250^{\circ}C}$)
- Argamassa com agregado de **areia** ($D^{REF}_{controlo}$, $D^{REF}_{100^{\circ}C}$, $D^{REF}_{150^{\circ}C}$, $D^{REF}_{200^{\circ}C}$, $D^{REF}_{250^{\circ}C}$)
- Argamassa com agregado de **areia com adição de éter de celulose e introdutores de ar** ($E^{CT}_{controlo}$, $E^{CT}_{100^{\circ}C}$, $E^{CT}_{150^{\circ}C}$, $E^{CT}_{200^{\circ}C}$, $E^{CT}_{250^{\circ}C}$)
- Argamassa com agregado de **areia com adição de 5% de resina líquida** ($F^{5\%RES}_{controlo}$, $F^{5\%RES}_{100^{\circ}C}$, $F^{5\%RES}_{150^{\circ}C}$, $F^{5\%RES}_{200^{\circ}C}$, $F^{5\%RES}_{250^{\circ}C}$)
- Argamassa com agregado de **areia com adição de 10% de resina líquida** ($G^{10\%RES}_{controlo}$, $G^{10\%RES}_{100^{\circ}C}$, $G^{10\%RES}_{150^{\circ}C}$, $G^{10\%RES}_{200^{\circ}C}$, $G^{10\%RES}_{250^{\circ}C}$)

Em paralelo ao processo de produção das argamassas, foram realizados os ensaios de consistência por espalhamento e de massa volúmica aparente em estado fresco. No estado endurecido, e após colocação das várias argamassas em câmara térmica às diferentes temperaturas alvo, foram realizados ensaios para determinação da massa volúmica aparente em estado endurecido, velocidade de ondas ultra-sónicas, módulo de elasticidade dinâmico, módulo de torção, coeficiente de *Poisson*, resistência à compressão, resistência à flexão e condutibilidade térmica.

3.3. Caracterização dos materiais constituintes das argamassas

3.3.1. Cimento

Foi utilizado cimento *Portland* do tipo CEM II B/L de classe 32,5N na produção de todas as argamassas, pois trata-se do cimento mais comum na preparação de argamassas de revestimento em Portugal.

3.3.2. Areia

Para a produção das argamassas com areia, utilizou-se areia lavada da *Areipor* com dimensão de 0/2 mm. A areia foi peneirada (segundo o procedimento da norma NP EN 933-2 (IPQ, 1999) de forma a obter duas fracções de diâmetros compreendidos entre 0,5 – 1 mm e 1 – 2 mm, que correspondem à "curva 2", semelhante à curva apresentada pelos agregados leves (argila expandida e granulado de cortiça).

Foi também determinada a baridade da areia através do procedimento adaptado da norma NP EN 1097-3 (IPQ, 2002).

3.3.3. Agregados leves

Como referido, os agregados leves utilizados em substituição da areia para este estudo foram a argila expandida, o granulado de cortiça expandida e o aerogel de sílica hidrofóbico (figura 3.2)



Figura 3.2 – Argila expandida (à esq.); granulado de cortiça expandida (ao centro); aerogel (à dta.)

Os agregados foram peneirados (figura 3.3) de forma a obter fracções granulométricas de 0,5 – 1 mm e 1 – 2 mm, correspondentes à "curva 2" característica destes materiais (tabela 3.2). Toda a argila expandida utilizada foi deixada previamente a secar antes da peneiração durante um período mínimo de 24 horas, a uma temperatura constante de 100 °C de forma a garantir a secagem total do agregado.

O aerogel não foi peneirado, sendo que este material não segue nenhuma curva granulométrica específica devido à fragilidade dos agregados e à proporção homogénea do mesmo.



Figura 3.3 – Peneiração dos agregados

Tabela 3.2 – Distribuição granulométrica da curva utilizada (% de volume)

Designação	< 0,063 mm	0,063 a 0,125 mm	0,125 a 0,250 mm	0,250 a 0,500 mm	0,50 a 1,00 mm	1,00 a 2,00 mm
Curva 2	-	-	-	-	17,75	82,25

Realizaram-se ensaios de baridade nos agregados leves, seguindo o mesmo processo utilizado para caracterizar a areia, apresentando-se na tabela 3.3 os resultados médios obtidos para os diferentes materiais. Repetiu-se o ensaio 3 vezes para cada material, sem ter havido compactação durante o processo.

Tabela 3.3 – Baridade média dos agregados constituintes das argamassas tradicionais

Agregados	Baridade média (kg/m ³)
Areia	1325
Granulado de cortiça expandida	53
Argila expandida	432
Aerogel	61

3.3.3. Adjuvantes

Neste estudo, utilizaram-se três adjuvantes distintos nas argamassas (figura 3.4) – introdutores de ar, éter de celulose e resina líquida. Os introdutores de ar e o éter de celulose foram utilizados de forma a garantir uma melhoria nas propriedades da argamassa de aerogel. Os introdutores de ar (tensioactivos) têm como função introduzir ar na mistura e permitir a mistura do aerogel com a água de amassadura, aumentando também a porosidade da mistura e beneficiando o seu comportamento térmico (Ximenes *et al.*, 2016). O éter de celulose (agente reológico) funciona como retentor de água, conferindo viscosidade à mistura, o que leva a uma maior homogeneidade, trabalhabilidade e menor segregação de material, importante ao trabalhar com materiais de densidades diferentes (Ximenes *et al.*, 2016). Utilizou-se também resina líquida em argamassas de areia, tendo como função melhorar a ligação entre os vários componentes, agindo como agente ligante, reduzindo a água de amassadura necessária e melhorando as ligações internas (Ximenes *et al.*, 2016).



Figura 3.4 – introdutores de ar em pó (à esq.); éter de celulose em pó (ao centro); resina líquida com água (à dta.)

3.4. Produção das argamassas

Na produção das 7 formulações de argamassa, a relação a/c foi obtida através de um processo de tentativa e erro, com referência aos requisitos de consistência padronizados na norma EN 1015-3 (CEN, 1998).

Para a produção das argamassas, seguiu-se o seguinte procedimento (adaptado de EN 1015-2 (CEN, 1999)):

- junção da quantidade devidamente pesada de ligante e agregados no recipiente de mistura;
- adição de cerca de 80% da água previamente pesada e mistura manual durante cerca de 15 segundos (EN 1015-2 (CEN, 1998));

- mistura da argamassa durante 1 minuto na misturadora;
- paragem entre 5 a 10 segundos para mistura manual da argamassa, com o objectivo de retirar detritos que possam não ter ficado bem misturados do fundo e adição da restante água (20%);
- reinício do processo de mistura com recurso à misturadora por mais 1 minuto;
- após concluída a fase de mistura, colocação da argamassa nos moldes previamente preparados.

Realizou-se este estudo que, à data de produção das primeiras argamassas, se encontrava ainda numa fase de optimização. Devido a este facto, a relação a/c e as proporções de adjuvantes a utilizar foram obtidas por experimentação, com o objectivo de se obterem argamassas capazes de garantir uma boa trabalhabilidade e um aspecto aceitável, mas não correspondendo às proporções óptimas.

A argamassa de aerogel, em particular, foi produzida com uma quantidade elevada de introdutores de ar (figura 3.5 - esq.), de forma a tornar possível a mistura do aerogel, da água e do cimento numa pasta, influenciando por sua vez a quantidade de água necessária à mistura (figura 3.5 - dta). De forma a ser possível realizar comparações, o método de mistura foi o mesmo para todas as argamassas (excepto a argamassa de aerogel - Anexo A.1). Pelo mesmo motivo, as relações a/c utilizadas na primeira produção foram também mantidas para as seguintes produções.



Figura 3.5 – Adição de introdutores de ar à argamassa de aerogel (à esq.); amassadura da argamassa de aerogel (ao centro); segregação visível da argamassa com 10% de resina na fase de moldagem dos provetes (à dta.)

Pelos motivos explicados, é necessário referir que a argamassa com 10% de resina G^{10%RES} foi mal conseguida, pois foi utilizada uma quantidade excessiva de resina, o que levou à conseqüente segregação do material (figura 3.5 - à dta.). Por esta razão, os resultados obtidos para esta argamassa não são considerados como sendo representativos devido à heterogeneidade da mesma.

3.5. Provetes

Produziram-se sete provetes para cada argamassa: dois provetes cilíndricos com diâmetro de 60 mm e 20 mm de espessura e cinco provetes prismáticos de 40x40x160 mm (excepto no caso da argamassa de aerogel, em foram produzidos apenas cinco provetes, dois cilíndricos e três prismáticos, devido à limitação de material), cuja produção se descreve em seguida.

i. Provetes cilíndricos

Para cada argamassa, foram produzidos dois provetes com diâmetro de 60 mm (figura 3.6) com o objectivo de serem utilizados no ensaio de condutibilidade térmica. Cada molde é composto por quatro cofragens cilíndricas. O procedimento seguido para a produção dos provetes envolveu os seguintes passos:

- montagem do molde e limpeza de toda a sua superfície;
- aplicação de óleo descofrante;
- aplicação de uma primeira camada de argamassa em cada compartimento, até uma altura correspondente a metade da sua capacidade;
- compactação da primeira camada através de 25 pancadas de um pilão metálico normalizado (\emptyset 12 mm) destinado para este efeito;
- aplicação de uma segunda camada de argamassa em cada compartimento, até esta encher completamente o molde;
- compactação da segunda camada através de 25 pancadas do pilão metálico;
- nova compactação através de um compactador mecânico, submetendo o molde a 4 choques
- remoção da argamassa em excesso e alisamento da superfície do molde com o auxílio de uma colher de pedreiro;
- colocação de cada molde, dentro de um saco de polietileno, na câmara de seca durante 7 dias;
- após o sétimo dia, desmoldagem dos provetes, deixando-os na câmara seca até perfazerem 28 dias e colocando-os em estufa até serem atingidos valores de massa constantes

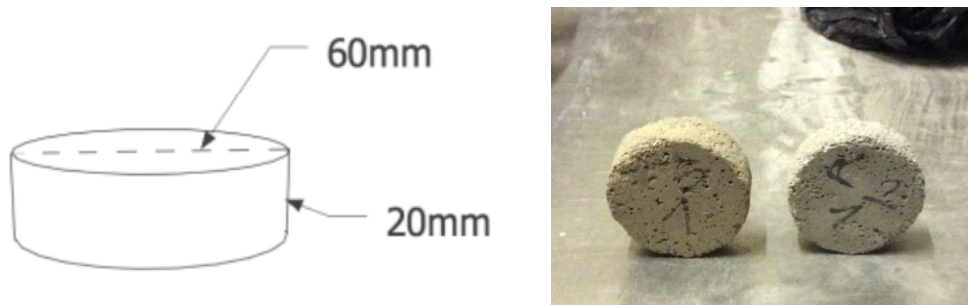


Figura 3.6 – Esquema dos provetes cilíndricos (à esq.); exemplo de dois provetes cilíndricos (ECT e CAERO) (à dta.)

ii. Provetes prismáticos

Os moldes normalizados são constituídos por 3 cofragens prismáticas de dimensões 160x40x40 mm³ (figura 3.7 – esq.), em conformidade com a norma NP EN 196-1 (IPQ, 2006). O procedimento seguido para a produção dos provetes foi em tudo idêntico ao utilizado nos provetes cilíndricos, descrito acima (figura 3.7 – centro e dta.).

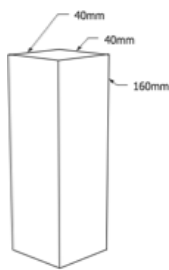


Figura 3.7 – Esquema dos provetes prismáticos (à esq.); compactação das argamassas com pilão metálico (ao centro); compactação mecânica das argamassas (à dta.)

3.6. Ensaios realizados no estado fresco

3.6.1. Consistência por espalhamento

A consistência das argamassas no estado fresco foi avaliada com base na norma EN 1015-3 (CEN, 1999), com o objectivo de avaliar a fluidez e a quantidade de água presente na mistura. Deste modo, foi possível estimar a quantidade de água a adicionar de modo a que a argamassa atingisse a consistência pretendida. A consistência mede-se através do diâmetro médio que a argamassa apresenta após ter sido desmoldada e submetida a um certo número de choques verticais.

Para a realização do ensaio foi necessário utilizar uma mesa de espalhamento, um molde troncocónico, um pilão de compactação, uma espátula e uma craveira com precisão de 1 mm para a medição dos diâmetros. O procedimento (adaptado da norma EN 1015-3 (CEN, 1999)) cumprido no ensaio foi o seguinte:

- humedecimento da mesa de espalhamento e do interior do molde troncocónico com um pano húmido;
- colocação do molde no centro da mesa de espalhamento;
- introdução da argamassa em duas camadas, compactando cada camada através de 10 pancadas verticais com o pilão, de forma a assegurar um enchimento uniforme do molde (figura 3.8 – esq. e centro);
- rasamento do excesso de argamassa do topo do molde e limpeza da mesa de espalhamento, sem deixar qualquer vestígio de água junto à base do molde;
- após cerca de 15 segundos, remoção do molde na vertical e, ao rodar a manivela, aplicação de 15 pancadas na mesa, com a frequência de uma pancada por segundo, fazendo a argamassa espalhar-se pela mesa (figura 3.8 – dta.);
- medição do diâmetro de espalhamento da argamassa em duas direcções perpendiculares.



Figura 3.8 – Colocação da argamassa no molde troncocónico (à esq.); compactação da argamassa com o pilão (ao centro); aplicação de 15 pancadas na mesa de espalhamento (à dta.)

Os resultados finais do ensaio obtêm-se através da média de duas medições do espalhamento, em milímetros, em quaisquer duas direcções perpendiculares. Deste modo, a relação a/c foi determinada através de várias tentativas, aproximando a relação entre a consistência por espalhamento e a massa volúmica no estado fresco aos valores limite da norma EN 1015-2 (CEN, 1998), conforme apresentado na (tabela 3.4). Assim, ao saber a quantidade de água de cada amassadura, foi possível aproximar a relação água/cimento a um valor satisfatório.

Tabela 3.4 – Relação entre a massa volúmica e o espalhamento segundo a EN 1015-2 (CEN, 1998)

Massa volúmica (kg/m ³)	Espalhamento (mm)
> 1200	175 ± 10
> 600 a < 1200	160 ± 10
> 300 a < 600	140 ± 10
< 300	120 ± 10

3.6.2. Massa volúmica aparente no estado fresco

O ensaio para a determinação da massa volúmica aparente no estado fresco foi realizado de acordo com a norma EN 1015-6 (CEN, 1998). Aquela propriedade pode ser calculada pelo quociente entre a massa da argamassa em estado fresco e o volume por ela ocupado. Utilizaram-se recipientes cilíndricos com 1 litro de volume (figura 3.9), uma pá de pedreiro e uma balança. O procedimento (adaptado de EN 1015-6 (CEN, 1998)) cumprido no ensaio foi o seguinte:

- pesagem do recipiente cilíndrico de 1 L (vazio), obtendo-se m_1 ;
- enchimento do recipiente com a argamassa até metade da sua capacidade;
- compactação da argamassa através da queda sucessiva do recipiente no pavimento, num total de 4 vezes;
- enchimento do resto do recipiente com a argamassa e repetição da compactação;
- rasamento do excesso da argamassa da superfície do recipiente;
- pesagem do recipiente com a argamassa para obter m_2 .



Figura 3.9 – Enchimento de recipiente com a argamassa para determinação da massa volúmica

A massa volúmica pode ser calculada pela equação 3.1,

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

onde:

MV – massa volúmica aparente da argamassa no estado fresco (kg/m^3)

m_2 – massa do recipiente com argamassa (kg)

m_1 – massa do recipiente (kg)

V – volume do recipiente (1 L) (m^3)

3.7. Exposição a temperaturas elevadas

Após a desmoldagem, cumprido o processo de cura de 28 dias, e depois de apresentarem massa constante, os provetes foram colocados numa câmara térmica *Tinius Olsen Environmental Chamber* (figura 3.10), onde foram expostos às diferentes temperaturas alvo. Após vários testes preliminares, foi possível programar a câmara de forma a garantir uma taxa de aquecimento aproximada de $2,5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ e uma taxa de arrefecimento aproximada de $-1,5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$. Estes valores reduzidos das taxas de aquecimento e arrefecimento procuraram minimizar a introdução de tensões internas devido às variações (gradientes) de temperatura (figura 3.11). Os provetes permaneceram na temperatura-alvo durante uma hora para permitir a uniformização do aquecimento do provete. Para isso, teve de se construir uma estrutura metálica em aço, de forma a possibilitar a colocação dos provetes no interior da câmara, tendo sido garantida uma distância de pelo menos 3 cm entre provetes durante o ensaio (figura 3.10 – dta.).

Cada argamassa foi submetida às seguintes quatro temperaturas alvo na câmara térmica: $100 \text{ }^\circ\text{C}$, $150 \text{ }^\circ\text{C}$, $200 \text{ }^\circ\text{C}$ e $250 \text{ }^\circ\text{C}$. Tendo em conta a o número de ensaios e a quantidade de provetes a ensaiar, as quatro temperaturas-alvo foram escolhidas atendendo à capacidade térmica máxima da câmara (300°C) de forma garantir condições de exposição semelhantes a ambientes industriais ou relativamente a situações de proximidade de incêndios. Após exposição às temperaturas elevadas, as argamassas foram novamente colocadas em câmara condicionada durante 24 h. Em seguida, foram realizados todos os ensaios no estado endurecido, para as argamassas aos 28 dias de idade à temperatura média ambiente de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e para as

argamassas submetidas às temperaturas elevadas. Deste modo, foi possível medir e avaliar a influência do aumento da temperatura nas propriedades das argamassas.



Figura 3.10 - Equipamento *Tinius Olsen Environmental Chamber* antes e durante o ensaio (à esq. e ao centro); estrutura metálica construída para suporte dos provetes durante exposição a temperaturas elevadas (à dta.)

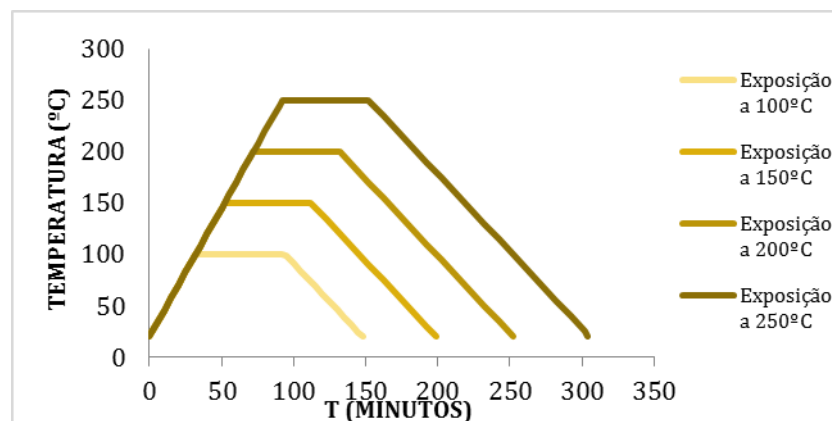


Figura 3.11 – Curvas de exposição térmica definidas na câmara térmica para cada temperatura-alvo

3.8. Ensaios realizados em estado endurecido

3.8.1. Massa volúmica aparente no estado endurecido

A massa volúmica aparente no estado endurecido foi determinada através do princípio geométrico estabelecido na norma EN 1015-10 A1 (CEN, 1999), tendo sido seguido o seguinte procedimento:

- medição das dimensões reais de cada provete recorrendo a uma craveira, pois os provetes apresentam muitas vezes algum esfrelamento; a medição da largura e espessura é feita 3 vezes, considerando-se como valor final a média das 3 medições;
- pesagem dos provetes numa balança com precisão de $\pm 0,1$ g.

Após medição dos provetes, calcula-se o seu volume multiplicando as dimensões obtidas (equação 3.2),

$$V = b \times t \times l \quad (3.2)$$

onde:

V – volume dos provetes (m^3);

l – comprimento médio dos provetes (m);

b – largura média dos provetes (m);

t – espessura média dos provetes (m).

Determinados os valores do volume e da massa dos provetes, calcula-se então a massa volúmica (kg/m^3) pelo quociente entre a massa dos provetes (kg) e o volume dos provetes (m^3).

3.8.2. Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas

O ensaio para determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas foi realizado em provetes prismáticos segundo a norma EN 12504-4 (CEN,2004). Trata-se de uma norma referente ao betão, no entanto, é aplicável também em argamassas. Utilizou-se um equipamento da marca *Proceq Pundit Lab+* (figura 12 – esq.), com transdutores de frequência de 54 kHz e vaselina como material de contacto entre os dois materiais (figura 12 - centro).

Segundo a norma, pode-se realizar o ensaio pelo método directo, semi-directo e indirecto; para o estudo em causa apenas se utilizou o método directo, em que os transdutores são aplicados em faces opostas da amostra a ensaiar. O procedimento (adaptado de EN 12504-4 (CEN, 2004)) cumprido no ensaio foi o seguinte:

- calibração prévia do aparelho com uma barra própria para este efeito, com um tempo de propagação conhecido ($25 \mu s$), fazendo-se coincidir este valor com aquele que é mostrado pelo aparelho;
- aplicação do material de contacto (vaselina ou dentrífico) nos transdutores e posicionamento destes em cada extremidade do provete a ensaiar, de forma a garantir a uniformização da superfície de contacto entre os transdutores e o provete;
- registo de 3 medições do tempo de propagação das ondas (μs) para cada provete (figura 12 – dta.) no final de cada ensaio, limpeza cuidada da vaselina em excesso nos provetes e nos transdutores



Figura 3.12 – Equipamento *Pundit Lab+* (à esq.); aplicação de material de contacto nos transdutores (ao centro); medição do tempo de propagação das ondas ultra-sónicas (à dta.)

O tempo de propagação das ondas corresponde à média das 3 medições para cada provete. Através deste valor, calcula-se a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas (m/s) nos provetes pelo quociente entre o comprimento do provete (mm) e o tempo de propagação das ondas ultra-sónicas (μ s).

3.8.3. Módulo de elasticidade dinâmico, módulo de torção e coeficiente de *Poisson*

O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado de acordo com o especificado na norma ASTM E1876-01 (ASTM, 2006). É um ensaio baseado na leitura da frequência de ressonância dos modos de vibração à flexão e à torção; para isso, utilizou-se o equipamento *GrindoSonic MK5 "Industrial"* (figura 3.13 – esq.), composto por um sensor e um sistema electrónico que captam as vibrações introduzidas pelo choque de uma baqueta de peso normalizado.

O procedimento (adaptado de E1876-01 (ASTM, 2006) e do manual de instruções do aparelho) seguido no ensaio para a obtenção da frequência de ressonância do modo de vibração à flexão nos provetes prismáticos foi o seguinte:

- apoio do provete nos pontos nodais fundamentais, a uma distância de $0,224L$ de cada extremo, sendo L o comprimento do provete;
- colocação do sensor em contacto com o provete numa das faces laterais, alinhado com o suporte;
- pancada com a baqueta no centro da face superior do provete e registo do resultado (figura 3.13 - centro)

O teste é repetido até se obterem 5 leituras consecutivas que não variem mais de 1% entre si. O valor da frequência de ressonância é dado pela média destas 5 medições.

O procedimento (adaptado de E1876-01 (ASTM, 2006) e do manual de instruções do aparelho) seguido no ensaio para a obtenção da frequência de ressonância do modo de vibração à torção nos provetes prismáticos foi o seguinte:

- apoio do provete ao longo do seu comprimento e atravessado transversalmente sobre os suportes;
- colocação do sensor em contacto com o provete na face superior (figura 3.13 – dta.), alinhado com o suporte, aproximadamente a uma distância de $0,25L$ da extremidade do provete, sendo L o comprimento do provete;
- pancada com a baqueta na face superior do provete, sobre os pontos nodais de flexão e junto à aresta do provete e registo do resultado.



Figura 3.13 – Equipamento *GrindoSonic MK5* (à esq.); ensaio para a obtenção da frequência de vibração à flexão (ao centro); ensaio para a obtenção da frequência de vibração à torção (à dta.)

Através da equação 3.3 (ASTM, 2006), calcula-se o módulo de elasticidade dinâmico de uma peça rectangular, aplicável aos provetes em estudo:

$$E_d = 0,9465 \times \frac{mf_f^2 L}{b} \times \frac{L^3}{t^3} \times T_1 \quad (3.3)$$

onde:

E_d – módulo de elasticidade dinâmico (Pa);

m – massa do provete (g);

b – largura do provete (mm);

L – comprimento do provete (mm);

t – espessura do provete (mm);

f_f – frequência fundamental de ressonância do modo de vibração à flexão (Hz);

T_1 – factor correctivo para o modo de flexão fundamental, que tem em conta a espessura finita do provete e o coeficiente de *Poisson*, e que pode ser calculado pela equação 3.6,

$$T_1 = 1 + 6,585(1 + 0,0752\mu + 0,8109\mu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^2 - 0,868 \left(\frac{t}{L}\right)^4 - \left(\frac{8,340(1 + 0,2023\mu + 2,173\mu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^4}{1 + 6,338(1 + 0,1408\mu + 1,536\mu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^2} \right) \quad (3.4)$$

em que μ é o coeficiente de *Poisson*. Como à partida o valor do coeficiente *Poisson* é ainda desconhecido, este processo é obrigatoriamente um processo iterativo. Assim, é seguido o método descrito na norma ASTM E1876-01, que consiste em calcular, primeiramente, o módulo de torção dinâmico para obter a frequência fundamental de vibração à torção (equação 3.5),

$$G_d = \frac{4 L m f_t^2}{bt} \left(\frac{B}{1+A} \right) \quad (3.5)$$

onde:

G_d – módulo de torção dinâmico (Pa);

f_t – frequência fundamental de ressonância do modo de vibração à torção (Hz);

A e B – factores de correcção empíricos dependentes da relação largura/espessura, dados respectivamente pelas equações 3.8 e 3.9:

$$B = \frac{b/t + t/b}{t \left(\frac{t}{b}\right) - 2,52 \left(\frac{t}{b}\right)^2 + 0,21 \left(\frac{t}{b}\right)^3} \quad (3.6)$$

$$A = \frac{0,5062 - 0,8776 \left(\frac{b}{r}\right) + 0,3504 \left(\frac{b}{r}\right)^2 - 0,0078 \left(\frac{b}{r}\right)^3}{12,03 \left(\frac{b}{r}\right) + 9,892 \left(\frac{b}{r}\right)^2} \quad (3.7)$$

Obtido o módulo de torção G, pode calcular-se em seguida o módulo de elasticidade dinâmico E através da equação 3.3. Em seguida, calcula-se o coeficiente de *Poisson* através da equação 3.8,

$$\mu = \frac{E_d}{2G_d} - 1 \quad (3.8)$$

onde:

μ – coeficiente de *Poisson*;

E_d – módulo de elasticidade dinâmico (Pa);

G_d – módulo de torção (Pa).

Após calculado este primeiro valor do coeficiente de *Poisson*, pode repetir-se o processo, calculando-se novos valores de E_d , G_d e μ até se obterem valores com uma diferença relativa menor que 2% para o coeficiente de *Poisson* e, consecutivamente, para os módulos de elasticidade e de torção. Quando não foi possível obter uma diferença relativa menor do que os 2%, considerou-se por defeito um coeficiente de *Poisson* de 0,3; este é o valor considerado pelo *software* (*Genemod*).

Os valores dinâmicos do módulo de elasticidade, módulo de torção e coeficiente de *Poisson* foram também obtidos através do *software* específico do aparelho de ensaio (*Genemod*), tendo sido comparados estes resultados com os que se obtêm através da aplicação das equações fornecidas pela norma.

3.6.4. Propriedades mecânicas estáticas

Foram realizados ensaios para determinação da resistência à compressão e, paralelamente, ensaios para determinação da resistência à tracção por flexão e do módulo de elasticidade estático. Os ensaios de compressão e à flexão foram realizados com recurso a um equipamento *Seidner Form+Test (modelo 505/200/10DM1)* com células de carga de 10 kN e 200 kN, respectivamente. Para a determinação do módulo de elasticidade, foi também utilizado um deflectómetro eléctrico, tendo sido utilizado um *data logger Spider8* e o *software Catman Express 4.0* para efectuar o registo do deslocamento do provete a meio vão e da força aplicada pela máquina.

Nestes ensaios foram utilizados os provetes prismáticos de 160x40x40 mm, tendo sido estes os últimos ensaios da campanha a ser efectuados devido ao seu carácter destrutivo.

Os procedimentos do ensaio de flexão (figura 3.14) e do ensaio de compressão (figura 3.15) foram realizados com base na norma EN 1015-11 (CEN, 1999).

No entanto e devido a uma anomalia no *data logger* e no *software Catman Express 4.0*, o registo das leituras dos ensaios compressão e de flexão, em que se pretendia determinar a resistência compressão e à

tracção por flexão e o módulo de elasticidade estático, não foram consideradas fiáveis e, por isso, não foram consideradas neste estudo.



Figura 3.14 - Esquema do ensaio à tração por flexão (EN 1015-11 (CEN, 1999)) (à esq.); ensaio de resistência à flexão por tracção (ao centro e à dta.)



Figura 3.15 - Ensaio de resistência à compressão

Pelas razões já enunciadas, os resultados de resistência à compressão a considerar foram calculados de forma directa e não destrutiva através da equação 3.9 obtida por Soares *et al.* (2015) para argamassas térmicas. Esta equação permite relacionar a resistência à compressão com o módulo de elasticidade dinâmico,

$$R_c = 0,0364 \times E_d^{0,5932} \quad (4.2)$$

onde:

R_c – resistência à compressão (MPa);

E_d – módulo de elasticidade dinâmico (MPa).

3.6.5. Condutibilidade térmica

Para a realização do ensaio de determinação da condutibilidade térmica, utilizou-se o equipamento *Isomet 2114* (figura 3.16), seguindo-se o manual de instruções do equipamento e a norma ASTM C518. O ensaio é realizado com recurso a uma sonda de superfície colocada sobre a superfície do provete, que analisa a

resposta térmica do material aos impulsos térmico transmitidos pela sonda.

Os ensaios foram realizados apenas nos provetes cilíndricos de diâmetro de 60 mm e 20 mm de espessura à temperatura ambiente de 20°C. Nestes ensaios, a superfície dos provetes deve-se encontrar o mais plana possível de forma a maximizar a superfície de contacto com a sonda. Com o objectivo de minimizar o efeito da variação brusca da temperatura e da humidade ambiente, os provetes foram embrulhados em película aderente e colocados sobre uma placa de EPS 12 h antes da realização do ensaio.



Figura 3.16 – Equipamento *ISOMET 2114* utilizado para ensaio de condutibilidade térmica

Por necessidade de utilização de frequências de impulso térmico mais baixas para determinação da condutibilidade térmica das argamassas térmicas em estudo, este ensaio teve durações superiores ao esperado (entre 1 a 2 horas). Devido à elevada duração necessária para a realização deste ensaio e ao elevado número de provetes a ensaiar, foram apenas escolhidas algumas das temperaturas alvo: 20 °C (controlo), 150 °C e 250 °C. Foi também excluída deste ensaio a argamassa $G^{res10\%}$ (argamassa de areia com 10% de resina) devido à sua elevada heterogeneidade e segregação, que teriam inviabilizado a obtenção de resultados fidedignos com o aparelho.

3.7. Síntese do capítulo

Na presente campanha experimental, foram produzidas sete argamassas, quatro das quais de controlo e três de desempenho térmico melhorado. Para cada argamassa, produziram-se dois provetes cilíndricos de 60 mm de diâmetro e 20 mm de espessura e cinco (ou três, no caso das argamassas de aerogel) provetes prismáticos de 40x40x160 mm.

As argamassas foram inicialmente caracterizadas no estado fresco; em seguida, foram expostas numa câmara térmica a diferentes temperaturas-alvo, compreendidas entre 20 °C e 250 °C; e, finalmente, o efeito dessa exposição térmica nas suas propriedades no estado endurecido foi avaliada através de vários ensaios.

Os ensaios no estado fresco foram realizados imediatamente após a produção das argamassas, tendo-se determinado a consistência por espalhamento e a massa volúmica. A caracterização no estado endurecido, realizada à temperatura média ambiente (20 °C) aos 28 dias de idade e após a exposição às diferentes temperaturas elevadas (100 °C, 150 °C, 200 °C e 250 °C), incluiu ensaios para a determinação da massa

volúmica, velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, módulo de elasticidade dinâmico, módulo de torção, coeficiente de *Poisson*, resistência à compressão, resistência à tracção por flexão, módulo de elasticidade estático e condutibilidade térmica. Na tabela 3.5 apresenta-se o número de ensaios realizados no estado endurecido.

Tabela 3.5 – Número de provetes ensaiados no estado endurecido para as várias temperaturas

Argamassas	Características					
	MV - mét. geométrico	V	Ed; Gd; γ	Rc	Rt; Ee	λ
	EN 1015-10	EN 12504-4	ASTM E1876-01	EN1015-11	EN1015-11	ASTM C518
A ^{AE} _{controlo} , A ^{AE} _{100°C} , A ^{AE} _{150°C} , A ^{AE} _{200°C} , A ^{AE} _{250°C}	25	25	25	25	25	6
B ^{GC} _{controlo} , B ^{GC} _{100°C} , B ^{GC} _{150°C} , B ^{GC} _{200°C} , B ^{GC} _{250°C}	25	25	25	25	25	6
C ^{AERO} _{controlo} , C ^{AERO} _{100°C} , C ^{AERO} _{150°C} , C ^{AERO} _{200°C} , C ^{AERO} _{250°C}	25	25	25	25	25	6
D ^{REF} _{controlo} , D ^{REF} _{100°C} , D ^{REF} _{150°C} , D ^{REF} _{200°C} , D ^{REF} _{250°C}	25	25	25	25	25	6
E ^{CT} _{controlo} , E ^{CT} _{100°C} , E ^{CT} _{150°C} , E ^{CT} _{200°C} , E ^{CT} _{250°C}	25	25	25	25	25	6
F ^{5%RES} _{controlo} , F ^{5%RES} _{100°C} , F ^{5%RES} _{150°C} , F ^{5%RES} _{200°C} , F ^{5%RES} _{250°C}	25	25	25	25	25	6
G ^{10%RES} _{controlo} , G ^{10%RES} _{100°C} , G ^{10%RES} _{150°C} , G ^{10%RES} _{200°C} , G ^{10%RES} _{250°C}	25	25	25	25	25	-
Total	175	175	175	175	175	36

Legenda: MV – massa volúmica; V – velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas; Ed – módulo de elasticidade dinâmico; Gd – módulo de torção dinâmico; ν – coeficiente de *Poisson*; Rc – resistência à compressão; Rt – resistência à tracção por flexão; Ee – módulo de elasticidade estático; λ – condutibilidade térmica

4. Apresentação e discussão dos resultados

4.1. Considerações gerais

Neste capítulo, apresenta-se e discute-se os resultados obtidos na campanha experimental, com o objectivo de avaliar (i) as características das argamassas quando submetidas a temperaturas elevadas e (ii) a influência dessa exposição para cada tipo de argamassa de comportamento térmico melhorado. No presente capítulo procura-se também correlacionar os resultados obtidos nos vários ensaios para caracterizar de forma mais completa possível estas argamassas. Sempre que possível, os resultados são comparados com estudos de outros autores.

4.2. Caracterização das argamassas no estado fresco

4.2.1. Massa volúmica aparente

Determinou-se a massa volúmica aparente em estado fresco a seguir à produção das argamassas. Por questões de controlo, foram apenas ensaiadas as argamassas correspondentes às argamassas de temperatura de controlo (1ª produção) e as argamassas produzidas para serem submetidas à temperatura de 150 °C (3ª produção) e à temperatura de 250 °C (5ª produção). Na tabela 4.1 apresentam-se os resultados médios obtidos, a par do desvio padrão (DP) e do coeficiente de variação (CV).

Tabela 4.1 – Massa volúmica aparente no estado fresco

Argamassa	Massa volúmica (kg/m ³)				DP (kg/m ³)	CV
	1ª produção (20 °C)	3ª produção (150 °C)	5ª produção (250 °C)	Média		
A ^{AE}	841	881	834	852	25	3%
B ^{GC}	709	719	735	721	13	2%
C ^{aero}	541	449	485	492	46	9%
D ^{ref}	1962	1920	1969	1950	27	1%
E ^{ct}	1647	1723	1505	1625	111	7%
F ^{res5%}	2024	1823	1955	1934	102	5%
G ^{res10%}	1805	1928	1725	1819	102	6%

Legenda: DP – desvio-padrão; CV – coeficiente de variação

Os resultados obtidos mostram que os valores da massa volúmica de cada argamassa no estado fresco não

apresentam variações muito significativas entre produções, sendo válido considerar um valor médio para todas as produções. As maiores variações entre resultados correspondem às argamassas C^{aero} e E^{ct} (CV de 9% e 7% respectivamente), devido à influência dos adjuvantes (éter de celulose e introdutores de ar). Também se observa que as argamassas com a presença de resina são das que apresentam uma maior variabilidade (CV ente 5% e 6%). Apesar da pequena dosagem de adjuvantes, introduz-se variabilidade no processo de produção e mistura das argamassas.

Apresenta-se na figura 4.1 uma síntese das massas volúmicas médias no estado fresco das argamassas estudadas e a diminuição da massa volúmica média em relação à argamassa de referência, com 100% de agregado de areia (D^{ref}), apresentando todas as argamassas a mesma curva granulométrica para comparação directa.

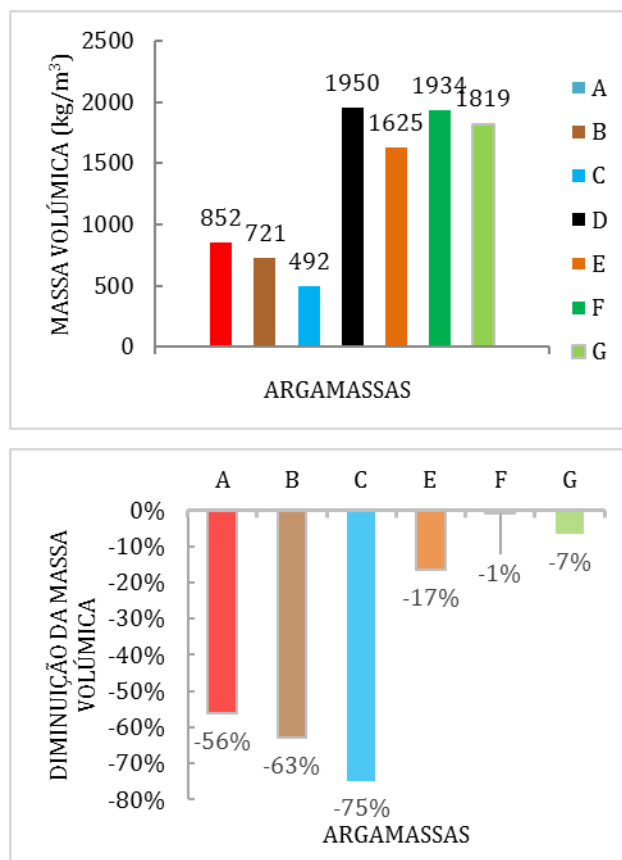


Figura 4.1 – Massa volúmica no estado fresco das argamassas em estudo (à esq.); variação (em %) da massa volúmica no estado fresco relativamente à argamassa D^{ref}

Os valores da massa volúmica média das diferentes argamassas ensaiadas variam entre 492 e 1950 kg/m³. A substituição da areia por agregados isolantes (A a C) provocou uma redução na massa volúmica entre 56% a 75%; a introdução dos adjuvantes (E a G) provocou uma redução da massa volúmica de 1% a 17% por comparação com a argamassa de referência, D^{ref}.

Tal como seria de prever, os valores mais elevados de massa volúmica correspondem às argamassas com a utilização de areia como agregado. A argamassa de referência, D^{ref} , com um valor de massa volúmica médio de 1950 kg/m^3 apresentou resultados semelhantes aos obtidos em outros estudos. Arroba (2011) e Gonçalves (2010), para argamassas com traço volumétrico de 1:4, mas com curvas granulométricas desconhecidas, obtiveram valores de 2056 e 2034 kg/m^3 , respectivamente. Em relação ao estudo de Afonso (2015), para o mesmo traço volumétrico e a mesma granulometria (curva 2, capítulo 3), foi obtido um valor da mesma ordem de grandeza para o caso dos provetes prismáticos (2089 kg/m^3).

Quanto às argamassas de areia com adjuvantes, E^{ct} , $F^{5\%res}$ e $G^{10\%res}$, apresentam valores médios de 1625 , 1934 e 1819 kg/m^3 respectivamente, valores inferiores aos da argamassa D^{ref} , sem adjuvantes. Na argamassa E^{ct} , a presença dos introdutores de ar na mistura levou à redução da sua compactidade e à consequente diminuição de massa volúmica. Quanto às argamassas com resina, tendo em conta a sua variabilidade, não houve alterações significativas na sua massa volúmica.

A argamassa com argila expandida (A^{AE}) (852 kg/m^3) apresenta uma redução de massa volúmica de cerca de 56% face à argamassa de agregado de areia (D^{ref}). Este resultado não é directamente comparável com outros estudos devido à diferente composição desta argamassa. De acordo com Afonso (2015), a massa volúmica obtida para este tipo de argamassa com adjuvantes (100% de agregado de argila expandida) foi cerca de 750 kg/m^3 .

A argamassa de granulado de cortiça expandida (B^{GC}) (721 kg/m^3) apresenta uma redução de massa volúmica de cerca de 63% face à argamassa de agregado de areia (D^{ref}). Melo (2014) e Vale (2014), para uma argamassa com substituição de 70% a 80% de agregado de cortiça expandida, obtiveram uma massa volúmica no estado fresco de 1016 kg/m^3 , valor superior ao obtido neste estudo, devido, em grande parte, ao facto de 20% a 30% dos seus agregados serem de areia em vez de granulado de cortiça expandida, aumentando substancialmente o valor da massa volúmica. Também Afonso (2015) obteve um valor de massa volúmica de 541 kg/m^3 , mas para argamassas com adjuvantes introdutores de ar na mistura, levando à consequente diminuição da massa volúmica por redução de compactidade.

Por fim, a argamassa de aerogel (C^{AERO}) apresenta um valor de massa volúmica de 492 kg/m^3 e uma redução de 75% face à argamassa de agregado de areia (D^{ref}). Para o mesmo tipo de argamassa, Afonso (2015) obteve um valor de 657 kg/m^3 , cerca de 34% superior, mas para uma relação a/c inferior (0,66).

4.2.2. Consistência por espalhamento

Na tabela 4.2 apresentam-se os resultados médios (e as respectivas medidas de variabilidade) obtidos para o ensaio de consistência por espalhamento.

Os valores de espalhamento das argamassas estudadas estão dentro dos intervalos previstos na norma EN 1015-2 (CEN, 1998), tendo em conta as suas massas volúmicas. Através de um processo de tentativa e erro,

foram definidas as relações a/c que permitissem uma aproximação dos valores de espalhamento experimentais aos previstos pela norma.

Tabela 4.2 – Valores de espalhamento obtidos

Argamassa	Espalhamento (mm)						CV
	Relação a/c	1ª produção (20 °C)	3ª produção (150 °C)	5ª produção (250 °C)	Média	DP (mm)	
A ^{AE}	0,9	160	164	170	165	5	3%
B ^{GC}	1	148	151	154	151	3	2%
C ^{aero}	0,9	168	148	153	156	10	7%
D ^{ref}	0,65	172	173	174	173	1	1%
E ^{ct}	0,55	154	160	166	160	6	4%
F ^{res5%}	0,65	170	-	-	170	-	-
G ^{res10%}	0,65	161	164	178	168	9	5%

Quanto às argamassas de desempenho térmico melhorado (A^{AE} e B^{GC}), estas apresentam um valor de espalhamento inferior ao da argamassa de referência, entre 8 a 22 mm respectivamente.

Comparando os valores das argamassas em que se utilizaram adjuvantes (E^{CT}, F^{5%res} e G^{10%res}), com a argamassa de referência com 100% de areia (D^{ref}), verifica-se que a sua presença provocou uma diminuição do espalhamento.

A argamassa de aerogel foi a que apresenta um maior coeficiente de variação (7%), em grande parte devido à presença dos introdutores de ar na sua composição.

No presente estudo, é também necessário ter em conta que, devido à presença dos adjuvantes (introdutores de ar e resina), a trabalhabilidade das argamassas pode variar rapidamente após a produção, havendo a possibilidade de perda de trabalhabilidade entre medições, consoante o tempo de repouso cumprido.

4.3. Observações visuais durante e após a exposição a temperaturas elevadas

Para as argamassas expostas às temperaturas mais elevadas (150 °C, 200 °C e 250 °C), verificou-se a ocorrência de condensações no interior da câmara (figura 4.2 – esq.). Estas condensações ocorrem devido à evaporação da água proveniente da humidade ambiente ainda presente nos provetes estudados (Lion *et al.*, 2005).

Em geral, não foi visível retracção nos provetes produzidos e foi possível observar a existência de uma ligeira expansão dos provetes da argamassa de granulado de cortiça expandida.

Verificou-se também o escurecimento dos provetes das argamassas B^{GC}, C^{AERO} e E^{CT} após a exposição à temperatura de 250 °C. Segundo Esteves (2010), a cortiça quando exposta a temperaturas superiores a 250 °C

apresenta um escurecimento acentuado. Na figura 4.2 – dta. observa-se o escurecimento de um provete cilíndrico da argamassa C^{AERO} após ter sido submetido à temperatura de 250 °C em comparação com um provete à temperatura de controlo.

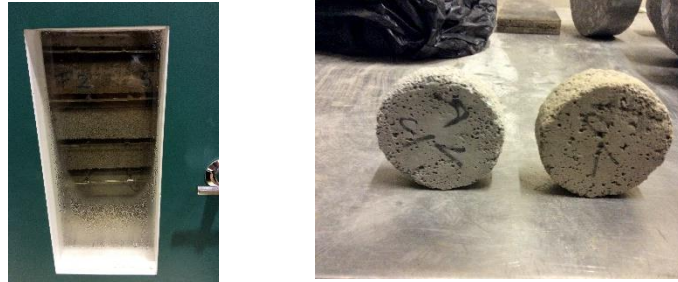


Figura 4.2 – Condensações no interior da câmara térmica aquando do ensaio (à esq.); escurecimento dos provetes após submetidos à temperatura de 250 °C (à dta.)

4.4. Caracterização das argamassas no estado endurecido

4.4.1. Massa volúmica aparente no estado endurecido

Na tabela 4.3, apresenta-se os valores da massa volúmica aparente no estado endurecido calculados através do método geométrico para cada provete ensaiado (5 por argamassa). Obtiveram-se valores de coeficientes de variação relativamente reduzidos para as argamassas estudadas (iguais ou inferiores a 5%). No anexo A.2 apresenta-se os resultados individuais de cada ensaio.

Obtiveram-se valores de massa volúmica no estado endurecido para a argamassa de referência (D^{ref}) à temperatura de controlo de 1730 kg/m³, valor ligeiramente inferior ao obtido por Afonso (2015), que reportou uma massa volúmica de 1787 kg/m³. Estes valores são inferiores aos obtidos por Vale (2014) (2105 kg/m³), para uma curva granulométrica com maior percentagem de finos (curva de “Mesquita”). As restantes argamassas de areia com adjuvantes apresentam valores semelhantes, correspondendo os valores mais reduzidos à argamassa de areia com éter celulose e introdutores de ar (tensioactivos), o que se justifica pelo facto de esta ser a argamassa menos compacta devido à introdução de ar, que aumenta o número de vazios (Gominho, 2016).

Relativamente às argamassas com agregados isolantes térmicos, à temperatura de controlo, para a argamassa de argila expandida (A^{AE}) obteve-se o valor médio de 737 kg/m³ e para a argamassa de granulado de cortiça (B^{GC}) obteve-se o valor médio de 432 kg/m³. No entanto, para estas argamassas, a introdução de adjuvantes na sua constituição leva à diminuição da sua compacidade: Afonso (2015) obteve valores médios inferiores de 669 e 408 kg/m³.

Em relação à argamassa de aerogel, obteve-se o valor médio de 462 kg/m³, semelhante ao obtido para a argamassa com granulado de cortiça. Para uma argamassa de aerogel semelhante, Afonso (2015) obteve o valor de massa volúmica aparente em estado endurecido através do método geométrico de 508 kg/m³.

Apresentam-se nas figuras 4.3 e 4.4 a síntese das massas volúmicas das argamassas térmicas e das argamassas com agregado de areia e a variação (em %) da massa volúmica das argamassas após serem submetidas a temperaturas elevadas em relação às argamassas de temperatura de controlo. Relativamente aos efeitos da exposição a temperaturas elevadas, é necessário ter em conta a variabilidade deste ensaio aumentando para o caso da utilização do método geométrico (Gominho, 2016).

Assim, avaliando os efeitos da exposição da argamassa de argila expandida (A^{AE}) às temperaturas elevadas, observam-se variações entre -12 e 7%, considerando-se pouco significativa a influência das temperaturas elevadas nesta argamassa em relação à massa volúmica. O valor mais reduzido obtido foi de 648 kg/m³ para a temperatura de 150 °C.

Tabela 4.3 – Massa volúmica no estado endurecido das argamassas produzidas

Temperatura (°C)	A ^{AE}			B ^{GC}			C ^{aero}		
	MV média (kg/m ³)	DP (kg/m ³)	CV	MV média (kg/m ³)	DP (kg/m ³)	CV	MV média (kg/m ³)	DP (kg/m ³)	CV
20	737	22	3%	432	13	3%	462	7	1%
100	682	12	2%	472	20	4%	684	13	2%
150	648	24	4%	443	16	4%	375	8	2%
200	748	7	1%	470	7	2%	437	5	1%
250	788	21	3%	448	24	5%	346	4	1%

Temperatura (°C)	D ^{ref}			E ^{ct}			F ^{res5%}		
	MV média (kg/m ³)	DP (kg/m ³)	CV	MV média (kg/m ³)	DP (kg/m ³)	CV	MV média (kg/m ³)	DP (kg/m ³)	CV
20	1730	31	2%	1590	25	2%	1806	33	2%
100	1711	29	2%	1597	23	1%	1853	25	1%
150	1760	23	1%	1575	42	3%	1734	18	1%
200	1858	25	1%	1624	15	1%	1822	34	2%
250	1836	11	1%	1528	55	4%	1854	33	2%

Temperatura (°C)	G ^{res10%}		
	MV média (kg/m ³)	DP (kg/m ³)	CV
20	1749	37	2%
100	1883	46	2%
150	1756	46	3%
200	1793	19	1%
250	1854	33	2%

Legenda: MV – massa volúmica; DP – desvio-padrão; CV – coeficiente de variação

Relativamente aos efeitos das temperaturas elevadas nas argamassas de granulado de cortiça expandida (B^{GC}), através da análise da figura 4.3, e com variações entre 2 e 9%, conclui-se que esta argamassa é pouco sensível à variação de temperatura. Apresenta o valor mais reduzido para a temperatura de 150 °C, com um aumento de 2% face à mesma argamassa à temperatura de controlo.

Quanto à argamassa de aerogel (C^{AERO}), temperaturas de exposição a partir de 150 °C traduzem-se em reduções de massa volúmica entre 5 a 25%, obtendo-se o valor mais reduzido (346 kg/m³) para a argamassa exposta à temperatura de 250 °C (o valor obtido para 100 °C será muito provavelmente anómalo, por corresponder a um aumento muito significativo da massa volúmica). Devido à estabilidade e elevada resistência à temperatura do agregado, considera-se que possivelmente, a presença dos introdutores de ar que exigem o aumento da quantidade de água de amassadura, e o efeito das temperaturas elevadas responsáveis pela evaporação da água, levam a um aumento de porosidade (aumento no número e dimensão de vazios) e consequente diminuição da massa volúmica da argamassa (Riffat *et al.*, 2014; Skantz, 2014)

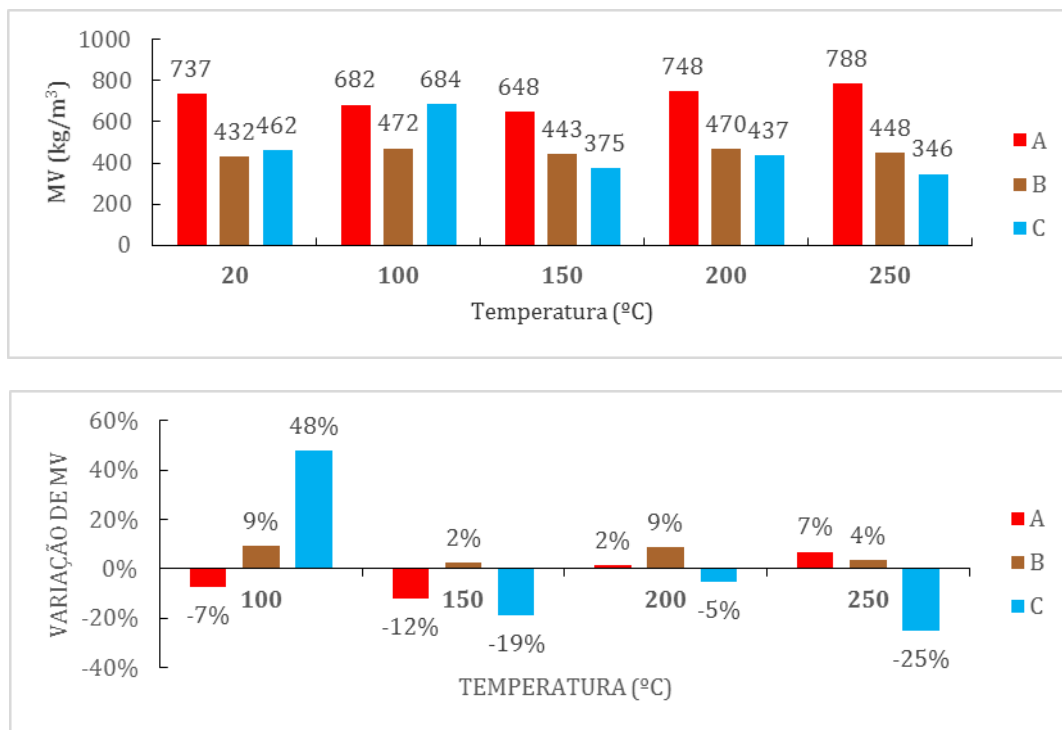


Figura 4.3 – Massa volúmica aparente em estado endurecido das argamassas térmicas (em cima); variação (em %) da massa volúmica aparente em estado endurecido das argamassas térmicas submetidas a temperaturas elevadas relativamente à temperatura de controlo, 20 °C (em baixo)

Analisando as argamassas com agregado de areia (figura 4.4), conclui-se que o efeito da exposição a temperaturas elevadas tem reduzida influência na variação da massa volúmica das mesmas. As argamassas com agregado de areia, apresentam variações, face às argamassas que não foram expostas a temperaturas elevadas, entre -1% e 7% para a argamassa D^{ref} ; -4% e 2% para a argamassa E^{CT} ; -4% e 3% para a argamassa $F^{5\%res}$; e 3% e 8% para a argamassa $G^{10\%res}$.

Pode concluir-se que a exposição das argamassas estudadas a temperaturas elevadas (para a gama de temperaturas analisada) é pouco significativa em termos de variação da massa volúmica em estado endurecido, excepto para o caso da argamassa de aerogel, em que se obteve uma redução de cerca 25% para a temperatura de 250 °C.

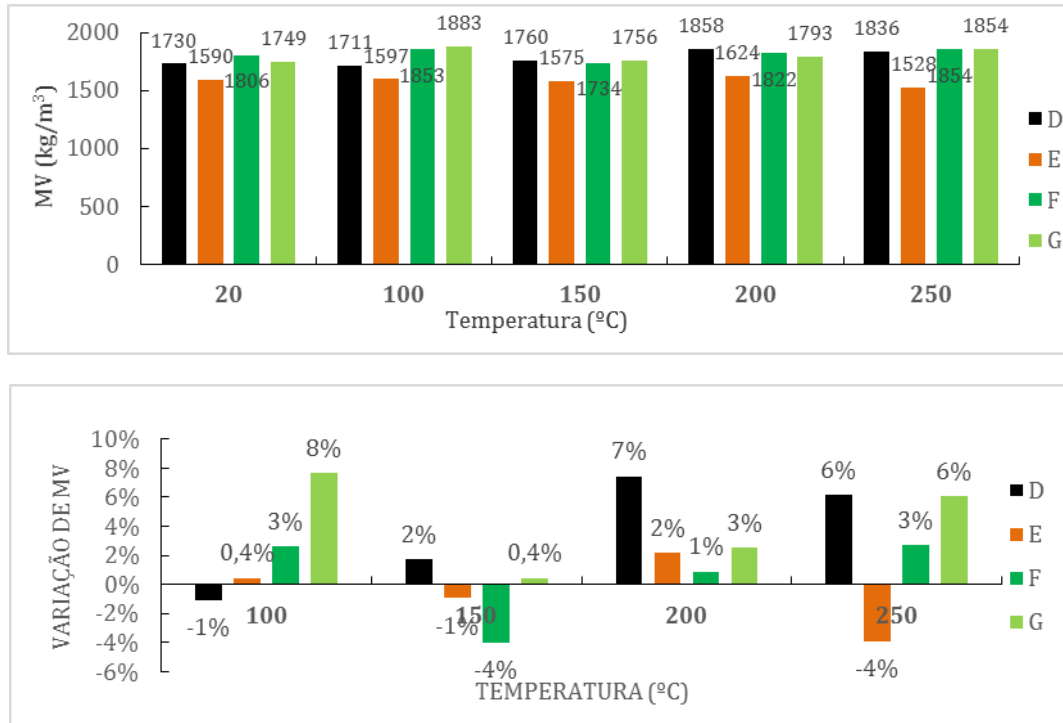


Figura 4.4 – Massa volúmica aparente em estado endurecido das argamassas com agregado de areia (em cima); variação (em %) da massa volúmica aparente em estado endurecido das argamassas com agregado de areia submetidas a temperaturas elevadas relativamente à temperatura de controlo, 20 °C (em baixo)

4.4.2. Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas

Os resultados médios dos ensaios de velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas realizados com recurso ao equipamento PUNDIT utilizando os transdutores de 54 kHz, encontram-se listados na tabela 4.4, tendo sido ensaiado um total de 5 provetes por argamassa pelo método directo. Os resultados individuais de cada ensaio encontram-se no anexo A.3.

A estimativa da resistência de uma argamassa baseia-se no princípio de que materiais mais compactos apresentam velocidades de propagação de ondas e valores de resistência mais elevados. Assim, é possível avaliar o estado de compacidade das argamassas, a quantidade de vazios e, consequentemente, o seu estado de degradação interior.

Os valores da velocidade de propagação média de ondas ultra-sónicas das diferentes argamassas de controlo variam entre 994 e 3474 m/s. A utilização de agregados isolantes traduz-se numa redução entre 23% e 68%

da velocidade de propagação das ondas, face à argamassa de referência (100% de areia). Quanto às argamassas de areia com introdução de adjuvantes, obteve-se uma diminuição de 17% para a argamassa com éter de celulose e tensoactivos (E^{CT}) e, pelo contrário, um aumento entre 9% e 13% para as argamassas com 5% e 10% de resina respectivamente. No caso da argamassa de areia com éter de celulose e tensoactivos (E^{CT}), esta variação (tal como no caso da massa volúmica aparente) deve-se em grande parte ao efeito dos agentes introdutores de ar, levando a um aumento do índice de vazios na mistura e à consequente diminuição da velocidade de propagação (Magalhães *et al.*, 2003).

Tabela 4.4 – Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas

Temperatura (°C)	AAE			BGC			Caero		
	V _m (m/s)	DP (m/s)	CV	V _m (m/s)	DP (m/s)	CV	V _m (m/s)	DP (m/s)	CV
20	2379	64	2,7%	994	48	4,8%	1094	7	0,6%
100	2201	28	1,3%	1112	41	3,7%	968	30	3,1%
150	2065	26	1,3%	1083	27	2,5%	973	1	0,1%
200	2279	58	2,5%	1020	48	4,7%	837	38	4,6%
250	2335	71	3,0%	1072	42	3,9%	813	26	3,2%

Temperatura (°C)	D ^{ref}			E ^{ct}			F ^{res5%}		
	V _m (m/s)	DP (m/s)	CV	V _m (m/s)	DP (m/s)	CV	V _m (m/s)	DP (m/s)	CV
20	3081	39	1,3%	2551	38	1,5%	3357	33	1,0%
100	3010	155	5,1%	2298	77	3,4%	3358	58	1,7%
150	2732	34	1,2%	2010	57	2,8%	2885	50	1,7%
200	2852	68	2,4%	2003	33	1,6%	2823	27	0,9%
250	2597	115	4,4%	1681	130	7,7%	2507	98	3,9%

Temperatura (°C)	G ^{res10%}		
	V _m (m/s)	DP (m/s)	CV
20	3474	148	4,3%
100	3470	39	1,1%
150	3021	110	3,6%
200	2845	62	2,2%
250	2195	206	9,4%

Legenda: V_m – velocidade média de propagação das ondas ultra-sónicas; DP – desvio-padrão; CV – coeficiente de variação
 No entanto, para as argamassas com resina, o aumento da velocidade de propagação deve-se à propriedade ligante da resina, capaz de aumentar a compacidade da mistura quando no estado endurecido (Ximenes *et al.*, 2016).

Considerando em primeira instância apenas os resultados dos ensaios para as argamassas que não foram

submetidas a variações de temperatura, observa-se que os valores de velocidade obtidos para argamassa de referência D^{ref} (3061 m/s), encontram-se próximos dos valores obtidos por Vale (2014) e Afonso (2015), que obtiveram valores de velocidade de 3285 m/s e 2952 m/s, respectivamente, para argamassas de composição semelhante.

Os valores de velocidade de propagação das argamassas de desempenho térmico melhorado são inferiores ao da argamassa de referência como expectável. A argamassa com granulado de cortiça, em particular, é aquela que apresenta os valores mais reduzidos de velocidade (994 m/s), indicando que o granulado de cortiça é um agregado que reduz a compacidade da argamassa. De acordo com Afonso (2015), a velocidade para este tipo de argamassa (contudo recorrendo à utilização de adjuvantes) foi de 922 m/s, um valor muito semelhante ao obtido neste estudo, tendo em conta a variabilidade do ensaio (2% a 2,5%) (Flores-Colen, 2009).

Já a argamassa de argila expandida (A^{AE}) apresenta o valor mais elevado para este tipo de argamassas (2379 m/s), mais de duas vezes superior à argamassa de cortiça, evidenciando a sua elevada compacidade e reduzido número de vazios. De acordo com Gominho (2016), devido à superfície ligeiramente rugosa da argila expandida e o seu efeito de absorção, esta torna-se mais compacta através do transporte de pequenas partículas da pasta-ligante para o interior do agregado.

Quanto à argamassa de aerogel, esta apresenta uma diminuição de cerca de 64% face à argamassa de referência, com um valor de 1094 m/s. Num estudo recente efectuado por Afonso (2015) foi obtido um valor de 1164 m/s para o mesmo tipo de argamassa. O aerogel é um agregado com uma superfície de contacto lisa e pouco rugosa, apresentando maior dificuldade em formar uma argamassa mais compacta, não existindo uma zona de penetração do ligante para o interior do agregado (Gominho, 2016).

Apresentam-se nas figuras 4.5 e 4.6 a síntese das velocidades de propagação de ondas ultra-sónicas das argamassas térmicas e das argamassas com agregado de areia e a variação (em %) da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas das argamassas submetidas a temperaturas elevadas em relação às argamassas de temperatura de controlo.

Relativamente aos efeitos da exposição da argamassa de argila expandida às temperaturas elevadas, ocorreu uma redução da velocidade de propagação das ondas, com valores entre 2% a 13% mais reduzidos do que os da argamassa à temperatura de controlo. O valor mais baixo foi de 2065 m/s e foi obtido para a argamassa submetida à temperatura de 150 °C, presumivelmente devido ao aumento da porosidade da argamassa causado pela evaporação da água. O facto das argamassas estarem expostas a temperaturas elevadas, também faz com que ocorram dilatações térmicas dos seus materiais constituintes, podendo levar à ocorrência de microfissuras no seu interior, e ser uma presumível causa para a diminuição de compacidade (Skantz, 2014).

Quanto aos efeitos da exposição da argamassa de granulado de cortiça expandida às temperaturas elevadas, verificou-se um aumento da velocidade de propagação das ondas, com valores entre 3 a 12% superiores face à argamassa de controlo. O valor mais elevado foi de 1112 m/s e foi obtido para temperatura de 100 °C. Assim, apesar de pouco significativo, o aumento da temperatura levou a um ligeiro aumento da compacidade da

argamassa de granulado de cortiça expandida devido à possível eliminação das tensões internas do agregado. A estrutura celular da cortiça é alterada pelo aquecimento, tornando as paredes das células mais planas e direitas devido à expansão do material (Fortes *et al.*, 2004).

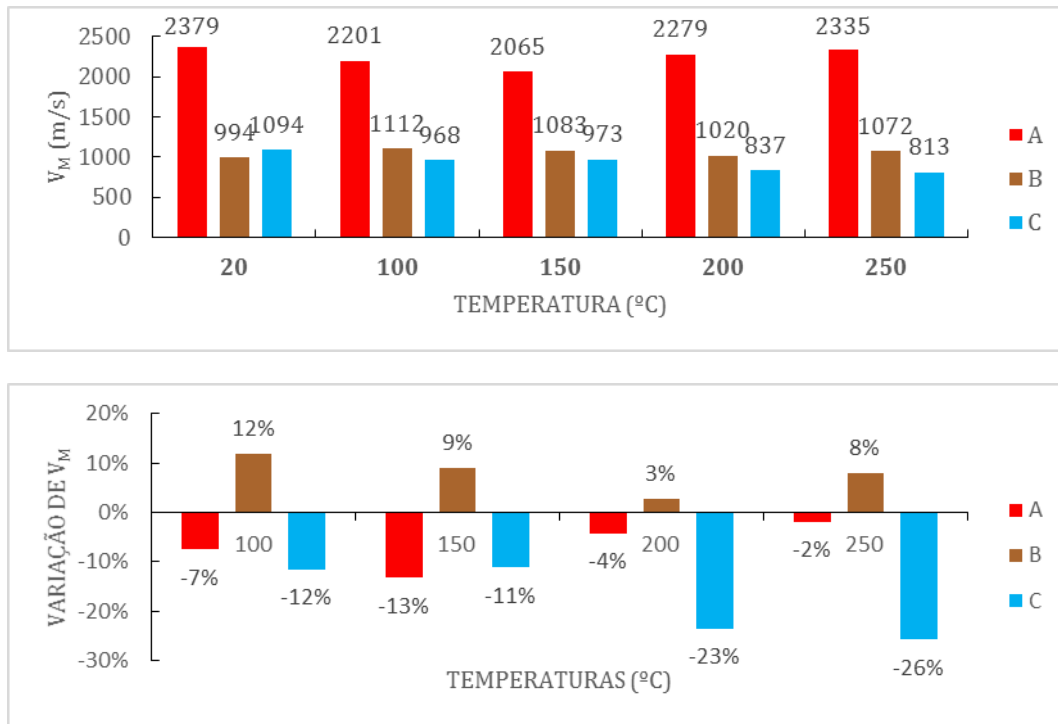


Figura 4.5 – Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas das argamassas térmicas (em cima); variação (em %) da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas das argamassas térmicas submetidas a temperaturas elevadas relativamente à temperatura de controlo, 20 °C (em baixo)

Quanto à argamassa de aerogel, tal como na argamassa de argila expandida, deu-se uma diminuição gradual da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas com o aumento da temperatura, com valores entre 11% a 26% inferiores face à argamassa que não teve variações de temperatura. As maiores variações ocorreram a partir de 200 °C, atingindo-se o valor mais reduzido para a temperatura de exposição de 250 °C. Foi possível verificar a influência da temperatura nesta argamassa, presumivelmente devido ao aumento da quantidade de água da argamassa devido à presença dos agentes introdutores de ar na sua composição, que leva ao aumento da sua porosidade para temperaturas elevadas, devido à evaporação da água e consequente diminuição da sua compacidade.

Relativamente à argamassa de referência, os valores de velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas diminuíram com o aumento da temperatura, variando essa redução entre 2% e 16%. A maior diminuição deu-se para a temperatura de 250°C, ilustrando o efeito da temperatura ao nível da redução da compacidade desta argamassa. Esta redução de compacidade, influenciada pelas temperaturas elevadas, pode dever-se ao aumento do número de vazios devido à evaporação da água, à ocorrência de microfissuras causada pela retracção da argamassa e pelas diferentes dilatações térmicas dos materiais (Lion, 2005; Cagnon *et al.*, 2015).

Quanto às argamassas com adjuvantes, para todas as composições analisadas, conclui-se que a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas diminui com o aumento da temperatura de exposição das argamassas, tal como a argamassa de referência, sendo os valores mais baixos correspondentes à exposição a 250 °C. Registaram-se diminuições entre 10% (100 °C) e 34% (250 °C) para a argamassa E^{CT} e entre 14% (150 °C) e 25% (250 °C) para a argamassa F^{5%res}. Tal como aconteceu com a argamassa de aerogel, a temperatura influenciou a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas a partir dos 100°C na argamassa com éter de celulose e tensoactivos. Para o caso da argamassa com 5% resina, a maior diminuição da velocidade dos ultrasons dá-se a partir da temperatura de exposição de 150 °C; segundo a sua ficha técnica, este adjuvante tem uma temperatura de ebulição aproximada de 100 °C, podendo ser esta a causa para a diminuição da compacidade da argamassa. Quanto à argamassa com 10% de resina, pelos motivos enunciados no capítulo 3, obtiveram-se valores de velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas bastante inconsistentes e, por isso, inconclusivos.

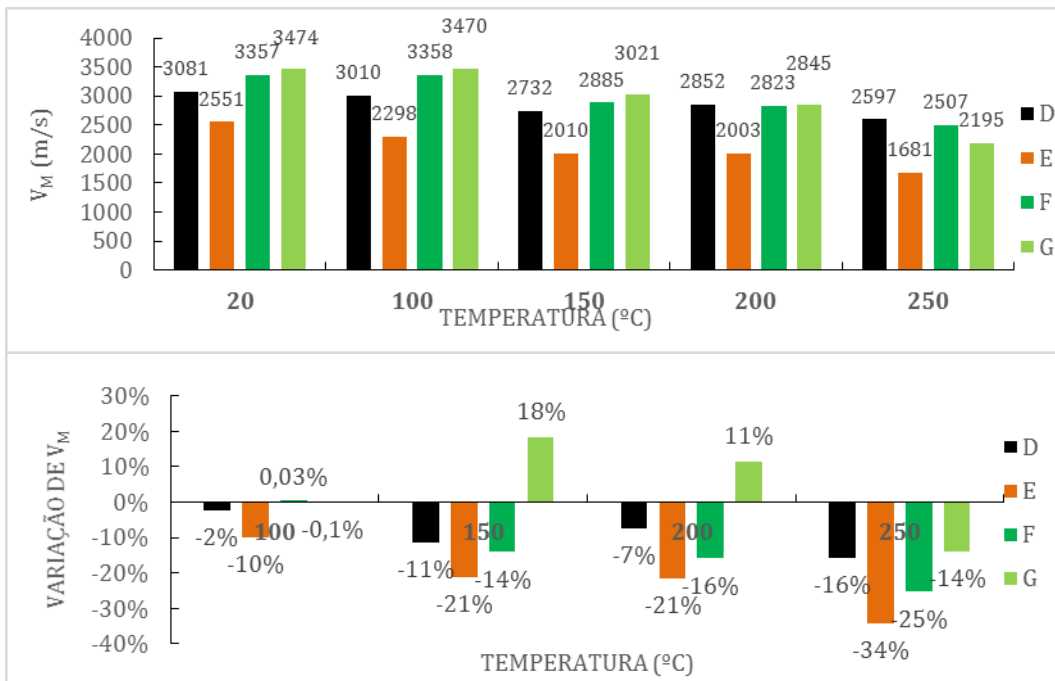


Figura 4.6 – Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas das argamassas com agregado de areia (em cima); variação (em %) da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas das argamassas com agregado de areia submetidas a temperaturas elevadas relativamente à temperatura de controlo, 20 °C (em baixo)

Pode-se relacionar os valores da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas com os valores da massa volúmica no estado endurecido, pois ambas as propriedades dependem das características do material em estudo, ou seja, um material de coesão mais fraca terá também velocidades de propagação inferiores e vice-versa (Magalhães *et al.*, 2003). Na figura 4.7 pode-se observar a relação entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas e a massa volúmica no estado endurecido obtida através do método geométrico para as diferentes temperaturas-alvo a que as argamassas foram submetidas. Obtiveram-se elevadas correlações lineares, com valores de coeficientes de correlação de Pearson entre 0,77 e 0,86 para as argamassas

submetidas às temperaturas-alvo até 200 °C, diminuindo com o aumento de temperatura. Para o caso das argamassas submetidas à temperatura de 250 °C, obteve-se um valor de coeficiente de correlação mais reduzido, na ordem dos 0,64 indicando a influência da temperatura na linearidade da relação entre estas duas variáveis. Os valores da argamassa de argila expandida, atípicos na correlação, devem-se, conforme anteriormente explicado, às características do agregado que, apesar de apresentar uma massa volúmica reduzida, garante uma compacidade elevada.

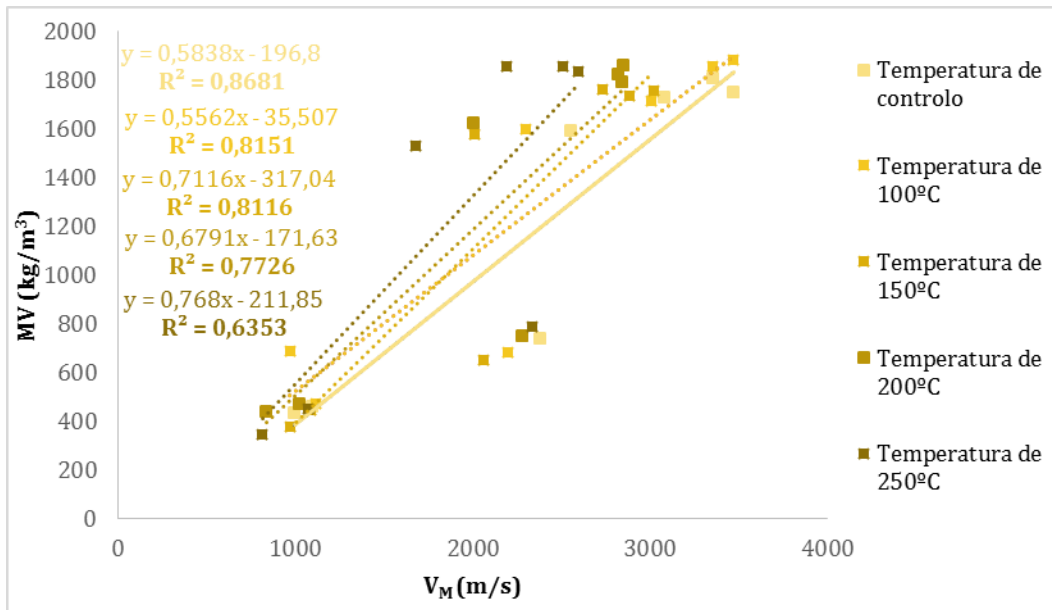


Figura 4.7 – Relação entre a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas e a massa volúmica no estado endurecido para as diferentes temperaturas-alvo

4.4.3. Módulos de elasticidade e de torção dinâmicos e coeficiente de *Poisson*

Os valores do módulo de elasticidade dinâmico, do módulo de torção dinâmico e do coeficiente de *Poisson* foram obtidos directamente das equações da norma ASTM E1876-01 (ASTM, 2006) e através do *software Genemod* do equipamento *Grindosonic MK5 Industrial*, tendo sido ensaiados 5 provetes por argamassa. Os resultados individuais das frequências de ressonância são apresentados no anexo A.4.

Note-se que, em alguns casos, não foi possível obter por meio de iterações, valores plausíveis para o cálculo pela norma devido às baixas frequências das argamassas térmicas. Desta forma, o cálculo do coeficiente de *Poisson* para alguns provetes foi aproximado por defeito, conforme sugerido pelo equipamento, introduzindo alguma incerteza nos resultados. É também de salientar os elevados coeficientes de variação dos resultados obtidos nestes ensaios, demonstrando a elevada sensibilidade/variabilidade do ensaio.

Os valores a considerar para o desenvolvimento deste estudo foram os obtidos através do *software Genemod* do equipamento, que são considerados mais fiáveis para argamassas com frequências baixas em relação aos valores obtidos através da norma.

4.4.3.1. Módulo de elasticidade dinâmico

Na tabela 4.5 apresentam-se os valores obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico.

Na figura 4.8 observa-se a elevada correlação entre os valores de módulo de elasticidade dinâmico calculados através das equações da norma ASTM E1876-01 e os obtidos através do *software Genemod* do equipamento *Grindosonic MK5 Industrial*, atingindo-se coeficientes de correlação superiores a 0,99. Apesar desta forte correlação, os valores obtidos pelo *software* consideram-se mais fidedignos e serão os utilizados nesta análise.

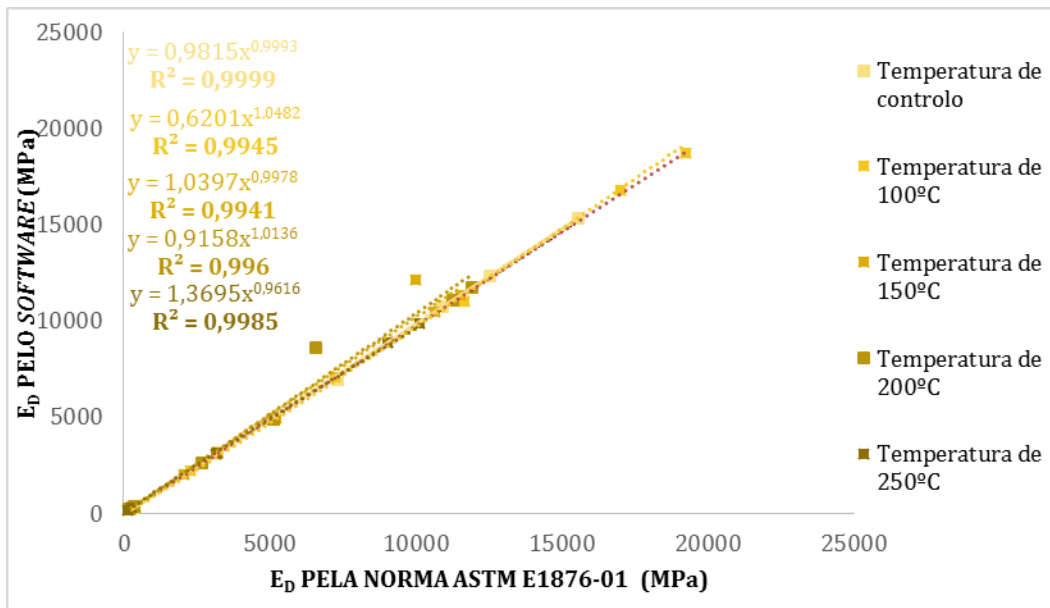


Figura 4.8 – Relação entre os valores do módulo de elasticidade dinâmico calculados através da norma ASTM E1876-01 e através do software Genemod para as diferentes temperaturas-alvo

O módulo de elasticidade dinâmico está relacionado com o comportamento elástico das argamassas, fornecendo informações sobre a sua deformabilidade e rigidez (Silva *et al.*, 2015). Logo, a capacidade de um reboco em absorver deformações está relacionada com o módulo de elasticidade dinâmico e será maior quando menor for esta propriedade (Flores-Colen, 2009). Assim, uma argamassa menos rígida (ou seja, com um módulo menor) tem uma maior capacidade de absorver a energia mecânica, capacidade esta que previsivelmente aumentará com o aumento da temperatura (Carneiro, 2013; Cülfik *et al.*, 2001).

Considerando as argamassas à temperatura de controlo (que não foram submetidas a variações de temperatura), os valores obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com isolantes térmicos variam entre 290 e 3152 MPa e para as argamassas com agregado de areia entre 6944 e 15553 MPa.

Tabela 4.5 – Módulo de elasticidade dinâmico

Temperatura (°C)	A ^{AE}						B ^{GC}						Caero					
	ASTM E1876-01			Software			ASTM E1876-01			Software			ASTM E1876-01			Software		
	E _d (MPa)	DP (MPa)	CV	E _d (MPa)	DP (MPa)	CV	E _d (MPa)	DP (MPa)	CV	E _d (MPa)	DP (MPa)	CV	E _d (MPa)	DP (MPa)	CV	E _d (MPa)	DP (MPa)	CV
20	3219	296	9%	3152	285	9%	239	29	12%	238	30	12%	303	22	7%	290	17	6%
100	2272	122	5%	2239	122	5%	381	61	16%	379	61	16%	402	9	2%	261	3	1%
150	2069	172	8%	2033	176	9%	379	30	8%	332	52	16%	241	9	4%	292	5	2%
200	2683	67	2%	2631	65	2%	333	25	8%	327	21	7%	194	12	6%	192	8	4%
250	3201	286	9%	3144	279	9%	285	33	11%	281	31	11%	146	4	3%	184	10	5%

Temperatura (°C)	D ^{ref}						E ^{ct}						F ^{res5%}					
	ASTM E1876-01			Software			ASTM E1876-01			Software			ASTM E1876-01			Software		
	E _d (MPa)	DP (MPa)	CV	E _d (MPa)	DP (MPa)	CV	E _d (MPa)	DP (MPa)	CV	E _d (MPa)	DP (MPa)	CV	E _d (MPa)	DP (MPa)	CV	E _d (MPa)	DP (MPa)	CV
20	12554	831	7%	12310	815	7%	7342	460	6%	6944	495	7%	15553	409	3%	15353	405	3%
100	11671	718	6%	10984	908	8%	7246	1038	14%	7095	1053	15%	16990	769	5%	16773	738	4%
150	10661	656	6%	10454	643	6%	5203	425	8%	4939	481	10%	11534	245	2%	11335	284	3%
200	11925	549	5%	11718	564	5%	5112	125	2%	4890	243	5%	11282	571	4%	11059	490	4%
250	10143	60	1%	9891	133	1%	3152	481	15%	3111	465	15%	9015	348	4%	8842	352	4%

Temperatura (°C)	G ^{res10%}					
	ASTM E1876-01			Software		
	E _d (MPa)	DP (MPa)	CV	E _d (MPa)	DP (MPa)	CV
20	10904	223	2%	10713	232	2%
100	19231	1499	8%	18714	1461	8%
150	9982	5632	56%	12160	996	8%
200	6582	4389	56%	8593	443	5%
250	9014	345	4%	8842	352	4%

Legenda: E_d - módulo de elasticidade dinâmico; DP - desvio-padrão; CV - coeficiente de variação

A argamassa de A^{AE} apresenta um valor de 3152 MPa, tendo sido a argamassa com isolantes térmicos que apresentou valores superiores de módulo de elasticidade dinâmico, com uma diminuição de apenas 19% em comparação com a argamassa de referência. Afonso (2015) obteve valores inferiores (1581 MPa) para uma argamassa com o mesmo agregado, mas com adjuvantes na sua constituição. Quanto à argamassa B^{GC}, é a argamassa térmica que apresenta menor valor de módulo de elasticidade dinâmico (238 MPa), com uma diminuição de cerca de 98% em comparação com a argamassa de referência, sendo a argamassa com maior capacidade de absorção de energia mecânica. Apresentou valores na mesma ordem de grandeza dos obtidos por Afonso (2015) de 250 MPa para uma argamassa tradicional de granulado de cortiça com adjuvantes.

Para a argamassa de aerogel, obteve-se o valor de 290 MPa, valor ligeiramente inferior ao obtido por Afonso (2015) (342MPa), para o mesmo tipo de argamassa.

Quanto às argamassas com agregado de areia, obteve-se valores distintos considerando a presença ou não de adjuvantes. Assim, para a argamassa D^{ref} obteve-se o valor de 12310 MPa, ligeiramente inferior ao obtido por Afonso (2015) e Vale (2014), que registaram valores de módulo de elasticidade de 14326 e 15140 MPa (utilizando uma curva granulométrica com maior quantidade de finos), respectivamente.

Para a argamassa E^{CT}, obteve-se o valor médio de 6944 MPa, cerca de 44% mais reduzido do que a argamassa D^{ref}, podendo o efeito dos introdutores de ar explicar o decréscimo obtido.

Em relação à argamassa com 5% de resina na sua constituição, devido à acção ligante da resina, a argamassa torna-se mais rígida e, conseqüentemente, com um módulo de elasticidade dinâmico mais elevado (15353 MPa), cerca de 25% superior comparativamente à argamassa de referência. Quanto à argamassa com 10% de resina, devido à elevada segregação e heterogeneidade da argamassa, não se obtiveram os resultados esperados (capítulo 3).

Apresentam-se nas figuras 4.9 e 4.10 a síntese do módulo de elasticidade dinâmico em estado endurecido das argamassas térmicas e das argamassas com agregado de areia e a variação (em %) do módulo de elasticidade dinâmico em estado endurecido das argamassas submetidas a temperaturas elevadas em relação às argamassas de temperatura de controlo.

Relativamente aos efeitos da exposição da argamassa A^{AE} às temperaturas elevadas, observa-se que houve uma diminuição no módulo de elasticidade dinâmico, com valores entre 17% e 29% face à argamassa à temperatura de controlo. Obteve-se o valor mais reduzido de rigidez (2033 MPa) nesta argamassa para a temperatura de exposição de 150 °C. No entanto, a partir dos 150 °C, o módulo de elasticidade volta a aumentar até cerca de 3144 MPa. Este resultado menos esperado pode dever-se às condições de produção da argamassa, bem como à instabilidade do ensaio, onde a própria vibração da mesa pode interferir com a frequência de ressonância durante o mesmo.

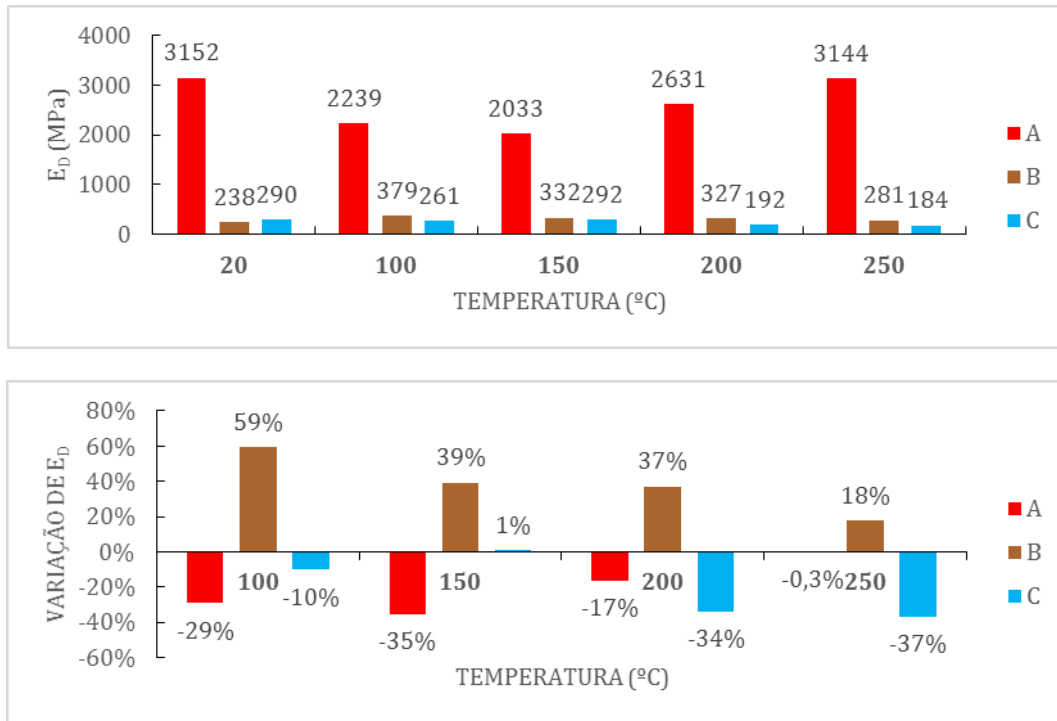


Figura 4.9 – Módulo de elasticidade dinâmico em estado endurecido das argamassas térmicas (em cima); variação (em %) do módulo de elasticidade dinâmico em estado endurecido das argamassas térmicas submetidas a temperaturas elevadas relativamente à temperatura de controlo, 20 °C (em baixo)

Quanto à argamassa B^{GC}, em relação à temperatura de controlo, o módulo de elasticidade foi superior (entre 18% a 59%). A partir da temperatura de 100 °C, acontece o fenómeno de endireitamento das paredes celulares da cortiça, passando a possuir uma estrutura interna mais direita e por isso mais estável. Este fenómeno faz com que a cortiça se torne mais resistente e consequentemente mais rígida, aumentando o seu módulo de elasticidade dinâmico (Fortes *et al*, 2004).

Em relação à argamassa C^{AERO}, para as temperaturas de exposição de 100 °C, 200 °C e 250 °C, o módulo de elasticidade é reduzido para cerca de 10%, 34% e 37% respectivamente, e varia 1% para a temperatura de 150 °C. Tendo em conta os coeficientes de variação deste ensaio, e a variação reduzida que ocorreu para a temperatura de 100 °C, pode-se considerar que a temperatura só influenciou o módulo de elasticidade dinâmico desta argamassa a partir da temperatura de exposição de 200 °C. Com o aumento da temperatura a partir de 200 °C, a capacidade de deformação da argamassa de aerogel vai sendo cada vez maior, pois o seu módulo de elasticidade diminui, reduzindo a sua rigidez. Pode-se considerar que esta influência das temperaturas elevadas existe devido à presença dos adjuvantes na argamassa.

Para a argamassa D^{ref} obteve-se, em regra geral, uma diminuição dos valores de módulo de elasticidade dinâmico (entre 11 e 20%). A maior diminuição deu-se para a temperatura de 250 °C, para a qual a argamassa apresenta menor rigidez. Quanto às argamassas com adjuvantes, estas apresentaram comportamentos relativamente diferentes. Observando os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico das

argamassas de E^{CT} expostas a temperaturas elevadas, pode-se concluir que a temperatura influencia a rigidez da argamassa a partir de 150 °C, reduzindo-a gradualmente com o aumento da temperatura (entre 29% a 55%) em comparação à argamassa de temperatura de controlo.

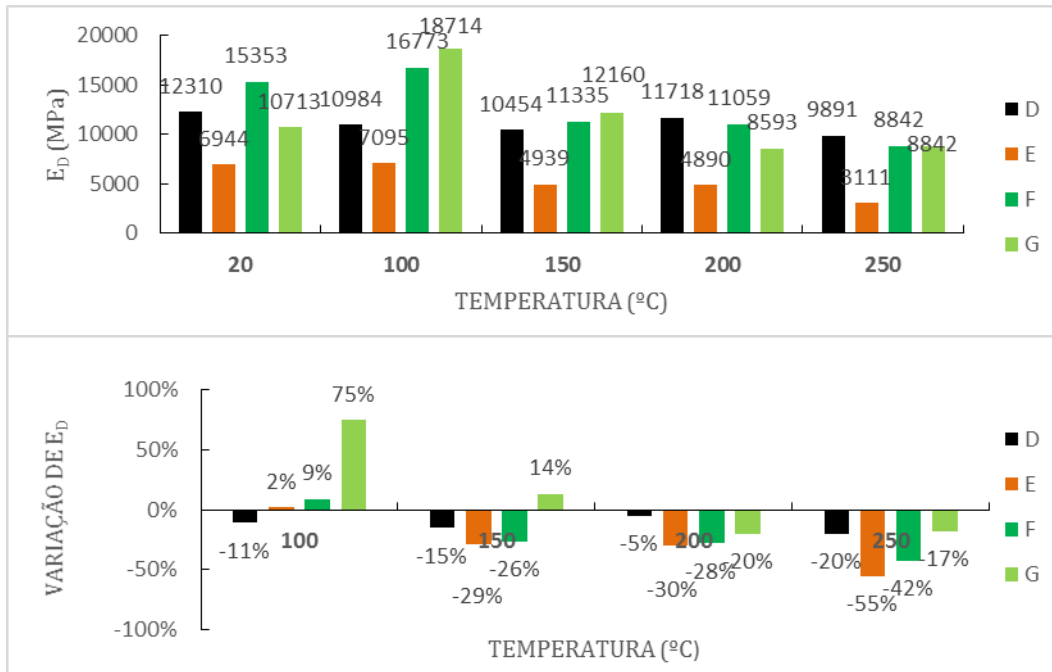


Figura 4.10 – Módulo de elasticidade dinâmico em estado endurecido das argamassas com agregado de areia (em cima); variação (em %) do módulo de elasticidade dinâmico em estado endurecido das argamassas com agregado de areia submetidas a temperaturas elevadas relativamente à temperatura de controlo, 20 °C (em baixo)

Para a argamassa F^{5%res}, pode-se considerar, tendo em conta o coeficiente de variação do ensaio, que a argamassa não é sensível ao aumento da temperatura a 100 °C. A partir da temperatura de exposição de 150 °C e até 250 °C, o módulo de elasticidade reduz-se entre 26% a 42% em comparação com a argamassa à temperatura de controlo. O valor mais reduzido de módulo de elasticidade obtido foi para 250 °C (8842 MPa). Isto deve-se à possível ebulição e degradação da resina a 100 °C, levando ao conseqüente decréscimo de rigidez da argamassa a partir desta temperatura.

Para a argamassas G^{10%res}, conforme anteriormente referido, obtiveram-se valores pouco expectáveis de módulo de elasticidade dinâmico. Assim, para 100°C, obteve-se um aumento de cerca de 75% em relação à temperatura de controlo, quando para 250 °C o resultado obtido foi cerca de 17% inferior.

De um modo geral, a temperatura de 250 °C foi a temperatura que teve o efeito mais gravoso na diminuição do módulo de elasticidade dinâmico e consecutiva rigidez das argamassas estudadas. Segundo Cagnon *et al.* (2015), o principal pressuposto para diminuição do módulo de elasticidade dinâmico com o aumento da temperatura, é a diferença de dilatações térmicas entre a pasta de cimento e os agregados que origina microfissuras internas.

É possível relacionar o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas estudadas para as diferentes temperaturas de exposição com a sua massa volúmica, conforme se pode observar na figura 4.11. Para isso, considerou-se a massa volúmica no estado endurecido obtida pelo método geométrico e o módulo de elasticidade dinâmico obtido através do *software*. Obtiveram-se coeficientes de correlação linear entre 0,86 e 0,95 para as diferentes temperaturas elevadas de exposição, o que aponta para uma elevada correlação entre a massa volúmica e o módulo de elasticidade, mesmo após exposição a temperaturas elevadas; as argamassas mais compactas, ou seja, que apresentam uma massa volúmica mais elevada, tendem a ser mais rígidas e vice-versa. Segundo os estudos de Afonso (2015), Vale (2014) e Flores-Colen (2009), que relacionaram também estas duas características através de ajustamentos de potência, embora sem ter em conta o efeito da temperatura, foram obtidas correlações superiores a 0.9.

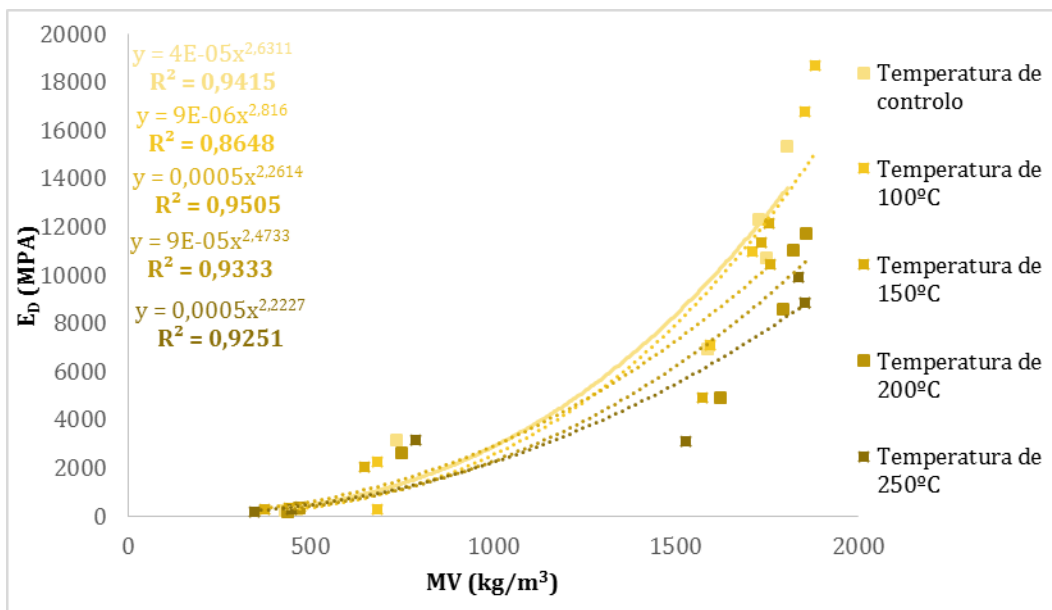


Figura 4.11 – Relação entre a massa volúmica e módulo de elasticidade dinâmico para as diferentes temperaturas-alvo

Pode também relacionar-se o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas. Na figura 4.12 obtiveram-se coeficientes de correlação de potência muito elevados entre estas variáveis, entre 0,98 e 0,93 para as argamassas estudadas. Outros autores também relacionaram estas grandezas, como Afonso (2015), que obteve valores do coeficiente de correlação de potência de 0,94, e Vale (2014) e Flores-Colen (2009), que reportaram valores superiores a 0,70; mais uma vez, nestes estudos não foi avaliada a influência da temperatura. Pode-se concluir que o coeficiente de correlação entre estas duas propriedades mostrou-se insensível às temperaturas elevadas.

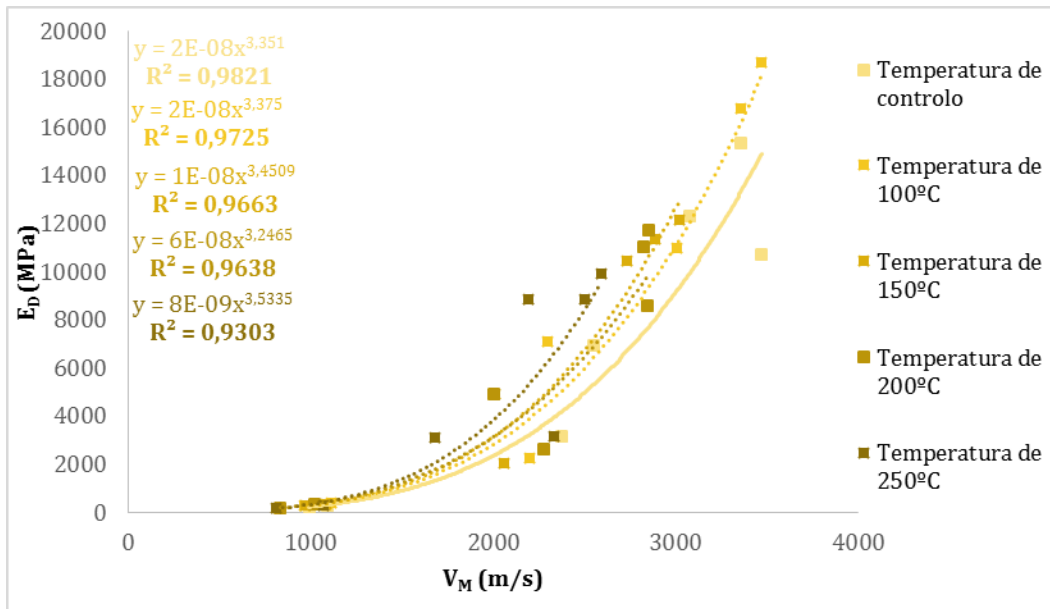


Figura 4.12 – Relação entre a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas e módulo de elasticidade dinâmico para as diferentes temperaturas-alvo

4.4.3.2. Módulo de torção dinâmico

O módulo de torção dinâmico traduz a capacidade de um material resistir a deformações transversais (Appleton & Costa, 2002). Verifica-se, como regra geral, que os valores de módulo de torção dinâmico seguem a mesma tendência do módulo de elasticidade dinâmico para a temperatura de controlo. Assim, à semelhança do verificado para o módulo de elasticidade dinâmico, o módulo de torção dinâmico é tanto maior quanto menor for a capacidade de deformação das argamassas. Tal como no módulo de elasticidade, as argamassas com granulado de cortiça expandida e aerogel, são as que apresentam maior decréscimo do módulo de torção face às argamassas de areia. Deve-se salientar que tanto o módulo de torção dinâmico como o coeficiente de *Poisson* são parâmetros calculados iterativamente com base no módulo de elasticidade. Os valores obtidos para o módulo de torção são apresentados na tabela A.4.2 do anexo A.4.

Assim, tal como no caso do módulo de elasticidade, os valores do módulo de torção dinâmico calculados através da norma ASTM E1876-01 relacionam-se fortemente com os calculados pelo *software Genemod*, obtendo-se um coeficiente de correlação linear entre os dois métodos que varia entre 0,97 e 1,00 (figura A.4.1 - anexo A.4), validando assim a utilização dos valores obtidos através do *software*.

Conforme mencionado, na figura 4.13 ilustra-se a elevada correlação entre o módulo de torção dinâmico e o módulo de elasticidade dinâmico, com um coeficiente de correlação que varia entre 0,87 (para a temperatura de controlo) e 0,99 (para a temperatura de 250 °C).

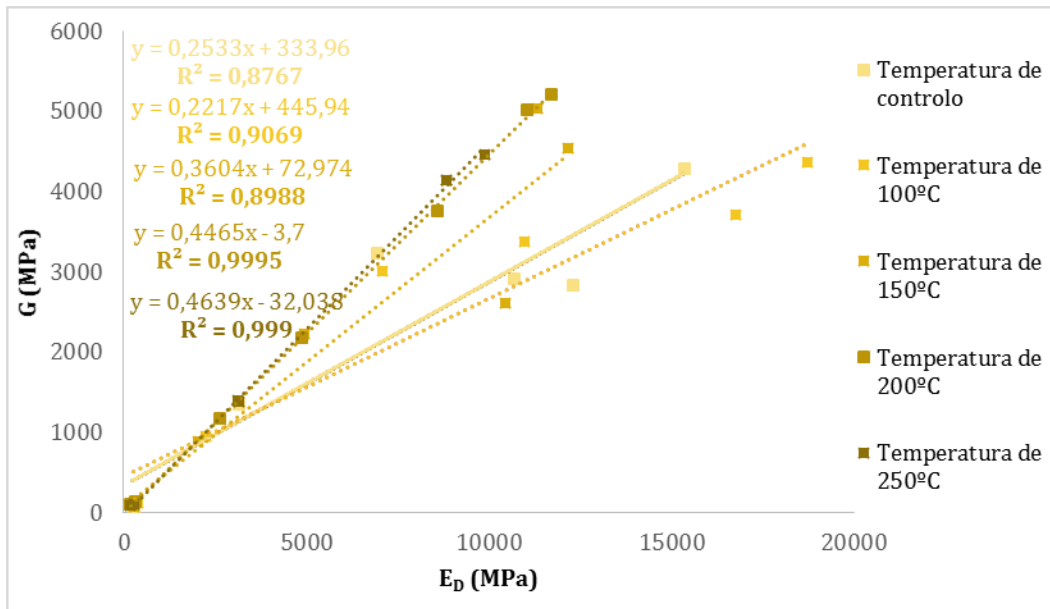


Figura 4.13 – Relação entre os valores do módulo de torção dinâmico e o módulo de elasticidade dinâmico para as diferentes temperaturas-alvo

4.4.3.3. Coeficiente de *Poisson*

Apresentam-se os valores obtidos para o coeficiente de *Poisson* na tabela 4.6. Este coeficiente traduz a relação entre a deformação transversal e a deformação longitudinal do betão/argamassa. O betão apresenta um coeficiente de *Poisson* com valores a variar entre 0,15 e 0,25, adoptando-se para argamassas um valor médio de 0,20 (Appleton & Costa, 2002). De acordo com Flores-Colen (2009), foi determinado um valor de 0,30 para argamassas cimentícias pré-doseadas com introdutores de ar, sendo estas mais deformáveis. É de notar que devido às baixas frequências de flexão e torção dos provetes em estudo, o *software Genemod* admitiu como aproximação um coeficiente de *Poisson* igual a 0,30 para alguns casos. Assim, os valores obtidos situam-se entre 0,17 e 0,30 para as argamassas térmicas não submetidas a temperaturas elevadas e entre 0,13 e 0,30 para as argamassas com agregado de areia não submetidas a temperaturas elevadas. De um modo geral, as argamassas de A^{AE} e E^{CT} apresentam valores um pouco inferiores às restantes, indicando uma menor capacidade de deformação transversal para as argamassas à temperatura de controlo.

Relativamente ao efeito da exposição a temperaturas elevadas das argamassas no coeficiente de *Poisson* (figura 4.14), observa-se uma diminuição deste parâmetro para as argamassas térmicas, com o aumento da temperatura-alvo. No entanto, para a argamassa B^{GC} à temperatura de 250 °C observa-se um aumento do coeficiente de *Poisson* quando exposta à temperatura de 100 e 250 °C, valor expectável tendo em conta os módulos dinâmicos de elasticidade e de torção.

Devido à necessidade de considerar valores aproximados por defeito para o coeficiente de *Poisson* de algumas argamassas e os elevados coeficientes de variação obtidos, pode-se concluir que para certas frequências de

ressonância, a geometria pode não ser a mais adequada para calcular este parâmetro. Pela mesma razão, considera-se que os módulos dinâmicos de elasticidade e de torção, por dependerem do coeficiente de *Poisson*, poderão ser também afectados.

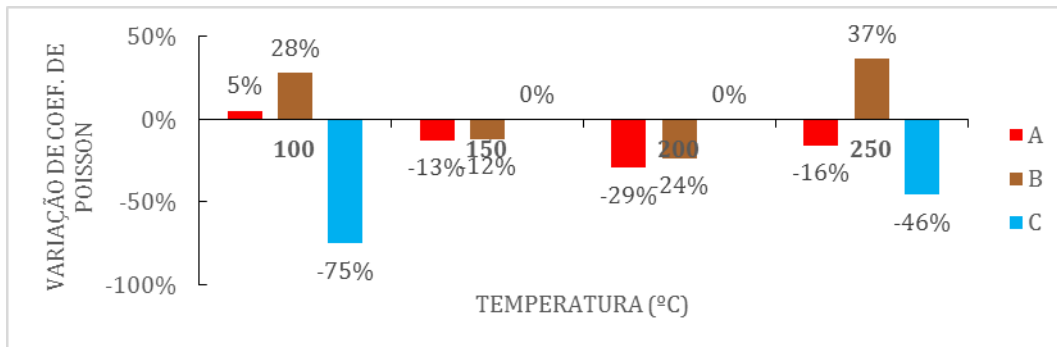


Figura 4.14 – Variação (em %) do coeficiente de *Poisson* no estado endurecido das argamassas térmicas submetidas a temperaturas elevadas relativamente à temperatura de controlo, 20 °C

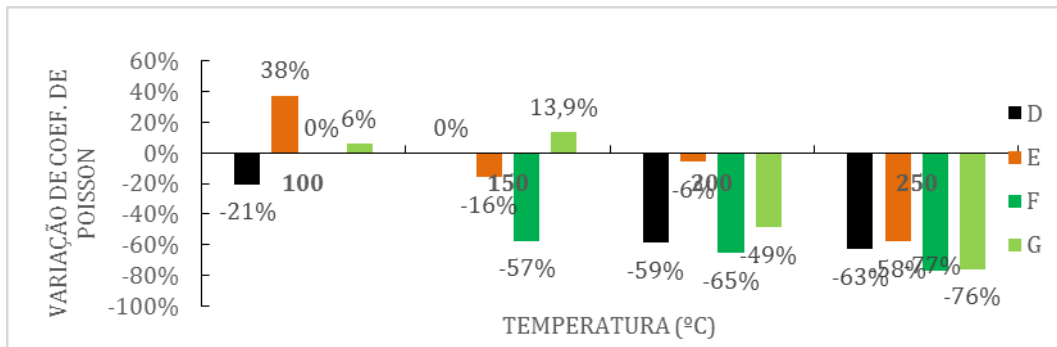


Figura 4.15 – Variação (em %) do coeficiente de *Poisson* no estado endurecido das argamassas com agregado de areia a temperaturas elevadas relativamente à temperatura de controlo, 20 °C

Após determinado o coeficiente de *Poisson* e a massa volúmica de um material, é possível determinar o coeficiente de elasticidade dinâmico a partir dos valores da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, recorrendo à equação 4.1, que é apresentada na norma BS 1881-203 (BSI, 1986, citado por Flores-Colen, 2009),

$$Ed^V = V^2 \times MV \times \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu} \quad (4.1)$$

onde:

Ed^V – módulo de elasticidade dinâmico extrapolado a partir da velocidade de propagação (MPa);

V – velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas (km/s);

MV – massa volúmica aparente (kg/m³);

μ – coeficiente de *Poisson*.

Tabela 4.6 – Coeficiente médio de *Poisson*

Temperatura (°C)	A ^{AE}						B ^{GC}						Caero					
	ASTM E1876-01			Software			ASTM E1876-01			Software			ASTM E1876-01			Software		
	v (-)	DP (-)	CV	v (-)	DP (-)	CV	v (-)	DP (-)	CV	v (-)	DP (-)	CV	v (-)	DP (-)	CV	v (-)	DP (-)	CV
20	0,20	0,05	27%	0,17	0,05	29%	0,14	0,02	17%	0,23	0,16	69%	0,30	0,00	0,0%	0,30	0,00	0,0%
100	0,15	0,01	9%	0,18	0,08	45%	0,24	0,04	18%	0,29	0,02	7%	0,30	0,00	0,0%	0,08	0,01	10,4%
150	0,15	0,02	15%	0,15	0,06	41%	0,22	0,04	18%	0,20	0,12	60%	0,30	0,00	0,0%	0,30	0,00	0,0%
200	0,14	0,02	16%	0,12	0,02	19%	0,22	0,03	15%	0,17	0,07	41%	0,30	0,00	0,0%	0,30	0,00	0,0%
250	0,15	0,01	7%	0,14	0,04	28%	0,32	0,04	13%	0,31	0,10	31%	0,30	0,00	0,0%	0,16	0,12	74,7%

Temperatura (°C)	D ^{ref}						E ^{ct}						F ^{res5%}					
	ASTM E1876-01			Software			ASTM E1876-01			Software			ASTM E1876-01			Software		
	v (-)	DP (-)	CV	v (-)	DP (-)	CV	v (-)	DP (-)	CV	v (-)	DP (-)	CV	v (-)	DP (-)	CV	v (-)	DP (-)	CV
20	0,30	0,00	0%	0,30	0,00	0%	0,13	0,01	9%	0,13	0,11	83%	0,25	0,03	12%	0,30	0,00	0%
100	0,30	0,00	0%	0,24	0,09	36%	0,21	0,03	14%	0,18	0,06	34%	0,25	0,02	9%	0,30	0,00	0%
150	0,30	0,00	0%	0,30	0,00	0%	0,15	0,03	17%	0,11	0,03	30%	0,15	0,06	37%	0,13	0,06	47%
200	0,13	0,01	9%	0,12	0,04	35%	0,22	0,04	18%	0,12	0,05	43%	0,12	0,01	9%	0,10	0,04	34%
250	0,15	0,03	18%	0,11	0,04	34%	0,07	0,01	18%	0,05	0,02	30%	0,11	0,01	11%	0,07	0,02	33%

Temperatura (°C)	G ^{res10%}					
	ASTM E1876-01			Software		
	v (-)	DP (-)	CV	v (-)	DP (-)	CV
20	0,27	0,02	6%	0,28	0,04	14%
100	0,34	0,02	4%	0,30	0,00	0%
150	0,36	0,04	10%	0,32	0,04	12%
200	0,35	0,04	13%	0,14	0,05	34%
250	0,11	0,02	16%	0,07	0,02	33%

Legenda: v - coeficiente de *Poisson*; DP - desvio-padrão; CV - coeficiente de variação

Ao comparar os valores do módulo de elasticidade anteriormente apresentados com os obtidos através deste método (tabela 4.7), observa-se que os valores calculados desta forma são, em regra geral, superiores aos que foram obtidos experimentalmente, com valores de correlação de *Pearson* elevados, entre 0,89 e 0,97, como se pode observar na figura 4.16. Considera-se que a temperatura não tem influência significativa nos coeficientes de correlação linear destes parâmetros.

Resumindo, verifica-se que quanto menos compacta for a argamassa em questão, maior será a capacidade de deformação que esta pode suportar e que esta capacidade também aumenta com a exposição a temperaturas elevadas, levando a uma diminuição dos módulos dinâmicos de elasticidade e de torção e, por consequência, a uma redução dos valores do coeficiente de *Poisson*.

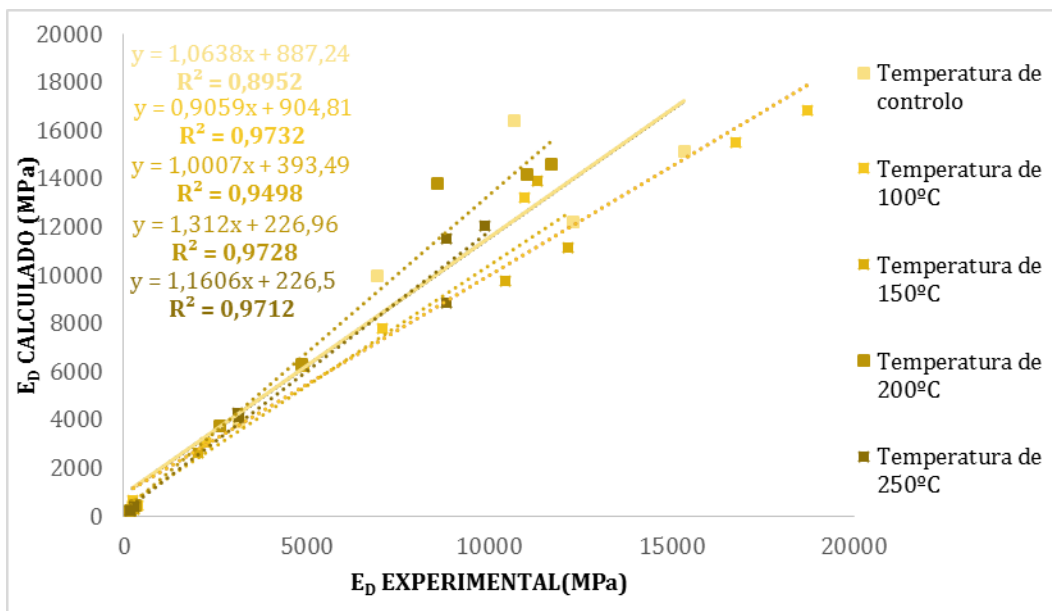


Figura 4.16 – Relação entre o módulo de elasticidade dinâmico obtido experimentalmente e o calculado a partir da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas para as diferentes temperaturas-alvo

Tabela 4.7 – Módulo de elasticidade dinâmico obtido experimentalmente e calculado a partir da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas

Temperatura (°C)	A ^{AE}		B ^{Gc}		C ^{aero}	
	Experimental (Software)	Calculado a partir de V _m	Experimental (Software)	Calculado a partir de V _m	Experimental (Software)	Calculado a partir de V _m
	Ed (MPa)	Ed (MPa)	Ed (MPa)	Ed (MPa)	Ed (MPa)	Ed (MPa)
20	3152	3889	238	370	290	411
100	2239	3055	379	445	261	633
150	2033	2624	332	468	292	263
200	2631	3764	327	453	192	228
250	3144	4095	281	372	184	214

Temperatura (°C)	D ^{ref}		E ^{ct}		F ^{res5%}	
	Experimental (Software)	Calculado a partir de V _m	Experimental (Software)	Calculado a partir de V _m	Experimental (Software)	Calculado a partir de V _m
	Ed (MPa)	Ed (MPa)	Ed (MPa)	Ed (MPa)	Ed (MPa)	Ed (MPa)
20	12310	12194	6944	9944	15353	15117
100	10984	13199	7095	7773	16773	15522
150	10454	9753	4939	6193	11335	13889
200	11718	14584	4890	6295	11059	14171
250	9891	12034	3111	4288	8842	11534

Temperatura (°C)	G ^{res10%}	
	Experimental (Software)	Calculado a partir de V _m
	Ed (MPa)	Ed (MPa)
20	10713	16412
100	18714	16840
150	12160	11139
200	8593	13800
250	8842	8847

Legenda: Ed - módulo de elasticidade dinâmico; V_m - velocidade média de propagação das ondas ultra-sónicas

4.4.6 Resistência à compressão

Na tabela 4.8 apresentam-se os valores obtidos para a resistência à compressão dos provetes estudados. Para este cálculo, foram utilizados os valores obtidos para os provetes calculados pelo *software Genemod*. Apresentam-se no anexo A.5 os resultados individuais de cada ensaio.

Através da análise dos resultados obtidos, pode-se concluir que as argamassas com isolantes térmicos têm a classificações CS I e CS II segundo a norma EN 998-1 (CEN,2010), e apresentam valores de resistência à compressão entre 0,89 e 3,99 MPa para a temperatura de controlo. Quanto às argamassas com agregado de areia, têm classificações CS III e CS IV, apresentando valores entre 6,32 e 10,04 MPa.

Das argamassas com isolantes térmicos, a argamassa de argila foi a que obteve valores superiores de resistência à compressão, com valores de 3,99 MPa. No estudo de Afonso (2015), para uma argamassa semelhante de argila expandida, mas com a presença de adjuvantes, obteve-se o valor de resistência à compressão de 2,67 MPa.

Para as argamassas B^{GC} e C^{AERO} obtiveram-se valores de resistência semelhantes, 0,89 e 0,99 MPa, respectivamente. Em relação à argamassa B^{GC}, Afonso (2015) obteve o valor de 0,40 MPa para o mesmo tipo de argamassa mas com agentes introdutores de ar, e em relação à argamassa C^{AERO} obteve o valor de 0,34 MPa, consideravelmente inferior ao obtido neste estudo e com 5% de resina na sua constituição.

Tal como seria de prever, os valores mais elevados de resistência à compressão correspondem às argamassas com a utilização de areia como agregado. A argamassa D^{ref}, com um valor de resistência à compressão corrigido de 8,83 MPa, apresentou um resultado semelhante ao obtido por Afonso (2015) para o mesmo tipo de argamassa (9,23 MPa). A argamassa E^{CT}, devido à presença de adjuvantes que introduzem ar na mistura e diminuem a compacidade da mesma, apresentou valores mais reduzidos de resistência à compressão (6,32 MPa) face à argamassa D^{ref}, como seria expectável. Em relação às argamassas com resina na sua constituição, F^{5%res} e G^{10%res}, para a primeira obteve-se um valor de 10,04 MPa devido às propriedades ligantes da resina, e para a segunda um valor de 8,14 MPa. Esta redução ocorreu apesar de um aumento da quantidade de resina, e conforme anteriormente referido, deveu-se à elevada heterogeneidade da argamassa e aos efeitos da segregação verificados durante a sua produção, que influenciam a sua resistência.

De acordo com a norma EN 998-1 (CEN, 2010), os valores de resistência à compressão de argamassas de revestimento no estado endurecido devem estar situados nas classes CS I ou CS II, ou seja, devem ter valores compreendidos entre 0,4 e 5 MPa. Através do estudo dos resultados obtidos, as argamassas com agregados isolantes cumprem estes objectivos.

Em seguida, apresenta-se nas figuras 4.17 e 4.18 a síntese da resistência à compressão das argamassas térmicas e das argamassas com agregado de areia e a variação (em %) da resistência à compressão das argamassas térmicas e das argamassas com agregado de areia submetidas a temperaturas elevadas em relação às argamassas de temperatura de controlo.

Relativamente aos efeitos da exposição das argamassas a temperaturas elevadas na resistência à compressão, estas têm comportamentos análogos ao que se sucede para o caso do módulo de elasticidade dinâmico, pois são variáveis dependentes, resultando, por isso, uma análise semelhante dos resultados.

Tabela 4.8 – Resistência à compressão

Temperatura (°C)	A ^{AE}			B ^{GC}			C ^{aero}		
	Rc média (MPa)	Rc corrigido (MPa)	Classif. EN 998-1*	Rc média (MPa)	Rc corrigido (MPa)	Classif. EN 998-1*	Rc média (MPa)	Rc corrigido (MPa)	Classif. EN 998-1*
20	0,12	3,99	CS II	0,02	0,89	CS I	0,01	0,99	CS I
100	0,11	3,27	CS II	0,03	1,16	CS I	0,01	0,93	CS I
150	0,08	3,09	CS II	0,02	1,07	CS I	0,01	1,00	CS I
200	0,16	3,59	CS II	0,03	1,06	CS I	0,02	0,78	CS I
250	0,16	3,98	CS II	0,04	0,97	CS I	0,02	0,76	CS I

Temperatura (°C)	D ^{ref}			E ^{ct}			F ^{res5%}		
	Rc média (MPa)	Rc corrigido (MPa)	Classif. EN 998-1*	Rc média (MPa)	Rc corrigido (MPa)	Classif. EN 998-1*	Rc média (MPa)	Rc corrigido (MPa)	Classif. EN 998-1*
20	0,28	8,83	CS IV	0,10	6,32	CS III	0,39	10,04	CS IV
100	0,28	8,26	CS IV	0,06	6,40	CS III	0,38	10,57	CS IV
150	0,30	8,02	CS IV	0,11	5,18	CS III	0,56	8,41	CS IV
200	0,38	8,58	CS IV	0,07	5,15	CS III	0,30	8,29	CS IV
250	0,35	7,77	CS IV	0,04	3,96	CS II	0,33	7,28	CS III

Temperatura (°C)	G ^{res10%}		
	Rc média (MPa)	Rc corrigido (MPa)	Classif. EN 998-1*
20	0,34	8,14	CS IV
100	0,47	11,27	CS IV
150	0,69	8,76	CS IV
200	0,41	7,16	CS III
250	0,25	7,28	CS III

Legenda: Rc – valores medidos no equipamento (com anomalias) de resistência à compressão; Rc corrigido - correcção de Rc segundo com *Soares et al., 2015*; * - classificação tendo em conta os valores corrigidos de Rc (2ª coluna)

Desta forma, quanto aos efeitos da exposição das argamassas A^{AE} e C^{aero}, observa-se que ocorreu uma diminuição da resistência à compressão com o aumento da temperatura de exposição das argamassas. Para a argamassa C^{aero}, em específico, a maior redução da resistência à compressão dá-se a partir da temperatura de

exposição de 200 °C, apresentando para a temperatura de 250 °C uma redução aproximada de 23% em relação à argamassa à temperatura de controlo.

Quanto à argamassa B^{GC}, com o aumento de temperatura verificou-se um aumento da resistência à compressão, que foi diminuindo gradualmente, devido à influência da temperatura nas paredes celulares do agregado conforme anteriormente explicado.

Para as argamassas com agregado de areia (figura 4.19), pode-se concluir que, de uma forma geral, o efeito da exposição das argamassas às temperaturas elevadas tem como consequência uma redução da resistência à compressão das mesmas. A resistência à compressão é mais influenciada a partir de temperatura de 150 °C, dando-se a maior perda de resistência para a temperatura de 250 °C para as argamassas D^{ref}, E^{ct}, F^{5%res} e G^{10%res}, com diminuições de 12%, 37%, 28% e 11%, respectivamente, em relação à temperatura de controlo.

Tendo em conta os elevados valores de resistência à compressão obtidos para a argamassa A^{AE}, pode-se considerar que se trata de uma argamassa térmica que para além de poder ser utilizada como argamassa de revestimento, tem boas condições para ser utilizada como argamassa de assentamento.

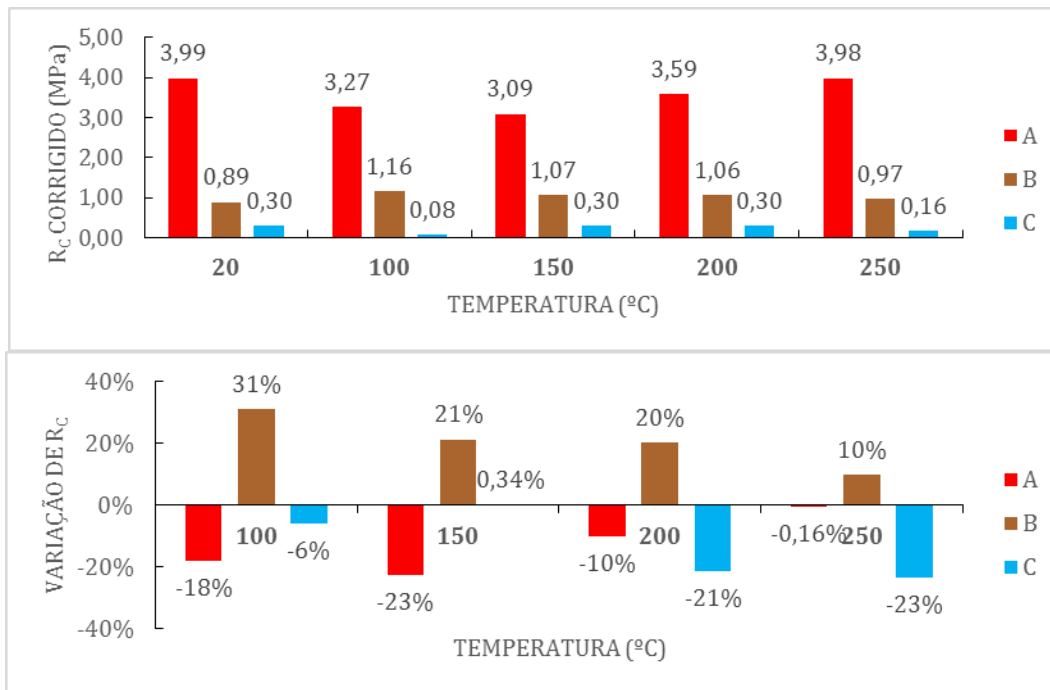


Figura 4.17 – Resistência à compressão das argamassas térmicas (em cima); variação (em %) da resistência à compressão das argamassas térmicas submetidas a temperaturas elevadas relativamente à temperatura de controlo, 20 °C (em baixo)

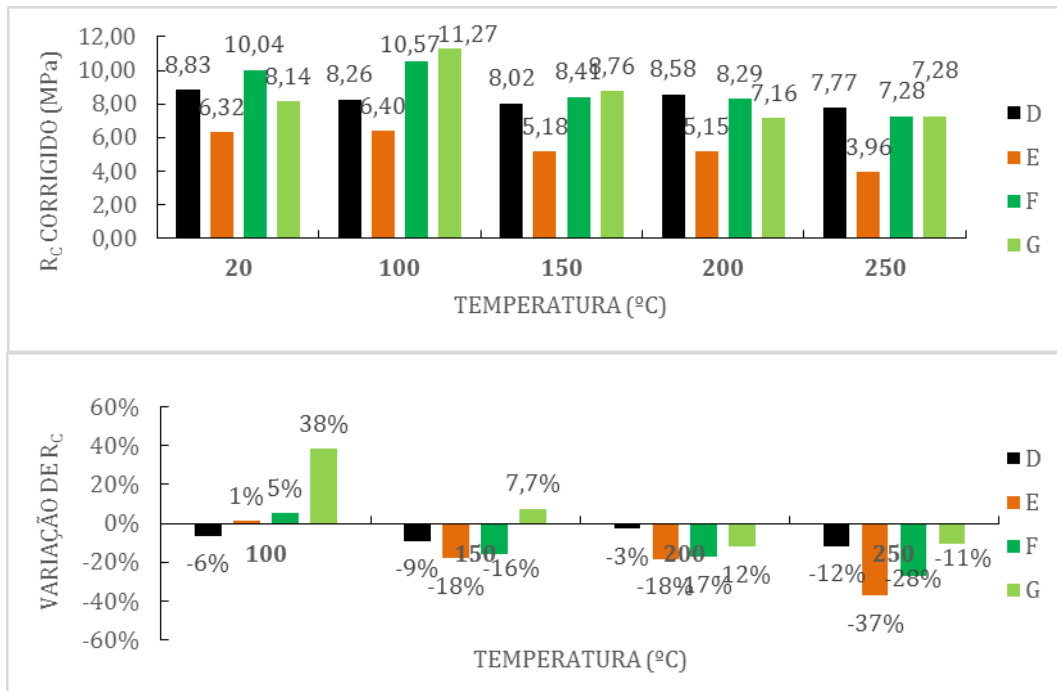


Figura 4.18 – Resistência à compressão das argamassas com agregado de areia (em cima); variação (em %) da resistência à compressão das argamassas com agregado de areia submetidas a temperaturas elevadas relativamente à temperatura de controlo, 20 °C (em baixo)

Como se observa na figura 4.19, existe uma elevada correlação de potência entre a resistência à compressão (corrigida) e a massa volúmica aparente em estado endurecido, com coeficientes de correlação entre 0,61 (150 °C) e 0,97 (250 °C).

E também uma correlação de potência muito forte (R^2 entre 0,92 e 0,97) entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas e a resistência à compressão (figura 4.20). Esta correlação aumenta com a temperatura de exposição das argamassas, fazendo com que os valores de resistência à compressão e velocidade de propagação de ultra-sons se relacionem de forma mais acentuada para temperaturas elevadas.

Obtiveram-se também correlações lineares elevadas entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dinâmico (figura 4.21), com coeficientes de correlação entre 0,81 e 0,92, pouco sensíveis ao aumento de temperatura de exposição. As argamassas mais resistentes apresentam capacidade de deformação menor e módulos de elasticidade mais elevados.

Conforme referido, e de acordo com Magalhães *et al.* (2003), os materiais menos compactos são aqueles que apresentam menores valores de velocidade de propagação comparativamente a materiais mais compactos (com maior massa volúmica aparente), o que se traduz também numa menor resistência mecânica e menor módulo de elasticidade. Assim, torna-se possível relacionar os valores da resistência à compressão com os valores da massa volúmica aparente, velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas e módulo de elasticidade dinâmico.

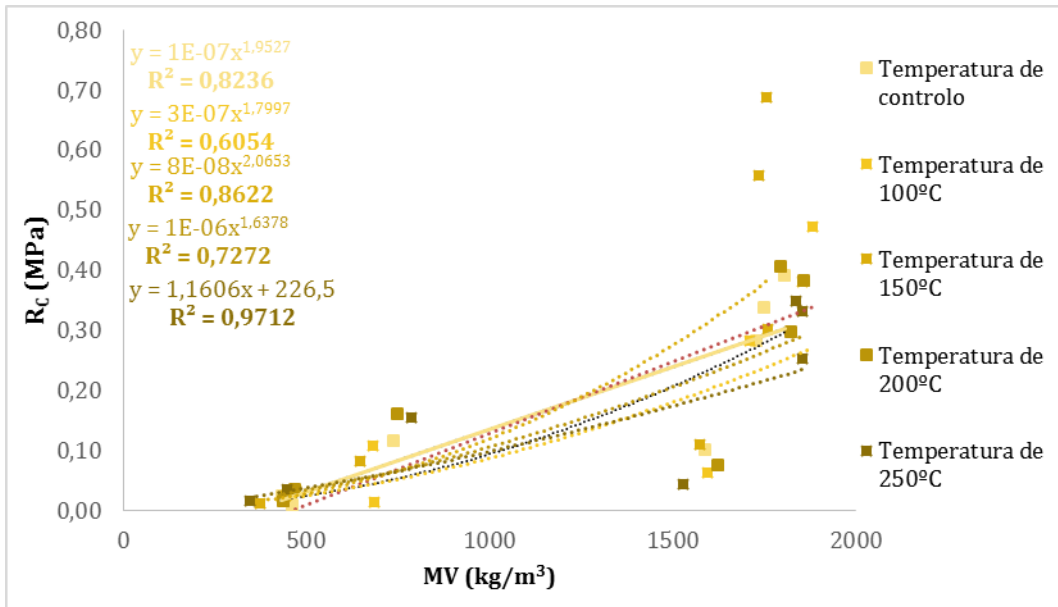


Figura 4.19 – Relação entre a resistência à compressão e a massa volúmica em estado endurecido para as diferentes temperaturas-alvo

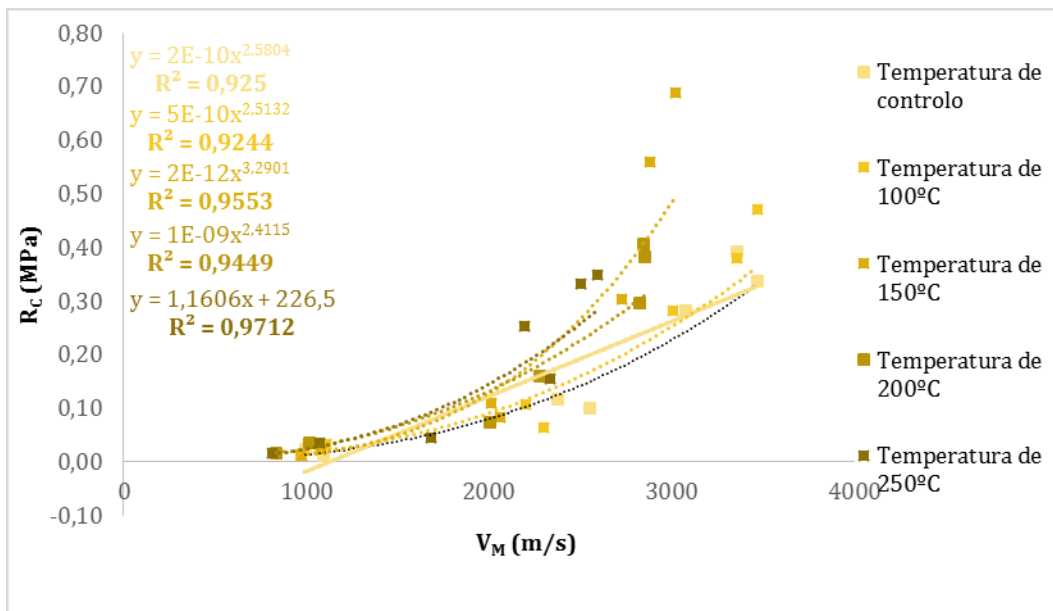


Figura 4.20 – Relação entre a resistência à compressão e a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas para as diferentes temperaturas-alvo

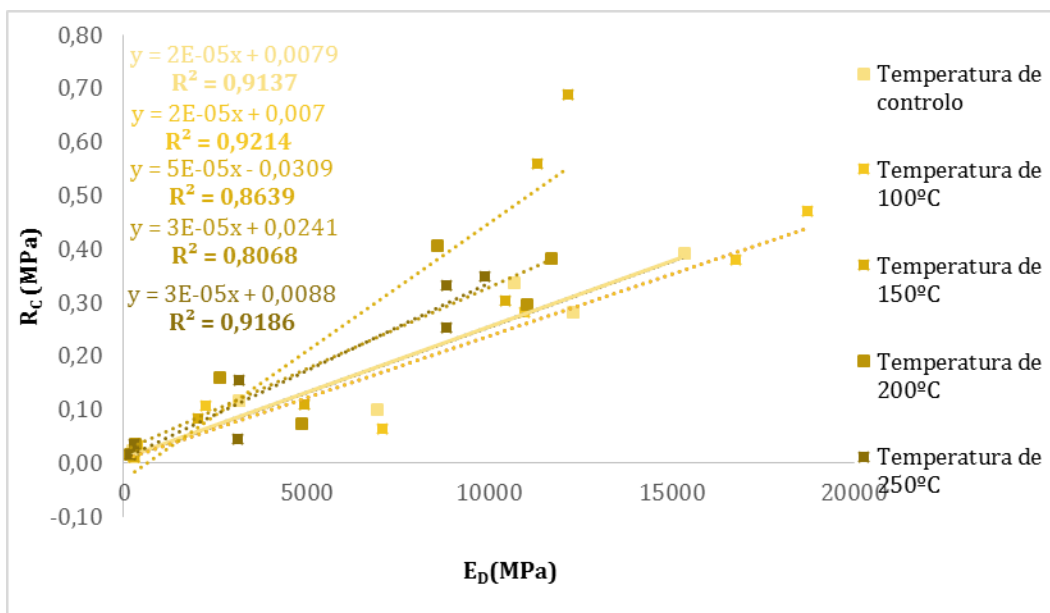


Figura 4.21 – Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dinâmico para as diferentes temperaturas-alvo

4.4.7. Coeficiente de condutibilidade térmica

Apresentam-se na tabela 4.9 os valores médios obtidos para a condutibilidade térmica das argamassas a temperatura ambiente e após serem submetidas a temperaturas elevadas. Para este ensaio foram utilizados os provetes cilíndricos e apenas se estudaram as argamassas para as temperaturas de 20 °C, 150 °C e 250 °C, devido ao facto de se tratar de um ensaio bastante demorado, escolhendo-se assim as temperaturas mais relevantes. Foram excluídas deste ensaio as argamassas com 10% de resina, devido à sua elevada heterogeneidade e instabilidade apresentadas nos resultados anteriores. Apresentam-se no anexo A.6 os resultados individuais do ensaio de condutibilidade térmica.

Tabela 4.9 – Valores médios do coeficiente de condutibilidade térmica

Temperatura (°C)	A ^{AE}	B ^{GC}	C ^{aero}	D ^{ref}	E ^{ct}	F ^{res5%}
	λ	λ	λ	λ	λ	λ
	W/m·K	W/m·K	W/m·K	W/m·K	W/m·K	W/m·K
20	0,202	0,102	0,074	1,987	1,326	1,385
150	0,142	0,078	0,062	1,338	1,122	1,618
250	0,040	0,075	0,060	1,247	0,956	1,364

Legenda: λ – coeficiente de condutibilidade térmica

Para as argamassas que não foram submetidas a temperaturas elevadas, como seria de esperar, as argamassas com agregados isolantes térmicos foram as que apresentaram menor valor de condutibilidade térmica (entre 0,07 e 0,20 W/m·K). Estas argamassas podem ser classificadas como argamassas térmicas por possuírem

coeficientes inferiores a 0,20 W/m·K segundo a norma EN 998-1 (CEN, 2010) e têm a classificação T1 (B^{GC} e C^{AERO}) e T2 (A^{AE}) segundo a mesma norma. As argamassas com agregado de areia apresentaram condutibilidades térmicas entre 1,326 e 1,987 W/m·K.

Dentro das argamassas térmicas, a argamassa A^{AE} foi a que apresentou maior valor de condutibilidade (0,202 W/m·K), logo pior desempenho térmico, com uma condutibilidade térmica cerca de 90% inferior em relação à argamassa de referência (D^{ref}). Para a mesma argamassa mas com adjuvantes na sua constituição, Afonso (2015) obteve o valor ligeiramente inferior de 0,16 W/m·K.

Quanto à argamassa B^{GC}, obteve-se um valor de 0,102 W/m·K de condutibilidade térmica, aproximadamente 95% inferior do que o da argamassa D^{ref}; Afonso (2015) obteve, para a mesma argamassa com adjuvantes, diminuições de 91% em relação à argamassa com 100% de areia.

Os valores mais reduzidos de condutibilidade térmica foram obtidos para a argamassa C^{AERO} (0,074 W/m·K). Para uma argamassa semelhante, Afonso (2015) obteve valores de 0,09 W/m·K.

Em relação às argamassas de areia, obteve-se o valor de 1,97 W/m·K para a argamassa D^{ref} e valores inferiores para as argamassas com adjuvantes na sua constituição, nomeadamente para a argamassa E^{CT} (1,326 W/(m·K)), devido à porosidade acrescida introduzida pelos agentes introdutores de ar e para argamassa F^{5%res}, devido às propriedades da resina que, ao melhorar a ligação dos componentes da argamassa, contribui para a redução da condutibilidade térmica (Demirboğa, 2003; Ximenes *et al.*, 2016). Para uma argamassa semelhante à argamassa D^{ref}, Afonso (2015) obteve valores de condutibilidade térmica de 1,63 W/m·K; segundo o ITE 50 (LNEC, 2006) para uma argamassa tradicional com uma massa volúmica entre 1800 a 2000 kg/m³ o valor de condutibilidade térmica esperado é de 1,3 W/m·K.

Apresenta-se na figura 4.22 a síntese da condutibilidade térmica das argamassas estudadas e a variação (em %) da condutibilidade térmica das argamassas estudadas quando submetidas a temperaturas elevadas em relação às argamassas de temperatura de controlo.

Relativamente aos efeitos da exposição das argamassas a temperaturas elevadas ao nível da condutibilidade térmica, observa-se que o aumento da temperatura melhora o desempenho térmico das argamassas, excepto para o caso da argamassa F^{5%res} com 5% de resina na sua constituição, onde tal não se verificou para a temperatura de exposição de 150 °C, presumivelmente devido à deterioração da resina que contribuía para a diminuição do coeficiente de condutibilidade térmica da argamassa.

O coeficiente de condutibilidade térmica das argamassas térmicas sofreu diminuições entre 14% a 33% para a temperatura de 150 °C e entre 16% e 80% para a temperatura de 250 °C em relação à temperatura de controlo. Dentro deste grupo de argamassas, a maior redução deu-se na argamassa A^{AE} aquando da exposição à temperatura de 250 °C (80%).

O coeficiente de condutibilidade térmica das argamassas com agregado de areia sofreu diminuições entre 15% e 33% para a temperatura de 150 °C e entre 28% e 37% para a temperatura de 250 °C. Dentro deste

grupo de argamassas, a maior variação deu-se para a argamassa D^{ref} após exposição à temperatura de 250 °C (37%).

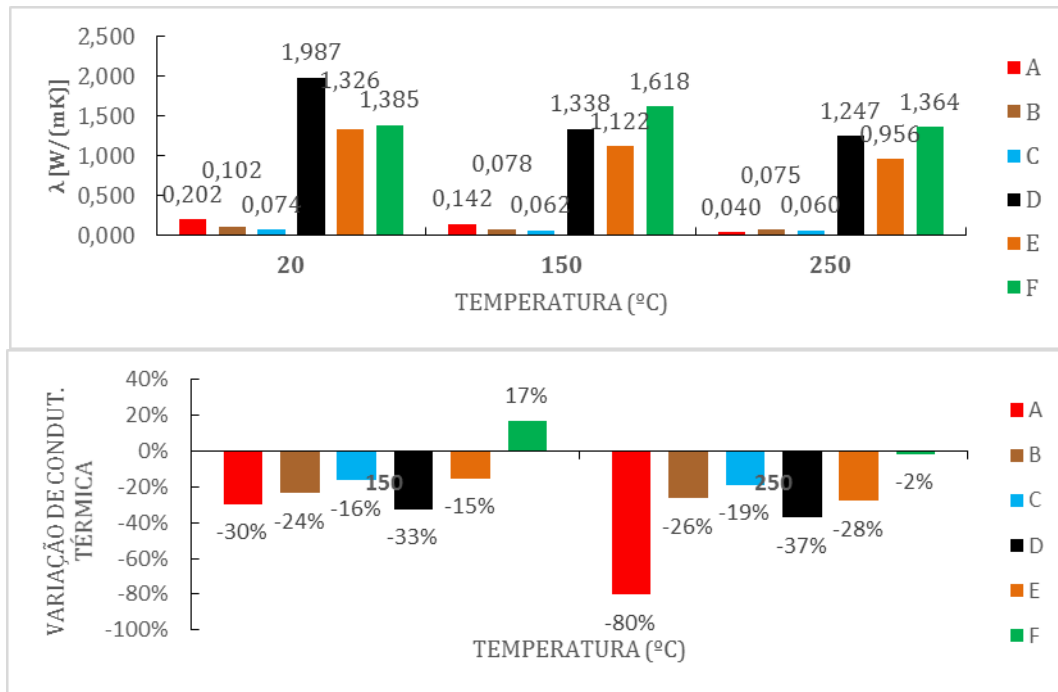


Figura 4.22 – Condutibilidade térmica das argamassas (em cima); variação (em %) da condutibilidade térmica das argamassas submetidas a temperaturas elevadas relativamente à temperatura de controlo, 20 °C (em baixo)

Com o aumento da temperatura, como se verificou em ensaios anteriores, as argamassas tendem a diminuir a sua compactidade, a perder rigidez, a aumentar o número de vazios e número de microfissuras e consequentemente, a reduzir o seu coeficiente de condutibilidade térmica.

Nas figuras 4.24 a 4.27 apresentam-se as relações entre a condutibilidade térmica e a massa volúmica, a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão e ainda a influência da temperatura nas mesmas relações.

Na figura 4.23 observa-se uma correlação de potência com coeficiente de correlação superior a 0,90 para a temperatura de controlo, 150 °C e 250 °C, entre a massa volúmica no estado endurecido e a condutibilidade térmica. Mais uma vez, observa-se que as argamassas leves, ou seja, as que possuem a menor massa volúmica, são também as que apresentam menores coeficientes de condutibilidade térmica. Vale (2014) e Melo (2014) também obtiveram correlações de potência significativas entre estes dois parâmetros para argamassas leves (0,88). O aumento de temperatura não introduz alterações significativas visto que os coeficientes de correlação se mantêm bastante elevados para as duas temperaturas elevadas.

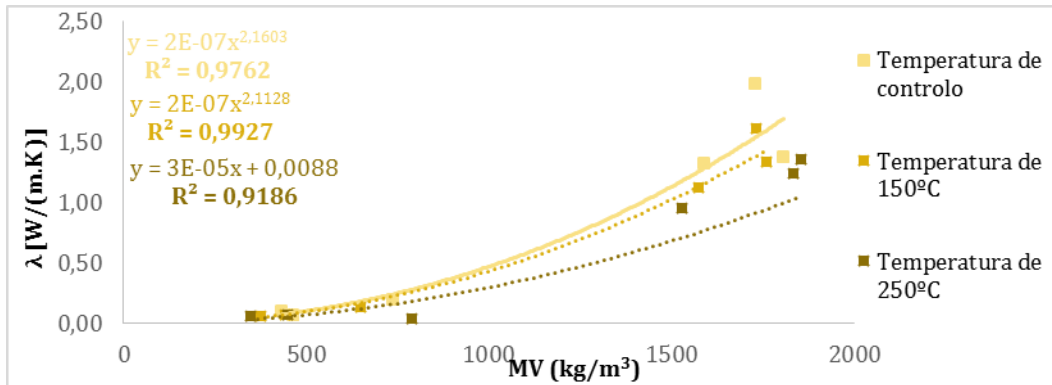


Figura 4.23 – Relação entre a condutibilidade térmica e a massa volúmica aparente para as diferentes temperaturas-alvo

Quanto à relação entre a condutibilidade térmica e a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas (figura 4.24), verificou-se uma elevada correlação para as argamassas de temperatura de controlo (coeficiente de correlação de 0,81), que diminuiu com o aumento de temperatura, obtendo-se de 0,76 para a temperatura de 150 °C e 0,45 para a temperatura de 250 °C. Afonso (2015) obteve um coeficiente de correlação para estes dois parâmetros de 0,79.

Na figura 4.25 observa-se uma correlação linear entre a condutibilidade térmica e o módulo de elasticidade dinâmico, com coeficientes de correlação de 0,79, 0,91 e 0,77 para a temperatura de controlo, 150 °C e 250 °C, respectivamente. Afonso (2015) obteve um coeficiente de correlação para estes dois parâmetros bastante elevado de 0,91 (equivalente ao obtido para a temperatura de 150 °C).

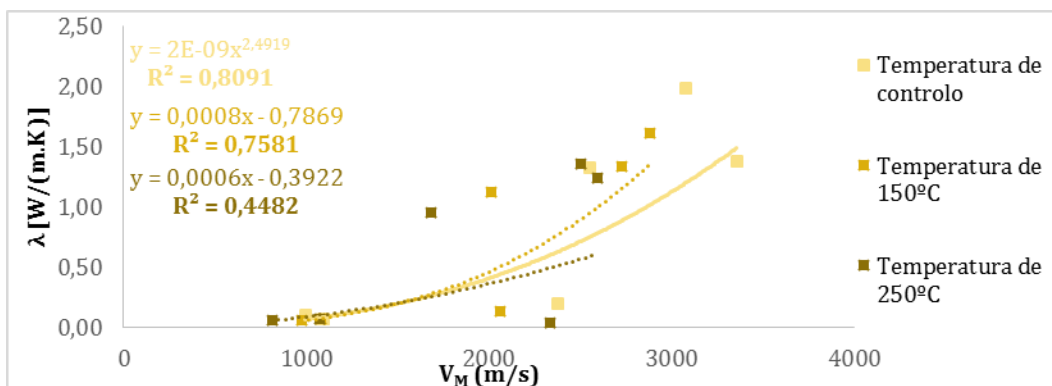


Figura 4.24 – Relação entre a condutibilidade térmica e a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas para as diferentes temperaturas-alvo

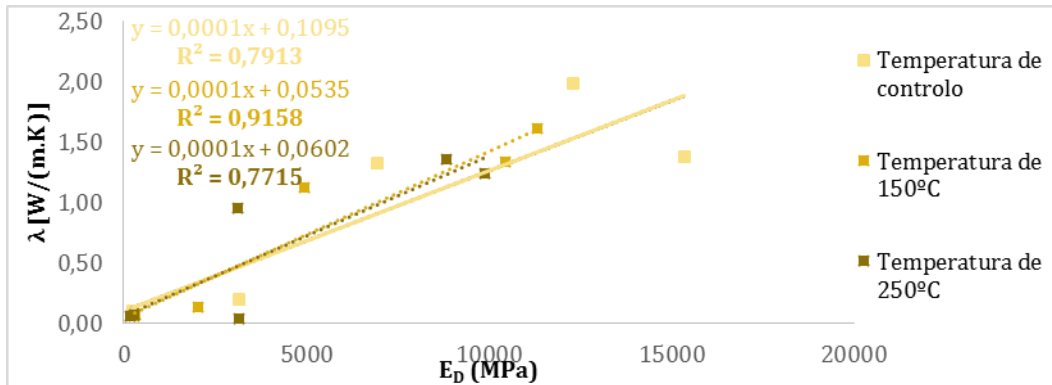


Figura 4.25 – Relação entre a condutibilidade térmica e o módulo de elasticidade dinâmico para as diferentes temperaturas-alvo

Na figura 4.26 ilustra-se a influência da temperatura na relação entre a condutibilidade térmica e a resistência à compressão. Os valores do coeficiente de correlação linear variam entre 0,56 e 0,75. Afonso (2015) e Vale (2014) obtiveram para a relação entre estes dois parâmetros (sem exposição a temperaturas elevadas) valores do coeficiente de correlação de 0,76 e 0,74 respectivamente.

Verificaram-se correlações elevadas entre a condutibilidade térmica e a massa volúmica aparente em estado endurecido, a velocidade das ondas ultra-sónicas, o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão, mesmo após a exposição das argamassas às temperaturas elevadas. Como anteriormente referido, em regra geral, as argamassas menos compactas e com menor capacidade de deformação, são aquelas que apresentam menores massas volúmicas, maior quantidade de vazios e, conseqüentemente, uma condutibilidade térmica mais reduzida. Os efeitos da temperatura vão variando de material em material, mas, apesar de alterarem (ligeira a moderadamente) os valores de coeficiente de correlação, a relação entre os parâmetros mantém-se.

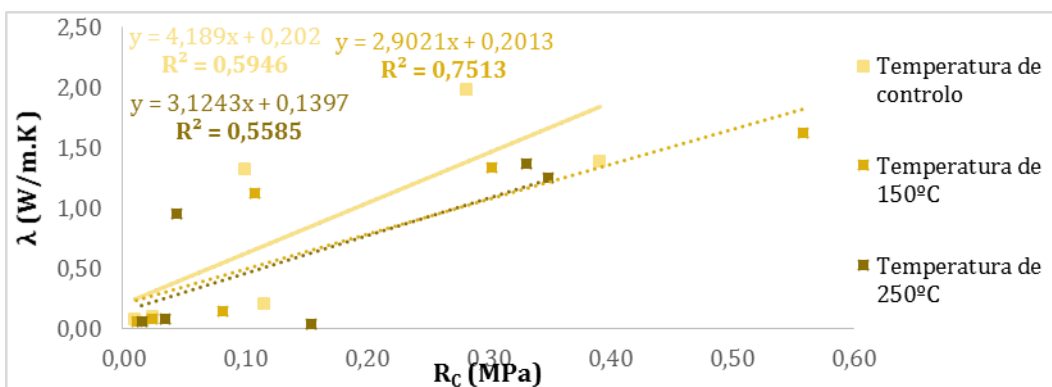


Figura 4.26 – Relação entre a condutibilidade térmica e a resistência à compressão para as diferentes temperaturas-alvo

4.4. Conclusão do capítulo

Os resultados obtidos permitem confirmar que a presença dos agregados isolantes nas argamassas térmicas estudadas tem os seguintes efeitos principais em relação às argamassas com agregado de areia: massa volúmica em estado endurecido reduzida, baixa velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, reduzido módulo de elasticidade dinâmica e de torção dinâmica, reduzida resistência à compressão e, como seria de esperar, reduzido coeficiente de condutibilidade térmica. Tal deve-se, em grande parte, à sua menor compacidade e maior capacidade de deformação.

Quanto aos efeitos da exposição às temperaturas elevadas destas argamassas, é importante ter em conta os agregados utilizados e as suas propriedades, a proporção dos adjuvantes utilizados e as condições de ensaio. Desta forma, e após os estudos efectuados, conclui-se que, comparativamente às argamassas que não foram submetidas a aumentos de temperatura, de uma forma geral, a argamassa de aerogel com introdutores de ar e éter de celulose (CA^{AERO}) foi mais sensível à temperatura a partir de 200 °C e as argamassas de areia com adjuvantes (éter de celulose, introdutores de ar e resina) apresentaram alterações a partir de 150 °C, que afectaram a sua massa volúmica, a sua velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, o seu módulo de elasticidade dinâmico, módulo de torção dinâmico, coeficiente de *Poisson*, a sua resistência à compressão e a sua condutibilidade térmica. Quanto à argamassa de argila expandida (A^{AE}), as temperaturas elevadas tiveram influência pouco significativa na massa volúmica em estado endurecido e velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, mas apresentaram diminuições de módulo de elasticidade dinâmico, coeficiente de *Poisson* e resistência à compressão. A argamassa de granulado de cortiça (B^{GC}) em particular, apresentou um aumento de velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, módulo de elasticidade dinâmico e resistência à compressão a partir de 100 °C devido às propriedades do próprio agregado a temperaturas elevadas. Quanto ao desempenho térmico, todas as argamassas em estudo apresentaram reduções de coeficiente de condutibilidade térmica para 250 °C. Esta redução de coeficiente de condutibilidade térmica está associada ao aumento da porosidade das argamassas. Tendo em conta as propriedades analisadas, as argamassas de argila expandida (A^{AE}) e granulado de cortiça (B^{GC}) foram as menos sensíveis à influência das temperaturas elevadas.

O comportamento físico e mecânico das argamassas quando expostas a temperaturas elevadas foi influenciado pelos agregados de cada argamassa e, em grande parte, pela utilização dos adjuvantes, em particular os introdutores de ar e a resina, ao reduzirem a compacidade das argamassas e funcionando como agente ligante, respectivamente.

Quanto às relações entre os diferentes parâmetros que caracterizam as argamassas, observou-se uma reduzida influência das temperaturas elevadas nas correlações existentes a temperatura ambiente; de facto, a temperatura elevada parece ter afectado apenas as correlações entre a massa volúmica aparente em estado endurecido e a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, reduzindo o coeficiente de correlação para a temperatura de 250 °C, e entre a condutibilidade térmica e a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, reduzindo o coeficiente de correlação para a mesma temperatura.

5. Conclusões e desenvolvimentos futuros

5.1. Considerações finais

Este estudo teve como principal objectivo a caracterização experimental de argamassas térmicas quando submetidas a temperaturas elevadas. Para tal, procedeu-se à exposição de um conjunto de argamassas produzidas em laboratório a temperaturas entre 20 °C e 250 °C e foram realizados ensaios que incidiram, no estado fresco, sobre a massa volúmica e espalhamento das argamassas e, no estado endurecido, sobre a sua massa volúmica, velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, módulo de elasticidade dinâmico, módulo de torção dinâmico, coeficiente de *Poisson*, resistência à compressão e condutibilidade térmica.

Desta forma, tendo em conta a pesquisa bibliográfica efectuada, o trabalho desenvolvido na campanha experimental e os resultados obtidos constituem um contributo válido para a investigação do comportamento de argamassas térmicas em diferentes condições de serviço, tendo fornecido diversas conclusões apresentadas de seguida.

5.2. Conclusões finais

De uma maneira geral, o comportamento físico e mecânico das argamassas térmicas em estudo foi influenciado pela exposição a temperaturas elevadas. Esta influência tem como possíveis causas o aumento da porosidade das argamassas com a evaporação da água, levando a um aumento do número de vazios, ao aumento da ocorrência de microfissuração causada pela retracção e pelos diferentes coeficientes de dilatação dos materiais constituintes das argamassas, e à deterioração dos adjuvantes, em particular da resina utilizada nas argamassas de areia com 5% e 10% de resina ($F^{5\%res}$ e $G^{10\%res}$).

Em relação à massa volúmica, esta revelou-se pouco sensível ao efeito das temperaturas elevadas, com variações na ordem dos 10% (coeficientes de variação de aproximadamente 5%) para praticamente todas as argamassas estudadas, por comparação com a respectiva argamassa à temperatura de controlo. No entanto, a argamassa de aerogel (C^{AERO}) apresentou maiores reduções de massa volúmica a partir de 150 °C, com uma redução de 25% para a temperatura de exposição de 250 °C, em grande parte devido aos adjuvantes presentes na sua constituição.

Relativamente à velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, verificaram-se alterações pouco significativas para as argamassas com agregado de argila expandida (A^{AE}) e granulado de cortiça expandida (B^{GC}). A argamassa de aerogel (C^{AERO}) foi sensível à exposição a temperaturas a partir de 200 °C, com uma redução da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas de 25% após exposição a 250 °C. As argamassas com agregado de areia sofreram reduções da velocidade de propagação de ultra-sons com a exposição às temperaturas elevadas, sendo tais reduções mais acentuadas para as argamassas com adjuvantes na sua constituição (E^{CT} e $F^{5\%res}$) a partir de 100 °C, com reduções máximas (para a temperatura de exposição de

250 °C) de 34% e 25%, respectivamente. A redução da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas confirma a presença de descontinuidades internas nas argamassas (vazios e microfissuração).

Em relação ao módulo de elasticidade dinâmico, após a exposição a temperaturas elevadas, ocorreram reduções a partir de 200 °C para a argamassa de aerogel (C^{AERO}), com reduções máximas de 37% para 250 °C. As argamassas de argila expandida (A^{AE}) e de referência (D^{ref}) apresentaram reduções entre 17% e 29% e entre 5% e 20%, respectivamente, com o aumento da temperatura. Na argamassa de granulado de cortiça expandida (B^{GC}) o módulo de elasticidade dinâmico aumentou, presumivelmente devido ao efeito do endireitamento das paredes celulares da cortiça, influenciado pelas temperaturas elevadas. Quanto às argamassas com adjuvantes (E^{CT} e $F^{5\%res}$), estas apresentaram reduzida sensibilidade às temperaturas elevadas até 150 °C, mas, a partir dessa temperatura, ocorreram reduções no seu módulo de elasticidade, entre 29% e 55% e entre 26% e 42%, respectivamente. De uma forma geral, o módulo de torção dinâmico e o coeficiente de *Poisson* tiveram comportamentos semelhantes ao módulo de elasticidade dinâmico, diminuindo com o aumento de temperatura. Este comportamento associa-se a uma perda de rigidez das argamassas.

Relativamente à resistência à compressão (obtida por correlação com o módulo de elasticidade dinâmico) ocorreram reduções para a argamassa de aerogel (C^{AERO}) a partir de 200 °C e para as argamassas com adjuvantes (E^{CT} , $F^{5\%res}$ e $G^{10\%res}$) a partir de 150 °C. Expectavelmente, devido ao já referido fenómeno de endireitamento das paredes celulares da cortiça, a resistência à compressão da argamassa de granulado de cortiça expandida (B^{GC}) aumentou a partir da exposição a 100 °C, cerca de 21%. Segundo a norma EN 998-1 (CEN, 2010), as argamassas térmicas classificam-se como CS I ou CS II, e devem apresentar resistências à compressão entre 0,4 MPa e 5 MPa. As argamassas térmicas estudadas após exposição a temperaturas elevadas e apesar da perda de características mecânicas, apresentam valores de resistência à compressão entre 0,76 MPa e 3,09 MPa, verificando as classes de resistência mínima.

Em termos de desempenho térmico, após exposição a 250 °C, todas as argamassas sofreram uma redução da sua condutibilidade térmica. Esta melhoria poderá ter estado associada à possível alteração da estrutura interna das argamassas, em termos do aumento da sua porosidade e da sua microfissuração. Neste contexto, considera-se que estas argamassas continuam a ter um bom desempenho térmico mesmo quando expostas a temperatura elevadas. Desta forma, todas as argamassas com agregados isolantes térmicos podem ser classificadas como argamassas térmicas segundo a norma EN998-1 (CEN, 2010), visto possuírem um coeficiente de condutibilidade térmica inferior a 0,2 W/m.K, mesmo após a exposição a temperaturas elevadas.

Por outro lado, a exposição das argamassas a temperaturas elevadas teve pouca influência ao nível das correlações entre os diferentes parâmetros estudados, mostrando, de uma forma geral, que esta exposição afecta de forma praticamente semelhante e linear as argamassas em estudo. Apenas as relações de linearidade entre a massa volúmica em estado endurecido e a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, e entre a condutibilidade térmica e a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas foram afectadas pelas

temperaturas elevadas, em grande parte devido às características dos agregados das argamassas em estudo.

Em suma, as argamassas térmicas estudadas são adequadas para a realização de revestimentos de paredes exteriores e interiores, de isolamento térmico. Apesar de tenderem a manter as suas características isolantes quando expostas a temperaturas elevadas, sofrem alterações internas e de resistência mecânica para temperaturas de exposição a partir de 100 °C. Neste contexto, considera-se que poderá ser necessária a incorporação de materiais específicos (adições, entre outros), que lhes confirmam maior resistência a temperaturas elevadas causadas por incêndios em edifícios correntes ou em aplicações industriais específicas e agressivas.

Os resultados da campanha experimental mostram que as argamassas mais sensíveis ao efeito da temperatura são a argamassa de aerogel e as argamassas de areia, ambas com adjuvantes na sua constituição e que a temperatura mais crítica para estas argamassas é de 150 °C. As argamassas de argila expandida (A^{AE}) e granulado de cortiça expandida (B^{GC}) foram as que apresentaram menor sensibilidade aos efeitos das temperaturas elevadas. No entanto, a argamassa de granulado de cortiça expandida (B^{GC}) apresentou aumentos de resistência mecânica devido às propriedades internas do seu agregado.

Relativamente à argamassa de aerogel (C^{AERO}), apesar de incorporar um agregado que resiste *per si* a cerca de 1600 °C, a sua pasta ligante, que incorpora adjuvantes, conduziu a um pior desempenho após exposição a temperaturas elevadas. A melhoria na formulação desta argamassa passa pelo ajuste da quantidade de tensoactivos e consecutiva diminuição da quantidade de água de amassadura, minimizando o presumível aumento do número de vazios após exposição a temperaturas elevadas.

5.3. Propostas de desenvolvimentos futuros

Em geral, as argamassas estudadas neste trabalho, bem como os agregados isolantes e adjuvantes utilizados, devem ser alvo de estudos experimentais adicionais, de forma a aprofundar o conhecimento sobre a influência da temperatura em cada material, a par de outros aspectos ainda pouco conhecidos para estas argamassas. Assim, no sentido de dar continuidade ao estudo desenvolvido nesta dissertação, sugerem-se os seguintes desenvolvimentos futuros:

- Exposição das argamassas a temperaturas ainda mais elevadas para os parâmetros que apresentaram menor variação neste estudo.
- Estudo da reacção ao fogo das argamassas ensaiadas neste estudo, nomeadamente das que incorporam agregados ou aditivos orgânicos.
- Produção de argamassas térmicas tradicionais utilizando um ligante diferente do cimento (por exemplo, a cal) e proceder à respectiva caracterização a temperaturas elevadas e a variações de temperatura.
- Avaliação da influência das dimensões e da curva granulométrica dos agregados isolantes no

comportamento das argamassas quando expostas a temperaturas elevadas.

- Estudo da influência isolada dos adjuvantes e de adições nas argamassas estudadas.
- Avaliação da influência do método e tempo de mistura das argamassas, nomeadamente para a argamassa de aerogel.
- Estudo da possibilidade de utilização de agregados isolantes que, juntamente com adjuvantes ou adições, consigam garantir uma melhor resistência mecânica, nomeadamente aquando da exposição a temperaturas elevadas.

Referências bibliográficas

- Aköz, F. (1995)** – “The influence of High Temperature on the Physical and Mechanical Properties on Ordinary Portland Cement and Silica Fume Mortar”, *Teknik Dergi*, Vol. 6, Nº1, Istanbul, pp. 919-931
- Alves, A. (2010)** – “Durabilidade de argamassas poliméricas de agregados leves”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias - Universidade Nova de Lisboa
- APFAC (2005)** – “Situação do Sector das Argamassas em Portugal”. 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Lisboa, APFAC, CD.
- Appleton, J. (2003)** – “Reabilitação de Edifícios Antigos. Patologias e tecnologias de intervenção”. Edições Orion.
- Appleton, J.; Costa, A. (2002)** – “Estruturas de Betão I – Parte II – Materiais”, Departamento de Engenharia Civil, Grupo de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado, IST, 65 p.
- 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 Integrado 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*, Vol. 3, Nº 2 (2002), pp. 85-98.
- 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*, Vol. 48, pp. 460–465.
- Bauer, F. (2000)** – “Materiais de Construção”, LTC Editora revisada, 5ª Edição. Volume 1, Rio de Janeiro, 2000
- Belgas da Costa, M. (2011)** – “Caracterização das propriedades físicas, mecânicas e térmicas de betões com incorporação de cortiça”. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Coimbra, Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade de Coimbra
- Botas, S. (2009)** – “Avaliação do Comportamento de Argamassas em Climas Frios”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade Ciências e Tecnologias – Universidade Nova de Lisboa
- Brás, A.; Leal, M.; Faria, P. (2012)** – “Argamassas com comportamento melhorado com materiais sustentáveis”. 2ª Conferência Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono, Lisboa, 2012.

BSI (1986) – “Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete”. BS 1881-203. British Standards Institution.

BSI (2000) – “Concrete. Specification, performance, production and conformity”. BS 206-1. British Standards Institution.

BSI (2002) – “Lightweight aggregates. Lightweight aggregates for concrete, mortar and grout”. BS 13055-1. British Standards Institution.

Cagnon, H.; Vidal, T.; Sellier, A.; Soula, C.; Bourbon, X.; Camps, G. (2015) - “Effects of water and temperature variations on deformation of limestone aggregates, cement paste, mortar and High Performance Concrete (HPC)”, Cement and Concrete Composites, Vol. 71, pp. 131-143

Carneiro, L. (2013) – “Resistência a Altas Temperaturas de Argamassas Com Incorporação de Materiais de Mudança de Fase (PCM)”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho – Escola de Engenharia

Carvalho, R.; Teixeira-Dias, F.; Varum, H. (2012) – “Cyclic behaviour of a lightweight mortar with cork granulate composite”. Composite Structures 95 (2013), pp. 748–755.

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

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

CEN (1999) – 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 (1999) – “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 (1999) – “Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)”. EN 1015-3. 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.

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

Cüllfik, M., Özturan, T. – “Effect of elevated temperatures on the residual mechanical properties of high-performance mortar”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32 (2002), pp. 809-816

Cunha, S.; Carneiro, L.; Aguiar, J.; Pacheco-Torgal, F., Ferreira, V.; Tadeu, A. (2014) - “Comportamento de argamassas com incorporação de materiais de mudança de fase submetidas a elevadas temperaturas”, Universidade do Minho, RepositoriUM, pp 71-83

Demirböğa, R. (2003) – “Thermo-mechanical properties of sand and high volume mineral admixtures”, *Energy Build*, vol. 35 (2003), pp. 435-439

Diário da República (2008) - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (RRAE). Decreto Lei 96/2008 de 09/06.

Elsen, J. (2005) – “Microscopy of historic mortars — a review”, *Cement and Concrete Research* 36 (2006) pp. 1416–1424.

Esteves, D. (2010) – “Desenvolvimento, caracterização e avaliação do comportamento termo-mecânico de um material constituído principalmente por cortiça”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa

Farange, M.C.R.; Sercombe, J.; Gallé, C. (2003) – “Rehydration and microstructure of cement paste after heating at temperatures up to 300 °C”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33 (2003), N^o7, pp. 1047-1056

Faria P. (2012) – “Argamassas Sustentáveis”. 2^a 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”. APFAC, Congresso 2007.

Flores-Colen, I.; de Brito, J.; Soares, A. (2013) – “A nanotecnologia aplicada às argamassas de revestimento”. *Construlink* 34, vol. 11 (2013), pp. 43-51.

Flores-Colen, I. (2009)- “Metodologia de avaliação do desempenho em serviço de fachadas rebocadas na óptica da manutenção predictive”, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa

Fortes, M.A.; Rosa, M.E.; Pereira, H. (2004) – “A Cortiça”, IST Press, Lisboa

Frade, D.; Tadeu, A.; Torres, I.; Mendes, P.A.; Simões, N.; Matias, G.; Neves, A. (2012). – “Argamassas industriais com incorporação de granulado de cortiça”. APFAC, Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas de Construção. Congresso, 2012.

Fu, X.; Chung, D. (1997) - “Effects of silica fume, latex, methylcellulose, and carbon fibres on the thermal conductivity and specific heat of cement paste”. *Cement and Concrete Research* 27, N^o12, pp. 1799-1804.

Gambhir, M. (2004) – Concrete Technology, 1ª ed. Tata McGraw Hill, 2004.

Gil, L. (2007) – “A Cortiça como material de construção” – Manual Técnico. APCOR, 2007.

Gomes, R.; Veiga, M.; de Brito, J. (2005) - “Influência dos procedimentos de execução em rebocos correntes”. 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Lisboa, APFAC, CD.

Gominho, M. (2016) – “Caracterização Microestrutural de Argamassas”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa

Gonçalves, A. (2010) – “Estudo da influência dos factores de aplicação no desempenho de argamassas de revestimento recorrendo a técnicas de ensaio in-situ”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 155 p.

Handoo S.K. ; Agarwal S. , Agarwal S.K. (2000) - “Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures”, Cement and Concrete Research, Vol. 32 (2002), Nº 7, pp. 1009-1018

Hanus, M.; Harris, A. (2013) – “Nanotechnology innovations for the construction industry”. Progress in Materials Science 58, pp. 1056-1112.

IPQ (1999) – “Ensaio para determinação das características geométricas dos agregados. Parte 2: Determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas”. NP EN 933-2:1999. Lisboa: Instituto Português da Qualidade

IPQ (2002) – “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios”. NP EN 1097-3:2002 (Ed.2). Lisboa: Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2006) – Métodos de ensaio de cimentos – Parte 1: Determinação das resistências mecânicas. NP EN 196-1:2006. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2010) – “Agregados Para Betão”. NP EN 12620:2001/A1:2010. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.

Júlio, M.; Ilharco, L. (2014) – “Superhydrophobic hybrid aerogel powders from waterglass with distinctive applications”. Microporous and Mesoporous Materials, Vol.199, pp. 29–39.

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

Kim, S.; Seo, J.; Cha, J.; Kim, S. (2012) – “Chemical retreating for gel-typed aerogel and insulation performance of cement containing aerogel”. Construction and Building Materials, Vol. 40, pp. 501–505.

Labrincha, J.; Samagaio A.; Vicente R. (2006) – “Associação para o desenvolvimento da casa do futuro - Sub projecto de isolamento térmico” – Universidade de Aveiro, 57 p.

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

Lion, M.; Skoczylas, F.; Lafhaj, Z.; Sersar, M. (2005) – “Experimental study on a mortar. Temperature effects on porosity and permeability. Residual properties or direct measurements under temperature”, *Cement and Concrete Research*, vol. 35, 10, pp. 1937-1942

LNEC (1996) – Curso de especialização sobre revestimentos de paredes. Coordenação M. R. Veiga, LNEC, Lisboa

Lourenci, S. (2003) – “Caracterização de argamassas de revestimento fabricadas como materiais alternativos”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Centro de Ciências e Tecnologias - Universidade do Estado de Santa Catarina, 129p.

Lourenço, J; Júlio, A; Maranhã, P. (2004) - “Betões de agregados leves de argila expandida”, APEB, Lisboa

Low, K.; Soon-Ching, N. (2010) – “Thermal conductivity of newspaper sandwiched aerated lightweight concret panel”, *Energy and Buildings*, Vol. 42 (2010), pp 2452-2456.

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: 3^o ENCORE –Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pp. 419-427.

Martins, M. (2010) – “Comportamento físico de argamassas de reboco com regranulado negro de cortiça”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 119 p.

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.

Mendonça, B.V. (2007). – “Estudo do Desempenho das Argamassas Hidráulicas”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa

Nepomuceno, M. C. S.; Silva, P. D. (2014) – “Experimental evaluation of cement mortars with phase change material incorporated via lightweight expanded clay aggregate”. *Construction and Building Materials* 63, pp. 89–96.

Nóvoa, P.; Ribeiro, M.; Ferreira, A.; Marques, A. (2004) – “Mechanical characterization of lightweight polymer mortar modified with cork granulates”, *Composites Science and Technology*, Vol. 64, pp. 2197-2205.

Nunes, A.; Jacinto, D. (2011) – “Argamassa leve preparada com granulado de cortiça”. Patente PT 105937, Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

Paiva, H.; Silva, L. M.; Labrincha, J. A.; Ferreira, V. M. (2007) – “Efeito de Adjuvantes Sobre a Reologia de uma Argamassa”. APFAC Congresso

Panesar, D.; Shindman, B. (2012) – “The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork”. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 34, 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*, Vol. 41, pp. 46-55.

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

Pinto, Ana Paula Ferreira; Gomes, Augusto; Pinto, J. Bessa (2006) – “Materiais de Construção I – Argamassas”; Vol. 4, “Argamassas”, IST, Lisboa, 2006

Riffat, S.; Qiu, G. (2011) – “A review of state-of-the-art aerogel applications in buildings”, Oxford University Press, Vol. 8, N^o7, pp. 1-6.

Recena, F.A.P. (2008) – “Conhecendo a Argamassa”, 1^a Edição, Ediprucs, Brasil, 2008

REH (2013) – “Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH)”, Decreto-Lei 118/2013 de 20 Agosto, Portaria n^o 349-B/2013 de 29 Novembro.

Moret Rodrigues, A.; Canha Piedade, A.; Braga, A.M. (2009)– “Térmica de Edifícios”, 1^a Edição, Edições Orion, Alfragide, 2009, 673 p.

Santos, C.; Matias, L. (2006) – “Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios”, ICT Informação Técnica, Edifícios – ITE 50, Lisboa

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”. Congresso PATORREB, Lisboa.

Silva, B. (2007) – “Betão Leve Estrutural Com Agregados de Argila Expandida”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 180 p.

Skants, E. (2014) – “Effect of elevated temperature on cement paste ageing”, Master’s thesis submitted for the degree of Master of Science in Technology Espoo, Aalto University, Finland

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

Vale, H. (2014) – “Caracterização experimental do comportamento mecânico de argamassas de desempenho térmico melhorado”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 147 p.

Vašina, M.; Hughes, D.C.; Horoshenkov, K.V.; Lapčík Jr., L. (2006) – “The acoustical properties of consolidated expanded clay granulates”. *Applied Acoustics*, Vol. 67, 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, Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 522 p.

Veiga

Veiga, M. R. (2010) – “Contribuição das argamassas e dos ETICS para a eficiência energética dos edifícios”. Seminário TEKTÓNICA, LNEC, Lisboa.

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

Ximenes, S.; Silva, A., Soares, A.; Flores-Colen, I.; Brito, J. (2016) – “Parametric Analysis to Study the Influence of Aerogel-Based Renders’ Components on Thermal and Mechanical Performance”, *Materials*, Vol.9, N°5, 336 p.

Referências de *Internet*

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

[W2] Aerogel Technologies - <http://www.aerogeltechnologies.com>, consultado em Julho de 2016.

Anexos

Anexo A.1. Produção das argamassas

Para a produção das argamassas, foram utilizados uma balança, recipientes para proceder à pesagem dos materiais, duas misturadoras mecânicas e respectivo recipiente de mistura, espátula e colher de plástico. Por condicionarem o comportamento da argamassa, no estado fresco e endurecido, manteve-se constante o tempo, o processo de mistura, a ordem de introdução dos materiais e os equipamentos utilizados.

Para a produção da argamassa de aerogel com introdutores de ar e éter de celulose, foram utilizadas duas misturadoras diferentes: uma misturadora vibratória (figura A.3.1.1), com a função de agitar os agregados de forma a facilitar e possibilitar a actuação dos agentes introdutores de ar, que possibilitam a mistura do aerogel, extremamente hidrofóbico, com a água, chegando-se por tentativa e erro ao período de agitação de 4 minutos; e uma misturadora mecânica para misturar adequadamente a argamassa através de contacto directo com os materiais, altura em que se adicionou o cimento, e o éter de celulose. Para as restantes argamassas, utilizou-se apenas a misturadora mecânica.

Para a produção da argamassa de aerogel, seguiu-se o seguinte procedimento (adaptado de EN 1015-2 (CEN, 1999)):

- junção da quantidade devidamente pesada de agregados e tensioactivos no recipiente de mistura;
- adição de cerca de 80% da água previamente pesada e mistura manual durante cerca de 15 segundos (EN 1015-2 (CEN, 1998));
- mistura na mistura vibratória durante 4 minutos (figura A.3.1.1)
- junção da quantidade devidamente pesada de ligante;
- mistura da argamassa durante 1 minuto na misturadora;
- adição da quantidade devidamente pesada de éter de celulose nos restantes 20% de água;
- paragem entre 5 a 10 segundos para mistura manual da argamassa, com o objectivo de retirar detritos que possam não ter ficado bem misturados do fundo e adição da restante água (20%) com éter de celulose;
- reinício do processo de mistura com recurso à misturadora por mais 1 minuto;
- após concluída a fase de mistura, colocação da argamassa nos moldes previamente preparados.



Figura A.1.1- Misturadora vibratória

Anexo A.2. Massa volúmica em estado endurecido

Tabela A.2.1- Resultados individuais da massa volúmica aparente no estado endurecido

Argamassa	Provete	m (g)	V (m ³)	MV (kg/m ³)	MV média (kg/m ³)	DP (kg/m ³)	CV	
AÆ	1ª produção (20°C)	1	186,31	0,00026	716,56	737	22	3%
		2	190,97	0,00026	734,49			
		3	187,66	0,00026	721,76			
		4	200,60	0,00026	771,52			
		5	192,54	0,00026	740,55			
	2ª produção (100°C)	1	175,88	0,00026	676,45	682	12	2%
		2	181,88	0,00026	699,53			
		3	176,07	0,00026	677,19			
		4	173,94	0,00026	668,98			
		5	178,92	0,00026	688,16			
	3ª produção (150°C)	1	160,42	0,00026	616,99	648	24	4%
		2	172,18	0,00026	662,23			
		3	164,92	0,00026	634,30			
		4	168,22	0,00026	646,99			
		5	176,40	0,00026	678,48			
	4ª produção (200°C)	1	196,15	0,00026	754,41	748	7	1%
		2	195,92	0,00026	753,55			
		3	192,10	0,00026	738,83			
		4	193,25	0,00026	743,28			
		5	195,53	0,00026	752,03			
5ª produção (250°C)	1	213,23	0,00026	820,12	788	21	3%	
	2	206,23	0,00026	793,20				
	3	198,74	0,00026	764,38				
	4	204,45	0,00026	786,33				
	5	201,31	0,00026	774,26				
BGC	1ª produção (20°C)	1	113,76	0,00026	437,54	432	13	3%
		2	116,12	0,00026	446,60			
		3	113,57	0,00026	436,80			
		4	107,29	0,00026	412,66			
		5	110,87	0,00026	426,41			
	2ª produção (100°C)	1	119,93	0,00026	461,25	472	20	4%
		2	123,05	0,00026	473,28			
		3	121,88	0,00026	468,75			
		4	117,41	0,00026	451,56			
		5	130,93	0,00026	503,59			
	3ª produção (150°C)	1	114,54	0,00026	440,55	443	16	4%
		2	117,00	0,00026	450,00			
		3	120,28	0,00026	462,62			
		4	108,86	0,00026	418,71			
		5	114,81	0,00026	441,56			
	4ª produção (200°C)	1	123,95	0,00026	476,72	470	7	2%
		2	121,33	0,00026	466,64			
		3	119,18	0,00026	458,40			
		4	123,34	0,00026	474,38			
		5	122,86	0,00026	472,54			
5ª produção (250°C)	1	108,49	0,00026	417,27	448	24	5%	
	2	115,92	0,00026	445,86				
	3	112,52	0,00026	432,77				
	4	121,61	0,00026	467,73				
	5	123,35	0,00026	474,41				
CAERO	1ª produção (20°C)	1	120,53	0,00026	463,59	462	7	1%
		2	121,79	0,00026	468,44			
		3	118,29	0,00026	454,96			
	2ª produção (100°C)	1	175,88	0,00026	676,45	684	13	2%
		2	181,88	0,00026	699,53			
		3	176,07	0,00026	677,19			
	3ª produção (150°C)	1	96,81	0,00026	372,34	375	8	2%
		2	95,85	0,00026	368,67			
		3	99,74	0,00026	383,63			
	4ª produção (200°C)	1	113,16	0,00026	435,23	437	5	1%
		2	112,72	0,00026	433,55			
		3	115,31	0,00026	443,52			
	5ª produção (250°C)	1	89,56	0,00026	344,45	346	4	1%
		2	91,15	0,00026	350,59			
		3	89,08	0,00026	342,62			

Tabela A.2.1- Resultados individuais da massa volúmica aparente no estado endurecido (cont.)

Argamassa	Provete	m (g)	V (m ³)	MV (kg/m ³)	MV média (kg/m ³)	DP (kg/m ³)	CV	
D _{ref}	1 ^a produção (20°C)	1	447,50	0,00026	1721,17	1730	31	2%
		2	441,35	0,00026	1697,50			
		3	447,12	0,00026	1719,69			
		4	449,81	0,00026	1730,04			
		5	462,92	0,00026	1780,47			
	2 ^a produção (100°C)	1	441,06	0,00026	1696,37	1711	29	2%
		2	443,11	0,00026	1704,26			
		3	437,96	0,00026	1684,45			
		4	444,72	0,00026	1710,47			
		5	457,56	0,00026	1759,84			
	3 ^a produção (150°C)	1	455,51	0,00026	1751,95	1760	23	1%
		2	463,29	0,00026	1781,88			
		3	463,47	0,00026	1782,58			
		4	455,85	0,00026	1753,28			
		5	449,26	0,00026	1727,93			
	4 ^a produção (200°C)	1	485,42	0,00026	1866,99	1858	25	1%
		2	473,25	0,00026	1820,20			
		3	481,36	0,00026	1851,37			
		4	484,60	0,00026	1863,83			
		5	491,20	0,00026	1889,22			
5 ^a produção (250°C)	1	475,48	0,00026	1828,75	1836	11	1%	
	2	475,91	0,00026	1830,43				
	3	480,40	0,00026	1847,70				
	4	474,32	0,00026	1824,30				
	5	480,27	0,00026	1847,19				
E _{ct}	1 ^a produção (20°C)	1	421,45	0,00026	1620,98	1590	25	2%
		2	415,22	0,00026	1596,99			
		3	404,51	0,00026	1555,82			
		4	409,25	0,00026	1574,02			
		5	416,23	0,00026	1600,90			
	2 ^a produção (100°C)	1	414,08	0,00026	1592,62	1597	23	1%
		2	423,30	0,00026	1628,09			
		3	409,24	0,00026	1573,98			
		4	418,75	0,00026	1610,59			
		5	410,52	0,00026	1578,91			
	3 ^a produção (150°C)	1	418,83	0,00026	1610,90	1575	42	3%
		2	422,87	0,00026	1626,41			
		3	400,78	0,00026	1541,45			
		4	398,73	0,00026	1533,59			
		5	406,27	0,00026	1562,58			
	4 ^a produção (200°C)	1	420,92	0,00026	1618,91	1624	15	1%
		2	417,47	0,00026	1605,66			
		3	421,07	0,00026	1619,49			
		4	428,07	0,00026	1646,41			
		5	424,31	0,00026	1631,95			
5 ^a produção (250°C)	1	413,17	0,00026	1589,10	1528	55	4%	
	2	410,02	0,00026	1576,99				
	3	390,15	0,00026	1500,59				
	4	378,92	0,00026	1457,38				
	5	393,75	0,00026	1514,41				

Tabela A.2.1- Resultados individuais da massa volúmica aparente no estado endurecido (cont.)

Argamassa		Provete	m (g)	V (m ³)	MV (kg/m ³)	MV média (kg/m ³)	DP (kg/m ³)	CV
F5%res	1ª produção (20°C)	1	466,32	0,00026	1793,55	1806	33	2%
		2	480,21	0,00026	1846,95			
		3	476,02	0,00026	1830,86			
		4	458,32	0,00026	1762,77			
		5	467,06	0,00026	1796,37			
	2ª produção (100°C)	1	481,68	0,00026	1852,62	1853	25	1%
		2	474,41	0,00026	1824,65			
		3	477,87	0,00026	1837,97			
		4	491,29	0,00026	1889,57			
		5	484,26	0,00026	1862,54			
	3ª produção (150°C)	1	450,94	0,00026	1734,38	1734	18	1%
		2	443,77	0,00026	1706,80			
		3	456,56	0,00026	1756,02			
		4	452,45	0,00026	1740,20			
		5	450,08	0,00026	1731,09			
	4ª produção (200°C)	1	475,72	0,00026	1829,69	1822	34	2%
		2	480,56	0,00026	1848,32			
		3	475,86	0,00026	1830,23			
		4	478,16	0,00026	1839,06			
		5	458,34	0,00026	1762,85			
5ª produção (250°C)	1	487,05	0,00026	1873,28	1854	33	2%	
	2	481,95	0,00026	1853,67				
	3	482,33	0,00026	1855,12				
	4	468,19	0,00026	1800,74				
	5	491,29	0,00026	1889,57				
G10%res	1ª produção (20°C)	1	446,66	0,00026	1717,93	1749	37	2%
		2	466,21	0,00026	1793,13			
		3	453,67	0,00026	1744,88			
		4	462,70	0,00026	1779,61			
		5	444,29	0,00026	1708,79			
	2ª produção (100°C)	1	470,20	0,00026	1808,48	1883	46	2%
		2	488,38	0,00026	1878,40			
		3	502,91	0,00026	1934,26			
		4	492,80	0,00026	1895,39			
		5	493,66	0,00026	1898,71			
	3ª produção (150°C)	1	467,81	0,00026	1799,26	1768	48	3%
		2	465,46	0,00026	1790,23			
		3	449,99	0,00026	1730,74			
		4	443,47	0,00026	1705,66			
		5	472,18	0,00026	1816,09			
	4ª produção (200°C)	1	467,90	0,00026	1799,61	1817	44	2%
		2	460,20	0,00026	1770,00			
		3	464,90	0,00026	1788,09			
		4	487,05	0,00026	1873,28			
		5	481,95	0,00026	1853,67			
5ª produção (250°C)	1	482,33	0,00026	1855,12	1298	755	58%	
	2	468,19	0,00026	1800,74				
	3	491,29	0,00026	1889,57				
	4	121,61	0,00026	467,73				
	5	123,35	0,00026	474,41				

Legenda: m – massa; V – volume; MV – massa volúmica aparente; DP – desvio-padrão; CV – coeficiente de variação.

Anexo A.3. Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas

Tabela A.3.1- Resultados individuais da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas

Argamassa	Provete	L (mm)	T ₁ (µs)	T ₂ (µs)	T ₃ (µs)	T _{médio} (µs)	V (m/s)	V _{médio} (m/s)	DP (m/s)	CV	
A ^{AE}	1ª produção (20°C)	1	160	67,40	67,10	66,90	67,13	2383,32	2379	64	3%
		2	160	65,70	64,90	65,40	65,33	2448,98			
		3	160	65,70	65,20	65,10	65,33	2448,98			
		4	160	67,70	67,60	67,60	67,63	2365,70			
		5	160	69,20	69,70	69,70	69,53	2301,05			
		6	69	68,60	68,40	70,70	69,23	2311,03			
	2ª produção (100°C)	1	160	72,70	73,10	71,70	72,50	2206,90	2201	28	1%
		2	160	72,90	72,60	73,40	72,97	2192,78			
		3	160	72,40	74,70	75,40	74,17	2157,30			
		4	160	71,90	72,10	71,90	71,97	2223,25			
		5	160	71,20	71,90	72,60	71,90	2225,31			
	3ª produção (150°C)	1	160	77,90	77,90	78,90	78,23	2045,16	2065	26	1%
		2	160	76,90	78,10	79,10	78,03	2050,41			
		3	160	77,90	77,60	78,20	77,90	2053,92			
		4	160	77,60	77,60	77,20	77,47	2065,40			
		5	160	76,20	76,20	75,10	75,83	2109,89			
	4ª produção (200°C)	1	160	67,60	67,90	68,40	67,97	2354,10	2279	58	3%
		2	160	68,90	68,40	68,70	68,67	2330,10			
		3	160	71,10	71,40	71,60	71,37	2241,94			
		4	160	70,90	71,70	71,60	71,40	2240,90			
5		160	71,40	71,90	71,70	71,67	2232,56				
5ª produção (250°C)	1	160	66,10	65,40	65,40	65,63	2437,79	2335	71	3%	
	2	160	68,20	67,40	67,70	67,77	2361,04				
	3	160	71,60	71,40	70,70	71,23	2246,14				
	4	160	68,40	68,40	68,60	68,47	2336,90				
	5	160	69,60	69,60	69,40	69,53	2301,05				
B ^{GC}	1ª produção (20°C)	1	160	149,90	148,20	149,90	149,33	1071,43	994	48	5%
		2	160	158,60	159,10	159,60	159,10	1005,66			
		3	160	166,90	167,40	167,90	167,40	955,79			
		4	160	167,40	167,90	167,40	167,57	954,84			
		5	160	161,10	161,40	161,90	161,47	990,92			
	2ª produção (100°C)	1	160	139,10	139,20	137,90	138,73	1153,29	1113	41	4%
		2	160	138,90	138,70	140,70	139,43	1147,50			
		3	160	149,70	149,70	148,60	149,33	1071,43			
		4	160	151,10	150,20	148,20	149,83	1067,85			
		5	160	142,70	141,90	142,10	142,23	1124,91			
	3ª produção (150°C)	1	160	146,60	146,40	146,20	146,40	1092,90	1083	27	2%
		2	160	145,40	145,40	145,60	145,47	1099,91			
		3	160	144,90	144,70	145,70	145,10	1102,69			
		4	160	153,60	154,10	155,20	154,30	1036,94			
		5	160	146,70	146,70	148,10	147,17	1087,20			
	4ª produção (200°C)	1	160	152,70	151,10	152,20	152,00	1052,63	1020	48	5%
		2	160	166,20	166,40	166,10	166,23	962,50			
		3	160	160,90	159,60	159,20	159,90	1000,63			
		4	160	145,90	149,40	147,10	147,47	1084,99			
		5	160	158,90	158,20	158,60	158,57	1009,04			
5ª produção (250°C)	1	160	151,70	149,20	149,60	150,17	1065,48	1072	42	4%	
	2	160	140,20	139,20	140,20	139,87	1143,95				
	3	160	153,90	153,70	151,20	152,93	1046,21				
	4	160	148,50	149,90	148,90	149,10	1073,11				
	5	160	154,90	153,20	153,80	153,97	1039,19				
C ^{AERO}	1ª produção (20°C)	1	160	145,40	146,10	145,10	145,53	1099,40	1094	7	1%
		2	160	146,20	145,70	145,90	145,93	1096,39			
		3	160	147,10	147,70	146,90	147,23	1086,71			
	2ª produção (100°C)	1	160	170,70	171,60	170,20	170,83	936,59	968	30	3%
		2	160	160,20	160,20	161,90	160,77	995,23			
		3	160	162,20	165,70	165,60	164,50	972,64			
	3ª produção (150°C)	1	160	164,20	162,60	166,10	164,30	973,83	973	1	0%
		2	160	165,40	164,20	164,30	164,63	971,86			
		3	160	164,70	164,80	164,20	164,57	972,25			
	4ª produção (200°C)	1	160	198,90	199,10	201,00	199,67	801,34	837	38	5%
		2	160	190,40	192,60	191,10	191,37	836,09			
		3	160	181,70	182,40	182,90	182,33	877,51			
	5ª produção (250°C)	1	160	196,90	197,10	196,90	196,97	812,32	813	26	3%
		2	160	191,20	191,60	188,70	190,50	839,90			
		3	160	203,00	203,00	203,00	203,00	788,18			

Tabela A.3.1- Resultados individuais da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas (cont.)

Argamassa	Provete	L (mm)	T ₁ (µs)	T ₂ (µs)	T ₃ (µs)	T _{médio} (µs)	V (m/s)	V _{médio} (m/s)	DP (m/s)	CV	
D ^{ref}	1 ^a produção (20°C)	1	160	51,70	51,90	52,10	51,90	3082,9	3081	39	1%
		2	160	52,90	53,20	53,60	53,23	3005,6			
		3	160	52,90	51,70	51,60	52,07	3073,0			
		4	160	51,40	51,40	51,90	51,57	3102,8			
		5	160	51,60	51,60	51,70	51,63	3098,8			
	2 ^a produção (100°C)	1	160	53,80	54,20	54,20	54,07	2959,31	3010	155	5%
		2	160	53,20	53,40	53,90	53,50	2990,65			
		3	160	55,10	54,90	55,20	55,07	2905,57			
		4	160	54,40	54,90	54,10	54,47	2937,58			
		5	160	48,90	48,70	48,40	48,67	3287,67			
	3 ^a produção (150°C)	1	160	58,90	59,10	58,90	58,97	2713,40	2732	34	1%
		2	160	57,60	56,90	57,40	57,30	2792,32			
		3	160	58,60	59,40	58,70	58,90	2716,47			
		4	160	58,10	59,10	59,40	58,87	2718,01			
		5	160	58,20	60,10	58,20	58,83	2719,55			
	4 ^a produção (200°C)	1	160	57,40	57,40	56,90	57,23	2795,57	2852	68	2%
		2	160	55,70	55,70	55,40	55,60	2877,70			
		3	160	55,10	55,20	54,70	55,00	2909,09			
		4	160	57,90	57,90	57,70	57,83	2766,57			
		5	160	54,40	55,20	54,90	54,83	2917,93			
5 ^a produção (250°C)	1	160	60,60	61,10	61,10	60,93	2625,82	2597	115	4%	
	2	160	60,70	59,90	59,90	60,17	2659,28				
	3	160	60,20	60,90	61,60	60,90	2627,26				
	4	160	66,10	66,40	67,40	66,63	2401,20				
	5	160	59,10	59,20	60,10	59,47	2690,58				
E ^{ct}	1 ^a produção (20°C)	1	160	65,40	63,40	62,20	63,67	2513,09	2551	38	1%
		2	160	61,90	60,60	61,10	61,20	2614,38			
		3	160	62,90	63,20	62,90	63,00	2539,68			
		4	160	62,20	62,60	63,40	62,73	2550,48			
		5	160	63,40	63,60	61,90	62,97	2541,03			
	2 ^a produção (100°C)	1	160	69,10	69,90	69,70	69,57	2299,95	2298	77	3%
		2	160	66,60	67,20	66,40	66,73	2397,60			
		3	160	71,90	72,90	73,40	72,73	2199,82			
		4	160	71,10	71,40	70,40	70,97	2254,58			
		5	160	67,90	68,10	68,40	68,13	2348,34			
	3 ^a produção (150°C)	1	160	79,20	78,20	77,40	78,27	2044,29	2010	57	3%
		2	160	80,10	79,90	80,10	80,03	1999,17			
		3	160	79,60	80,10	81,40	80,37	1990,88			
		4	160	82,70	82,40	82,70	82,60	1937,05			
		5	160	76,40	77,20	76,40	76,67	2086,96			
	4 ^a produção (200°C)	1	160	79,60	79,60	80,20	79,80	2005,01	2003	33	2%
		2	160	79,10	80,10	79,90	79,70	2007,53			
		3	160	77,10	77,60	78,90	77,87	2054,79			
		4	160	81,70	81,40	79,90	81,00	1975,31			
		5	160	80,90	80,90	81,20	81,00	1975,31			
5 ^a produção (250°C)	1	160	88,10	87,80	86,40	87,43	1829,97	1681	130	8%	
	2	160	88,10	87,40	86,90	87,47	1829,27				
	3	160	101,60	101,20	102,20	101,67	1573,77				
	4	160	98,10	100,10	98,30	98,83	1618,89				
	5	160	100,20	100,90	100,60	100,57	1590,98				

Tabela A.3.1- Resultados individuais da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas (cont.)

Argamassa		Provete	L (mm)	T ₁ (μ s)	T ₂ (μ s)	T ₃ (μ s)	T _{médio} (μ s)	V (m/s)	V _{médio} (m/s)	DP (m/s)	CV
F5% _{res}	1ª produção (20°C)	1	160	47,90	48,40	47,90	48,07	3328,7	3357	33	1%
		2	160	48,20	48,60	47,90	48,23	3317,2			
		3	160	47,20	47,10	48,20	47,50	3368,4			
		4	160	47,60	47,60	46,20	47,13	3394,6			
		5	160	47,40	47,40	47,40	47,40	3375,5			
	2ª produção (100°C)	1	160	46,80	47,20	46,90	46,97	3406,7	3358	58	2%
		2	160	46,20	46,60	47,20	46,67	3428,6			
		3	160	47,40	48,20	47,70	47,77	3349,6			
		4	160	48,40	48,70	48,70	48,60	3292,2			
		5	160	47,70	48,20	48,90	48,27	3314,9			
	3ª produção (150°C)	1	160	53,40	53,60	54,70	53,90	2968,5	2885	50	2%
		2	160	55,90	55,90	55,90	55,90	2862,3			
		3	160	59,70	54,90	54,70	56,43	2835,2			
		4	160	55,60	55,60	54,90	55,37	2889,8			
		5	160	55,40	55,20	56,40	55,67	2874,3			
	4ª produção (200°C)	1	160	55,90	55,90	55,90	55,90	2862,3	2823	27	1%
		2	160	56,40	55,90	57,40	56,57	2828,5			
		3	160	57,70	56,20	56,20	56,70	2821,9			
		4	160	56,90	56,60	56,90	56,80	2816,9			
		5	160	58,10	57,20	56,90	57,40	2787,5			
5ª produção (250°C)	1	160	61,80	61,60	61,70	61,70	2593,2	2507	98	4%	
	2	160	64,40	63,40	63,60	63,80	2507,8				
	3	160	61,40	61,70	61,40	61,50	2601,6				
	4	160	67,60	68,20	67,60	67,80	2359,9				
	5	160	64,20	64,70	64,20	64,37	2485,8				
G10% _{res}	1ª produção (20°C)	1	160	44,40	43,70	44,40	44,17	3622,6	3474	148	4%
		2	160	44,90	45,60	46,10	45,53	3513,9			
		3	160	44,70	45,20	45,40	45,10	3547,7			
		4	160	45,70	45,90	46,40	46,00	3478,3			
		5	160	49,70	49,20	49,60	49,50	3232,3			
	2ª produção (100°C)	1	160	46,60	46,90	46,60	46,70	3426,1	3470	39	1%
		2	160	45,20	46,60	46,40	46,07	3473,2			
		3	160	45,90	46,10	46,40	46,13	3468,2			
		4	160	45,60	46,60	46,90	46,37	3450,8			
		5	160	45,10	45,40	45,40	45,30	3532,0			
	3ª produção (150°C)	1	160	51,70	50,90	51,70	51,43	3110,8	3021	110	4%
		2	160	51,10	51,20	51,40	51,23	3123,0			
		3	160	54,10	54,40	53,70	54,07	2959,3			
		4	160	55,10	54,90	55,40	55,13	2902,1			
		5	160	-	-	-	-	-			
	4ª produção (200°C)	1	160	56,60	55,70	55,90	56,07	2853,7	2845	62	2%
		2	160	56,40	56,10	56,40	56,30	2841,9			
		3	160	54,40	54,40	54,20	54,33	2944,8			
		4	160	57,40	57,40	57,10	57,30	2792,3			
		5	160	57,50	56,90	57,30	57,23	2795,6			
5ª produção (250°C)	1	160	72,60	71,90	72,20	72,23	2215,0	2195	206	9%	
	2	160	64,40	64,70	65,40	64,83	2467,9				
	3	160	70,70	71,30	72,40	71,47	2238,8				
	4	160	72,10	71,20	70,70	71,33	2243,0				
	5	160	83,90	82,90	86,90	84,57	1892,0				

Legenda: L – distância percorrida pelas ondas ultra-sónicas; T_i – tempo que as ondas demoram a percorrer os provetes; V – velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas; DP – desvio-padrão; CV – coeficiente de variação.

Anexo A.4. Módulo de elasticidade dinâmico, módulo de torção dinâmico e coeficiente de *Poisson*

Tabela A.4.1 - Resultados individuais das frequências de ressonância

Argamassa	Provete	massa (g)	Frequência de flexão (kHz)	Frequência de torção (kHz)	
AAE	1ª produção (20°C)	1	186,31	2,75	3,83
		2	190,97	2,74	3,87
		3	187,66	2,75	3,85
		4	200,60	2,91	3,94
		5	192,54	2,88	3,92
	2ª produção (100°C)	1	175,88	2,42	3,29
		2	181,88	2,49	3,53
		3	176,07	2,49	3,29
		4	173,94	2,39	3,35
		5	178,92	2,5	3,51
	3ª produção (150°C)	1	160,42	2,37	3,32
		2	172,18	2,5	3,36
		3	164,92	2,35	3,31
		4	168,22	2,37	3,32
		5	176,40	2,44	3,48
	4ª produção (200°C)	1	196,15	2,55	3,57
		2	195,92	2,57	3,66
		3	192,10	2,56	3,57
		4	193,25	2,51	3,57
		5	195,53	2,57	3,63
5ª produção (250°C)	1	213,23	2,85	4,02	
	2	206,23	2,67	3,73	
	3	198,74	2,62	3,71	
	4	204,45	2,72	3,82	
	5	201,31	2,71	3,69	
BGC	1ª produção (20°C)	1	113,76	0,98	1,40
		2	116,12	1,08	1,43
		3	113,57	1,02	1,42
		4	107,29	0,98	1,23
		5	110,87	0,96	1,34
	2ª produção (100°C)	1	119,93	1,15	1,21
		2	123,05	1,17	1,25
		3	121,88	1,22	1,85
		4	117,41	1,17	1,57
		5	130,93	1,32	1,38
	3ª produção (150°C)	1	114,54	1,21	1,64
		2	117,00	1,19	1,76
		3	120,28	1,25	1,73
		4	108,86	1,04	1,18
		5	114,81	1,16	1,28
	4ª produção (200°C)	1	123,95	1,13	1,63
		2	121,33	1,13	1,53
		3	119,18	1,17	1,61
		4	123,34	1,16	1,56
		5	122,86	1,07	1,49
5ª produção (250°C)	1	108,49	1,03	1,02	
	2	115,92	1,05	1,40	
	3	112,52	1,05	1,37	
	4	121,61	1,09	1,38	
	5	123,35	1,10	1,51	
CAERO	1ª produção (20°C)	1	120,53	1,04	1,08
		2	121,79	1,10	1,11
		3	118,29	1,06	1,05
	2ª produção (100°C)	1	175,88	1,03	1,48
		2	181,88	1,02	1,47
		3	176,07	1,02	1,46
	3ª produção (150°C)	1	96,81	1,06	1,09
		2	95,85	1,07	1,06
		3	99,74	1,08	1,06
	4ª produção (200°C)	1	113,16	0,85	1,30
		2	112,72	0,87	1,32
		3	115,31	0,90	1,38
	5ª produção (250°C)	1	89,56	0,83	1,25
		2	91,15	0,85	1,23
		3	89,08	0,88	1,24

Tabela A.4.1 – Resultados individuais das frequências de ressonância (cont.)

Argamassa		Provete	massa (g)	Frequência de flexão (kHz)	Frequência de torção (kHz)
D ^{ref}	1ª produção (20°C)	1	447,50	3,50	3,66
		2	441,35	3,52	3,57
		3	447,12	3,64	3,74
		4	449,81	3,59	3,65
		5	462,92	3,72	3,72
	2ª produção (100°C)	1	441,06	3,48	3,41
		2	443,11	3,44	4,83
		3	437,96	3,26	4,52
		4	444,72	3,39	3,40
		5	457,56	3,55	3,78
	3ª produção (150°C)	1	455,51	3,29	3,22
		2	463,29	3,38	3,64
		3	463,47	3,30	3,75
		4	455,85	3,30	3,62
		5	449,26	3,15	3,19
	4ª produção (200°C)	1	485,42	3,49	4,77
		2	473,25	3,37	4,81
		3	481,36	3,50	4,96
		4	484,60	3,34	4,74
		5	491,20	3,38	4,76
5ª produção (250°C)	1	475,48	3,17	4,43	
	2	475,91	3,17	4,53	
	3	480,40	3,17	4,45	
	4	474,32	3,17	4,43	
	5	480,27	3,12	4,52	
E ^{ct}	1ª produção (20°C)	1	421,45	2,87	4,12
		2	415,22	2,71	4,04
		3	404,51	3,02	4,18
		4	409,25	2,82	4,03
		5	416,23	2,78	4,09
	2ª produção (100°C)	1	414,08	2,80	3,85
		2	423,30	2,90	4,03
		3	409,24	2,68	3,71
		4	418,75	3,15	4,19
		5	410,52	2,74	3,87
	3ª produção (150°C)	1	418,83	2,51	3,49
		2	422,87	2,42	3,47
		3	400,78	2,37	3,35
		4	398,73	2,27	3,26
		5	406,27	2,47	3,47
	4ª produção (200°C)	1	420,92	2,38	3,37
		2	417,47	2,35	3,29
		3	421,07	2,40	3,30
		4	428,07	2,40	3,35
		5	424,31	2,27	3,31
5ª produção (250°C)	1	413,17	2,09	3,04	
	2	410,02	2,02	2,90	
	3	390,15	1,81	2,62	
	4	378,92	1,89	2,76	
	5	393,75	1,87	2,27	

Tabela A.4.1 – Resultados individuais das frequências de ressonância (cont.)

Argamassa		Provete	massa (g)	Frequência de flexão (kHz)	Frequência de torção (kHz)
F5% _{res}	1ª produção (20°C)	1	466,32	3,89	4,32
		2	480,21	3,9	4,48
		3	476,02	3,98	4,49
		4	458,32	3,98	4,38
		5	467,06	3,9	4,42
	2ª produção (100°C)	1	481,68	4,12	4,12
		2	474,41	4,01	4,04
		3	477,87	3,96	3,98
		4	491,29	4,11	4,09
		5	484,26	4,07	4,07
	3ª produção (150°C)	1	450,94	3,47	4,93
		2	443,77	3,5	4,86
		3	456,56	3,51	4,77
		4	452,45	3,48	5,04
		5	450,08	3,43	4,85
	4ª produção (200°C)	1	475,72	3,34	4,84
		2	480,56	3,36	4,71
		3	475,86	3,45	4,88
		4	478,16	3,31	4,74
		5	458,34	3,31	4,63
	5ª produção (250°C)	1	487,05	2,95	4,24
		2	481,95	3,06	4,35
		3	482,33	2,97	4,34
		4	468,19	2,94	4,25
		5	491,29	2,96	4,26
G10% _{res}	1ª produção (20°C)	1	446,66	3,4	3,40
		2	466,21	3,33	3,56
		3	453,67	3,33	4,53
		4	462,70	3,31	3,32
		5	444,29	3,33	3,56
	2ª produção (100°C)	1	470,20	4,05	4,02
		2	488,38	4,21	4,20
		3	502,91	4,27	4,46
		4	492,80	4,34	4,38
		5	493,66	4,36	4,72
	3ª produção (150°C)	1	467,81	3,55	3,83
		2	465,46	3,66	4,72
		3	449,99	3,51	5,30
		4	443,47	3,43	4,52
		5	472,18	-	-
	4ª produção (200°C)	1	467,90	3,06	4,16
		2	460,20	2,93	4,14
		3	464,90	2,96	4,13
		4	487,05	2,95	4,18
		5	481,95	-	-
	5ª produção (250°C)	1	482,33	2,95	4,24
		2	468,19	3,06	4,35
		3	491,29	2,97	4,34
		4	121,61	2,94	4,25
		5	123,35	2,96	4,26

Tabela A.4.2 – Módulo de torção dinâmico

Temperatura (°C)	A ^{AE}						B ^{GC}						Caero					
	ASTM E1876-01			Software			ASTM E1876-01			Software			ASTM E1876-01			Software		
	G _d (MPa)	DP (MPa)	CV	G _d (MPa)	DP (MPa)	CV	G _d (MPa)	DP (MPa)	CV	G _d (MPa)	DP (MPa)	CV	G _d (MPa)	DP (MPa)	CV	G _d (MPa)	DP (MPa)	CV
20	1345	71	5%	1349	71	5%	98	14	14%	98	14	14%	65	4,57	7%	66	3,65	6%
100	952	81	9%	955	82	9%	125	13	11%	124	45	36%	179	4,13	2%	122	1,65	1%
150	885	68	8%	888	68	8%	155	17	11%	128	46	36%	52	1,71	3%	64	2,09	3%
200	1174	35	3%	1177	35	3%	136	7,5	6%	140	10,3	7%	94	7,03	7%	99	3,74	4%
250	1375	136	10%	1379	137	10%	99	29	29%	99	29	29%	64	0,71	1%	86	1,40	2%

Temperatura (°C)	D ^{ref}						E ^{ct}						F ^{res5%}					
	ASTM E1876-01			Software			ASTM E1876-01			Software			ASTM E1876-01			Software		
	G _d (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	G _d (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	G _d (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	G _d (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	G _d (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	G _d (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
20	2817	139	5%	2826	139	5%	3237	126	4%	3230	97	3%	4266	201	5%	4278	202	5%
100	2607	377	14%	3369	1091	32%	2992	316	11%	3000	317	11%	3698	131	4%	3708	131	4%
150	2599	409	16%	2606	411	16%	2248	143	6%	2223	179	8%	5017	211	4%	5032	211	4%
200	5198	180	3%	5213	180	3%	2174	66	3%	2178	57	3%	4998	271	5%	5013	272	5%
250	4411	99	2%	4455	110	2%	1383	323	23%	1387	324	23%	4126	126	3%	4138	127	3%

Temperatura (°C)	G ^{res10%}					
	ASTM E1876-01			Software		
	G _d (MPa)	DP (MPa)	CV	G _d (MPa)	DP (MPa)	CV
20	2896	818	28%	2904	820	28%
100	4343	605	14%	4356	607	14%
150	3623	2248	62%	4542	1129	25%
200	2993	1674	56%	3753	66	2%
250	4126	126	3%	4138	127	3%

Legenda: G_d - módulo de torção dinâmico; DP - desvio-padrão; CV - coeficiente de variação

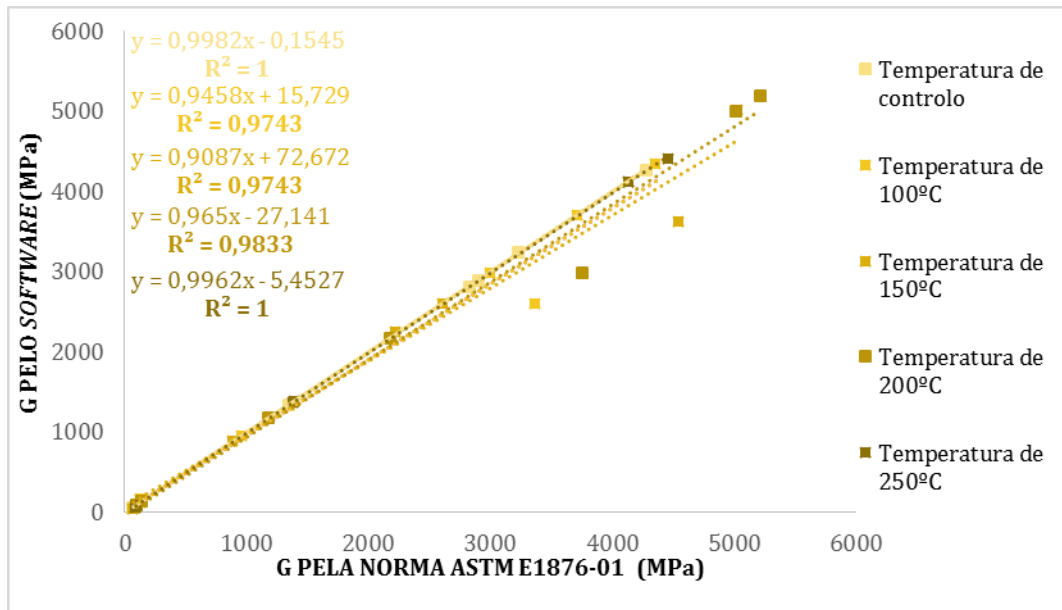


Figura A.4.1 - Relação entre os valores do módulo de torção dinâmico calculados através da norma ASTM E1876-01 e através do software *Genemod* para as diferentes temperaturas-alvo

Anexo A.5. Resistência à compressão

Tabela A.5.1 - Resultados individuais da resistência à compressão experimental

Argamassa		Provete	Fc (kN)	Ac (m ²)	Rc (MPa)	Rc _{médio} (MPa)	DP (MPa)	CV
A ^{AE}	1ª produção (20°C)	1	0,19	0,0016	0,12	0,12	-	-
		2	-	0,0016	-			
		3	-	0,0016	-			
		4	-	0,0016	-			
		5	-	0,0016	-			
	2ª produção (100°C)	1	0,16	0,0016	0,10	0,11	0,02	0,18
		2	0,2	0,0016	0,13			
		3	0,14	0,0016	0,09			
		4	0,15	0,0016	0,09			
		5	0,21	0,0016	0,13			
	3ª produção (150°C)	1	0,131	0,0016	0,08	0,08	-	-
		2	-	0,0016	-			
		3	-	0,0016	-			
		4	-	0,0016	-			
		5	-	0,0016	-			
	4ª produção (200°C)	1	0,256	0,0016	0,16	0,16	-	-
		2	-	0,0016	-			
		3	-	0,0016	-			
		4	-	0,0016	-			
		5	-	0,0016	-			
5ª produção (250°C)	1	0,248	0,0016	0,16	0,16	-	-	
	2	-	0,0016	-				
	3	-	0,0016	-				
	4	-	0,0016	-				
	5	-	0,0016	-				
B ^{GC}	1ª produção (20°C)	1	0,04	0,0016	0,03	0,02	0,003	0,12
		2	0,03	0,0016	0,02			
		3	0,04	0,0016	0,03			
		4	0,04	0,0016	0,03			
		5	0,04	0,0016	0,03			
	2ª produção (100°C)	1	0,05	0,0016	0,03	0,03	0,003	0,09
		2	0,05	0,0016	0,03			
		3	0,05	0,0016	0,03			
		4	0,05	0,0016	0,03			
		5	0,06	0,0016	0,04			
	3ª produção (150°C)	1	-	0,0016	-	0,02	-	-
		2	0,038	0,0016	0,02			
		3	-	0,0016	-			
		4	-	0,0016	-			
		5	-	0,0016	-			
	4ª produção (200°C)	1	0,06	0,0016	0,04	0,03	0,003	0,10
		2	0,05	0,0016	0,03			
		3	0,05	0,0016	0,03			
		4	0,06	0,0016	0,04			
		5	0,05	0,0016	0,03			
5ª produção (250°C)	1	0,04	0,0016	0,03	0,04	0,006	0,16	
	2	0,06	0,0016	0,04				
	3	0,06	0,0016	0,04				
	4	0,06	0,0016	0,04				
	5	0,06	0,0016	0,04				
C ^{AERO}	1ª produção (20°C)	1	0,016	0,0016	0,01	0,01	0,0002	0,02
		2	0,0154	0,0016	0,01			
		3	0,016	0,0016	0,01			
	2ª produção (100°C)	1	0,02	0,0016	0,01	0,01	-	-
		2	-	0,0016	-			
		3	-	0,0016	-			
	3ª produção (150°C)	1	0,018	0,0016	0,01	0,01	-	-
		2	-	0,0016	-			
		3	-	0,0016	-			
	4ª produção (200°C)	1	0,025	0,0016	0,02	0,02	-	-
		2	-	0,0016	-			
		3	-	0,0016	-			
	5ª produção (250°C)	1	-	0,0016	-	0,02	-	-
		2	0,03	0,0016	0,02			
		3	-	0,0016	-			

Tabela A.5.1 – Resultados individuais da resistência à compressão experimental (cont.)

Argamassa		Provete	Fc (kN)	Ac (m ²)	Rc (MPa)	Rc _{médio} (MPa)	DP (MPa)	CV
D _{ref}	1ª produção (20°C)	1	0,45	0,0016	0,28	0,28	-	-
		2	-	0,0016	-			
		3	-	0,0016	-			
		4	-	0,0016	-			
		5	-	0,0016	-			
	2ª produção (100°C)	1	0,451	0,0016	0,28	0,28	-	-
		2	-	0,0016	-			
		3	-	0,0016	-			
		4	-	0,0016	-			
		5	-	0,0016	-			
	3ª produção (150°C)	1	0,484	0,0016	0,30	0,30	-	-
		2	-	0,0016	-			
		3	-	0,0016	-			
		4	-	0,0016	-			
		5	-	0,0016	-			
	4ª produção (200°C)	1	0,611	0,0016	0,38	0,38	-	-
		2	-	0,0016	-			
		3	-	0,0016	-			
		4	-	0,0016	-			
		5	-	0,0016	-			
5ª produção (250°C)	1	0,558	0,0016	0,35	0,35	-	-	
	2	-	0,0016	-				
	3	-	0,0016	-				
	4	-	0,0016	-				
	5	-	0,0016	-				
E _{CT}	1ª produção (20°C)	1	0,16	0,0016	0,10	0,10	-	-
		2	-	0,0016	-			
		3	-	0,0016	-			
		4	-	0,0016	-			
		5	-	0,0016	-			
	2ª produção (100°C)	1	0,101	0,0016	0,06	0,06	-	-
		2	-	0,0016	-			
		3	-	0,0016	-			
		4	-	0,0016	-			
		5	-	0,0016	-			
	3ª produção (150°C)	1	0,174	0,0016	0,11	0,11	-	-
		2	-	0,0016	-			
		3	-	0,0016	-			
		4	-	0,0016	-			
		5	-	0,0016	-			
	4ª produção (200°C)	1	0,119	0,0016	0,07	0,07	-	-
		2	-	0,0016	-			
		3	-	0,0016	-			
		4	-	0,0016	-			
		5	-	0,0016	-			
5ª produção (250°C)	1	0,07	0,0016	0,04	0,04	-	-	
	2	-	0,0016	-				
	3	-	0,0016	-				
	4	-	0,0016	-				
	5	-	0,0016	-				

Tabela A.5.1 – Resultados individuais da resistência à compressão experimental (cont.)

Argamassa		Provete	Fc (kN)	Ac (m ²)	Rc (MPa)	Rc _{médio} (MPa)	DP (MPa)	CV
F5%res	1ª produção (20°C)	1	0,63	0,0016	0,39	0,39	-	-
		2	-	0,0016	-			
		3	-	0,0016	-			
		4	-	0,0016	-			
		5	-	0,0016	-			
	2ª produção (100°C)	1	0,608	0,0016	0,38	0,38	-	-
		2	-	0,0016	-			
		3	-	0,0016	-			
		4	-	0,0016	-			
		5	-	0,0016	-			
	3ª produção (150°C)	1	0,893	0,0016	0,56	0,56	-	-
		2	-	0,0016	-			
		3	-	0,0016	-			
		4	-	0,0016	-			
		5	-	0,0016	-			
	4ª produção (200°C)	1	0,475	0,0016	0,30	0,30	-	-
		2	-	0,0016	-			
		3	-	0,0016	-			
		4	-	0,0016	-			
		5	-	0,0016	-			
5ª produção (250°C)	1	0,53	0,0016	0,33	0,33	-	-	
	2	-	0,0016	-				
	3	-	0,0016	-				
	4	-	0,0016	-				
	5	-	0,0016	-				
G10%res	1ª produção (20°C)	1	0,539	0,0016	0,34	0,34	-	-
		2	-	0,0016	-			
		3	-	0,0016	-			
		4	-	0,0016	-			
		5	-	0,0016	-			
	2ª produção (100°C)	1	0,754	0,0016	0,47	0,47	-	-
		2	-	0,0016	-			
		3	-	0,0016	-			
		4	-	0,0016	-			
		5	-	0,0016	-			
	3ª produção (150°C)	1	1,101	0,0016	0,69	0,69	-	-
		2	-	0,0016	-			
		3	-	0,0016	-			
		4	-	0,0016	-			
		5	-	0,0016	-			
	4ª produção (200°C)	1	0,65	0,0016	0,41	0,41	-	-
		2	-	0,0016	-			
		3	-	0,0016	-			
		4	-	0,0016	-			
		5	-	0,0016	-			
5ª produção (250°C)	1	0,405	0,0016	0,25	0,25	-	-	
	2	-	0,0016	-				
	3	-	0,0016	-				
	4	-	0,0016	-				
	5	-	0,0016	-				

Legenda: Fc – força de compressão máxima aplicada; Ac – área da secção comprimida; Rc – resistência à compressão; DP – desvio-padrão; CV – coeficiente de variação.

Anexo A.6. Condutibilidade térmica

Tabela A.6.1- Valores individuais do coeficiente de condutibilidade térmica das argamassas estudadas

Argamassa		Provete	λ (W/mK)	$\lambda_{\text{médio}}$ (W/mK)	DP (W/mK)	CV
A ^{AE}	1 ^a produção (20°C)	1	0,20	0,202	0,002	1%
		2	0,20			
		3	0,20			
		4	0,20			
	3 ^a produção (150°C)	1	0,14	0,142	0,001	1%
		2	0,14			
	5 ^a produção (250°C)	1	0,04	0,040	-	-
		2	-			
B ^{GC}	1 ^a produção (20°C)	1	0,11	0,102	0,005	5%
		2	0,10			
	3 ^a produção (150°C)	1	0,07	0,078	0,007	9%
		2	0,08			
	5 ^a produção (250°C)	1	0,08	0,075	-	-
		2	-			
C ^{AERO}	1 ^a produção (20°C)	1	0,07	0,074	0,000	0,4%
		2	0,07			
	3 ^a produção (150°C)	1	0,06	0,062	0,001	2%
		2	0,06			
	5 ^a produção (250°C)	1	0,06	0,060	-	-
		2	-			
D ^{ref}	1 ^a produção (20°C)	1	1,99	1,987	0,009	0,4%
		2	1,98			
	3 ^a produção (150°C)	1	1,30	1,338	0,051	4%
		2	1,37			
	5 ^a produção (250°C)	1	1,53	1,535	-	-
		2	-			
E ^{CT}	1 ^a produção (20°C)	1	1,32	1,326	0,010	1%
		2	1,33			
	3 ^a produção (150°C)	1	1,12	1,122	-	-
		2	-			
	5 ^a produção (250°C)	1	0,70	0,956	0,359	38%
		2	1,21			
F ^{5%res}	1 ^a produção (20°C)	1	0,96	1,385	0,608	44%
		2	1,81			
	3 ^a produção (150°C)	1	1,62	1,618	-	-
		2	-			
	5 ^a produção (250°C)	1	1,36	1,364	-	-
		2	-			

Legenda: λ – condutibilidade térmica; Dp – desvio padrão; CV – coeficiente de variação

