



Resistência a Altas Temperaturas de Argamassas Com
Incorporação de Materiais de Mudança de Fase (PCM)

Luís Filipe Costa Gondar Carneiro

UMinho | 2013



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Luís Filipe Costa Gondar Carneiro

Resistência a Altas Temperaturas de
Argamassas Com Incorporação de Materiais
de Mudança de Fase (PCM)

novembro de 2013



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Luís Filipe Costa Gondar Carneiro

**Resistência a Altas Temperaturas de
Argamassas Com Incorporação de Materiais
de Mudança de Fase (PCM)**

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor José Luís Barroso de Aguiar

e coorientação do
Doutor Fernando M. Alves S. Pacheco Torgal

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por todo o apoio e pelo esforço que fizeram ao longo da minha vida. À minha irmã por estar a meu lado nos momentos difíceis e fazer parte do meu caminho.

À minha namorada Vanessa, por ter sido o meu grande apoio, com toda a sua dedicação e conselhos dados.

Agradeço ao meu orientador Professor Doutor José Luís Barroso de Aguiar e coorientador, Doutor Fernando M. Alves S. Pacheco Torgal, pela atenção, orientação, disponibilidade e ajuda prestada ao longo de todos os trabalhos, contribuindo com conhecimento e conselhos de forma a enriquecer esta dissertação.

A todo o Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho o meu muito obrigado por disponibilizar os meios e materiais para a realização desta dissertação, tendo o cuidado de enaltecer a simpatia, boa disposição e disponibilidade para ajudar dos técnicos Carlos Jesus e Pokee.

Não posso deixar de agradecer em especial à Engenheira Sandra Cunha, por toda a ajuda, disponibilidade, atenção, troca de informações e materiais que foram sem sombra de dúvida uma mais valia para a elaboração desta dissertação.

Por fim aos meus amigos, companheiros desta longa e intensa viagem. Sem vocês não teria sido o mesmo, não teria vivenciado dos melhores momentos da minha vida académica. O meu muito obrigado a todos vocês.

“Não tentes ser bem sucedido, tenta antes ser um homem de valor”

Albert Einstein

RESUMO

As argamassas têm sido utilizadas há mais de 8000 anos para a construção de alvenaria e revestimento de paredes e tetos.

Atualmente este é um material amplamente utilizado na construção, surgindo a necessidade de o tornar funcional e ativo na luta contra o aquecimento global. Este facto dá origem ao conceito de argamassas térmicas, que como o nome indica, permite libertar energia para o ambiente interior das habitações, durante o período de arrefecimento minimizando a descida de temperatura, ou impedindo o excessivo aquecimento desse mesmo ambiente pela absorção de calor. Os materiais de mudança de fase (PCM) são produtos que podem ser adicionados nas argamassas de forma a que se verifique o comportamento acima descrito. Assim sendo, este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento mecânico deste tipo de argamassas quando sujeitas a altas temperaturas, uma vez que é uma característica importante e fulcral, pois o núcleo do PCM em estudo é em parafina (derivado de petróleo).

Neste estudo, são testadas oito composições, quatro das quais são argamassas tradicionais de cimento Portland, gesso, cal aérea e cal hidráulica e outras quatro, com o mesmo teor de ligantes mas incorporando 40 % PCMs (em relação à massa do agregado). Desta forma compara-se o comportamento destas argamassas com as convencionais. Note-se que pelo facto de ocorrerem fissurações aquando da aplicação das argamassas com PCM em tijolos, foi necessário um acréscimo de quatro composições com PCM e fibras de poliamida.

Os resultados demonstram que para as várias gamas de temperaturas estudadas, as argamassas com PCMs têm menor resistência mecânica (compressão, flexão e aderência por tração). Os resultados mostram também que a adição de fibras melhorou a resistência mecânica das argamassas (excepto para as argamassas de gesso). Note-se que ainda assim, a resistência obtida é inferior ao registado nas argamassas convencionais (excepto para as argamassas de cal).

Palavras-Chaves: Argamassa; PCM; Resistência Mecânica; Altas Temperaturas

ABSTRACT

Mortars are materials that have been used for over 8000 years for masonry construction and as renders for walls and ceilings.

Nowadays, as a material widely used in construction, the need to make it functional and active on the fight against global warming arises. This originated the concept of thermal mortars, which, as its name indicates, allows indoors energy release during the cooling period thus minimizing the drop in temperature, or by preventing excessive heating of the same by absorbing indoor excessive heat. PCMs are products which can be added to mortars to have the behavior described above. Thus, this work aims to study the mechanical behavior of this mortars when subjected to high temperatures. This is an important and crucial issue for this type of mortars, just because PCMs core is paraffin based

In this study eight mortar compositions were tested , four of which are of conventional mortars with Portland cement, gypsum, hydrated and hydraulic lime and the other four with the same binder content but replacing 40% PCMs (relative to the mass of the aggregate). In order to allow for comparisons with conventional mortars. Note that due to some PCM mortar cracking behavior during application to bricks, an extra four compositions were made which included PCM and polyamide fibers.

The results shows that for the several range temperatures studied, PCMs mortars show lower mechanical strength (in compression, in flexural and adhesion). The results also show that fiber addition improved mechanical strength (except for gypsum mortars) .Still they are unable to match the performance of the conventional mortars (except for lime mortars)

Keywords: Mortars, PCMs, Mechanical Strength, High Temperatures

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABELAS	xvii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação do trabalho	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3 Organização da dissertação.....	2
2 ESTADO DE CONHECIMENTO	5
2.1 Noção de argamassa.....	5
2.1.1 Tipos de ligantes	5
2.2 Enquadramento histórico	6
2.3 Evolução das Argamassas.....	9
2.4 Propriedades das argamassas	10
2.4.1 Resistência à compressão	10
2.4.2 Resistência à flexão	10
2.4.3 Resistência à aderência.....	11
2.5 Organizações.....	11
2.6 Argamassas térmicas.....	11
2.7 Material de mudança de fase (PCM)	14
2.7.1 Tipos de PCM.....	15
2.7.2 Microencapsulamento.....	17
2.7.3 Aplicação de PCM na construção.....	19

2.8	Fibras	19
2.9	Resistência de argamassas ao fogo e a altas temperaturas	20
2.9.1	Inflamabilidade dos PCM	21
3	MATERIAIS E COMPOSIÇÕES	23
3.1	Materiais usados na preparação das argamassas	23
3.1.1	Cal Aérea.....	23
3.1.2	Cal Hidráulica	23
3.1.3	Gesso.....	24
3.1.4	Cimento.....	24
3.1.5	Areia.....	25
3.1.6	PCM.....	25
3.1.7	Superplastificante.....	25
3.1.8	Fibras.....	26
3.1.9	Água.....	26
3.2	Composições estudadas.....	26
4	METODOLOGIA	29
4.1	Preparação das argamassas e preparação dos provetes	29
4.2	Resistência à flexão	34
4.3	Resistência à compressão	35
4.4	Ensaio “Pull-off”	36
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	41

5.1	Resistência à flexão	41
5.2	Resistência à compressão.....	53
5.2.1	Classe de resistência das argamassas.....	64
5.3	Resistência à aderência por tração	67
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	73
6.1	Conclusão.....	73
6.2	Trabalhos futuros	74
	BIBLIOGRAFIA	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1– Distribuição do consumo de energia em Portugal.....	12
Figura 2.2 – Necessidades energéticas nos edifícios residenciais	13
Figura 2.3 – Processo de mudança de fase do PCM.....	15
Figura 2.4 – Representação do triângulo de fogo.....	21
Figura 3.1 - Saco de cal aérea.....	23
Figura 3.2 – Saco de Cal Hidráulica.....	24
Figura 3.3 – Saco de Gesso	24
Figura 3.4 – Saco de Cimento	24
Figura 3.5 – Areia.....	25
Figura 3.6 – PCM	25
Figura 3.7 – Superplastificante.....	26
Figura 3.8 – Fibras de poliamida.....	26
Figura 4.1 – Balança eletrónica	30
Figura 4.2 – Misturadora mecânica	30
Figura 4.3 – Provetes 4*4*16 cm ³ e processo compactação	31
Figura 4.4 – Tanque com tijolo totalmente submerso	32
Figura 4.5 – Cofragem colocada no tijolo	33
Figura 4.6 – Forno	33
Figura 4.7 – Balança eletrónica	33
Figura 4.8 – Máquina LLOYD LR50K plus (Ensaio de Flexão)	34

Figura 4.9 - Máquina LLOYD LR50K plus (Ensaio de Compressão)	36
Figura 4.10 – Caroteadora.....	37
Figura 4.11 – Peças metálicas com 50mm diâmetro e cola de alta resistência.....	38
Figura 4.12 – Máquina de arrancamento	38
Figura 4.13 – Discos esféricos por limpar	38
Figura 4.14 – Forno.....	39
Figura 4.15 – Sequência da limpeza de cada disco.....	39
Figura 5.1 – Resistência à flexão das argamassas de cal aérea submetida a altas temperaturas	42
Figura 5.2 – Provetes de Cal aérea + PCM submetidos a 200 °C e 600 °C	42
Figura 5.3 – Provetes de Cal aérea + PCM + Fibras submetidos a 600 °C.....	42
Figura 5.4 – Resistência à flexão das argamassas de cal hidráulica submetida a altas temperaturas	45
Figura 5.5 – Provetes de Cal hidráulica + PCM submetidos a 600 °C	45
Figura 5.6 – Provetes de Cal hidráulica + PCM + Fibras submetidos a 600 °C	45
Figura 5.7 – Resistência à flexão das argamassas de cimento submetida a altas temperaturas	48
Figura 5.8 – Resistência à flexão das argamassas de gesso submetida a altas temperaturas ...	50
Figura 5.9 – Resistência à flexão a altas temperaturas das argamassas com PCM.....	51
Figura 5.10 – Resistência à flexão a altas temperaturas das argamassas com PCM + Fibras .	52
Figura 5.11 – Resistência à compressão das argamassas de cal aérea submetida a altas temperaturas	54
Figura 5.12 - Resistência à compressão das argamassas de cal hidráulica submetida a altas temperaturas	56

Figura 5.13 – Resistência à compressão das argamassas de cimento submetida a altas temperaturas.....	58
Figura 5.14 – Resistência à compressão das argamassas de gesso submetida a altas temperaturas	60
Figura 5.15 – Resistência à compressão a altas temperaturas das argamassas com PCM	63
Figura 5.16 – Resistência à compressão a altas temperaturas das argamassas com PCM + Fibras	64
Figura 5.17 – Resistência à aderência por tração das argamassas de cal aérea submetida a altas temperaturas.....	68
Figura 5.18 – Resistência à aderência por tração das argamassas de cal hidráulica submetida a altas temperaturas	68
Figura 5.19 – Resistência à aderência por tração das argamassas de cimento submetida a altas temperaturas.....	69
Figura 5.20 – Resistência à aderência por tração das argamassas de gesso submetida a altas temperaturas.....	69
Figura 5.21 – Argamassas estudadas e aplicadas no tijolo submetidas a 600 °C	70
Figura 5.22 – Rompimento da argamassa Cal aérea + PCM + fibras e Cal aérea.....	71
Figura 5.23 – Rompimento da argamassa Cal hidráulica e Cal hidráulica + PCM + fibras	72
Figura 5.24 – Rompimento da argamassa Cimento + PCM + fibras e Cimento	72
Figura 5.25 – Rompimento da argamassa Gesso + PCM + fibras e Gesso	72
Figura 5.26 – Resistência à aderência por tração a altas temperaturas das argamassas com PCM + Fibras	72

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1– PCM´s orgânicos	16
Tabela 2.2 – PCM´s Inorgânicos	16
Tabela 2.3 – PCM´s eutéticos	16
Tabela 2.4 – Processos de Microencapsulamento	18
Tabela 3.1 – Composições das argamassas estudadas sem fibras	27
Tabela 3.2 – Composições das argamassas estudadas com fibras.....	27
Tabela 5.1 – Variação da resistência à flexão ao longo dos valores de temperatura estudadas de cada composição (cal aérea).....	43
Tabela 5.2 – Variação da resistência à flexão das argamassas com PCM ao longo dos valores de temperaturas estudadas em relação à AR (cal aérea).....	43
Tabela 5.3 – Ganho na resistência à flexão proporcionada pela adição de fibras nas argamassas com PCM (cal aérea)	44
Tabela 5.4 – Variação da resistência ao longo dos valores de temperatura estudadas de cada composição (cal hidráulica).....	46
Tabela 5.5 – Variação da resistência das argamassas com PCM ao longo dos valores de temperatura estudadas em relação à AR (cal hidráulica)	46
Tabela 5.6 – Ganho na resistência à flexão proporcionada pela adição de fibras nas argamassas com PCM (cal hidráulica).....	47
Tabela 5.7 – Variação da resistência à flexão ao longo dos valores de temperatura estudadas de cada composição (cimento)	48
Tabela 5.8 – Variação da resistência à flexão das argamassas com PCM ao longo dos valores de temperatura estudadas em relação à argamassa de referência (cimento).....	48

Tabela 5.9 – Ganho na resistência à flexão proporcionada pela adição de fibras nas argamassas com PCM (cimento).....	49
Tabela 5.10 – Variação da resistência à flexão ao longo dos valores de temperatura estudadas de cada composição (gesso).....	50
Tabela 5.11 – Variação da resistência das argamassas com PCM ao longo dos valores de temperatura estudadas em relação à argamassa de referência (gesso).....	50
Tabela 5.12 – Ganho na resistência à flexão proporcionada pela adição de fibras nas argamassas com PCM (gesso).....	51
Tabela 5.13 – Variação da resistência à compressão ao longo dos valores de temperaturas estudadas de cada composição (cal aérea)	55
Tabela 5.14 – Variação da resistência à compressão das argamassas com PCM ao longo dos valores de temperaturas estudadas em relação à argamassa de referência (cal aérea).....	55
Tabela 5.15 – Ganho na resistência à compressão proporcionada pela adição de fibras nas argamassas com PCM (cal aérea)	55
Tabela 5.16 – Variação da resistência à compressão ao longo dos valores de temperaturas estudadas de cada composição (cal hidráulica).....	57
Tabela 5.17 – Variação da resistência à compressão das argamassas com PCM ao longo dos valores de temperaturas estudadas em relação à argamassa de referência (cal hidráulica)	57
Tabela 5.18 – Ganho na resistência à compressão proporcionada pela adição de fibras nas argamassas com PCM (cal hidráulica).....	57
Tabela 5.19 – Variação da resistência à compressão ao longo dos valores de temperaturas estudadas de cada composição (cimento)	59
Tabela 5.20 – Variação da resistência à compressão das argamassas com PCM ao longo dos valores de temperaturas estudadas em relação à argamassa de referência (cimento).....	59
Tabela 5.21 – Ganho na resistência à compressão proporcionada pela adição de fibras nas argamassas com PCM (cimento).....	59

Tabela 5.22 – Variação da resistência à compressão ao longo dos valores de temperaturas estudadas de cada composição (gesso).....	61
Tabela 5.23 – Variação da resistência à compressão das argamassas com PCM ao longo dos valores de temperaturas estudadas em relação à argamassa de referência (gesso)	61
Tabela 5.24 – Ganho na resistência à compressão proporcionada pela adição de fibras nas argamassas com PCM (gesso)	61
Tabela 5.25 – Classes de resistência (NP EN 998-1:2010) para a temperatura 20 °C	66
Tabela 5.26 – Classes de resistência (NP EN 998-1:2010) para a temperatura 200 °C	66
Tabela 5.27 – Classes de resistência (NP EN 998-1:2010) para a temperatura 600 °C	67

1 INTRODUÇÃO

No presente capítulo serão abordados temas como a motivação, objetivos e organização da presente dissertação.

1.1 Motivação do trabalho

Está atualmente cada vez mais presente e evidente o conceito de sustentabilidade, tendo em conta a crescente necessidade de bens materiais e recursos energéticos que cada vez mais a sociedade desfruta e exige. Dentro desta necessidade surgiu a expressão denominada de desenvolvimento sustentável, que “permite satisfazer as necessidades do presente sem comprometer as possibilidades das gerações futuras satisfazerem as suas” (Pacheco-Torgal e Jalali, 2010). Tendo em conta a preocupação com o futuro, o uso de materiais que sejam ecoeficientes na construção integra-se na vertente do conceito de construção sustentável. Os materiais usados devem ter um desempenho que seja equivalente aos materiais convencionais tendo em conta que deverão gastar menos recursos, causar menor poluição, menor custos com transporte e com o próprio consumo do material estando assim presente os aspetos ambientais, sociais, culturais e económicos.

Desta forma, apresenta-se a possibilidade de integrar em argamassas de revestimento um produto denominado de materiais de mudança de fase (Phase Change Material), de agora em diante denominado de PCM. Por si só o PCM não é um material sustentável porém confere às argamassas propriedades térmicas que permitirão reduzir significativamente o uso de equipamentos para aquecimento e arrefecimento da habitação, resultando num menor gasto de energia que o edifício consome o que por sua vez leva a um menor impacto ambiental, tornando-se assim numa argamassa sustentável a nível funcional.

O PCM que será integrado nas argamassas alvo de estudo nesta dissertação tem um núcleo de parafina (derivado do petróleo), o que poderá comprometer o comportamento mecânico deste tipo de argamassas quando sujeitas a altas temperaturas, sendo este um ponto importante e fulcral no que a argamassas diz respeito.

1.2 Objetivos

O principal objetivo da presente dissertação é avaliar o comportamento mecânico das argamassas térmicas em estudo quando sujeitas a altas temperaturas. Salienta-se que a

composição das argamassas alvo de estudo já foram estudadas, sendo este trabalho um complemento ao trabalho já executado pela Engenheira Sandra Cunha no decorrer do seu doutoramento na Universidade do Minho.

Será importante avaliar as possíveis perdas de resistências mecânicas que poderão ocorrer após submissão dos provetes a altas temperaturas, quando comparados com provetes à temperatura ambiente (20 °C), tendo também como termos comparativos argamassas que não têm adição de PCM.

Uma outra característica que será importante avaliar é o impacto que o aumento da temperatura terá na perda ou não de aderência das argamassas em estudo, sendo as mesmas aplicadas sobre tijolo cerâmico, visto tratar-se de um material usado tradicionalmente na construção.

Para analisar o comportamento das argamassas, foram definidas temperaturas a que as mesmas serão sujeitas, sendo escolhidos os valores de 200 °C e 600 °C tendo como referência a temperatura ambiente (20 °C). Estas temperaturas são uma tentativa de aproximação à realidade de um incêndio, verificando assim o comportamento que as argamassas terão quando sujeitas a um stress desta natureza.

1.3 Organização da dissertação

A dissertação estará dividida em capítulos de forma a facilitar a sua leitura e pesquisa, sendo a mesma constituída por 6 capítulos.

No capítulo 1 foi dado um breve enquadramento do tema da dissertação com a situação que se vive na atualidade, contextualizando o mesmo. Apresentam-se também os objetivos e resultados que se esperam obter com a dissertação de mestrado e por fim estará evidenciada a estruturação da mesma.

No capítulo 2 será apresentado o estado de conhecimento e algumas noções sobre o tema que é abordado na presente dissertação para assim se perceber e compreender a necessidade da elaboração deste trabalho.

No capítulo 3 apresentam-se os materiais que foram usados na elaboração do trabalho assim como as composições que foram alvo de estudo.

No capítulo 4 está patente a metodologia usada em todos os trabalhos, isto é, descreve os procedimentos seguidos para a preparação das argamassas e efetuação dos ensaios.

No capítulo 5 apresentam-se os resultados obtidos para cada ensaio efetuado, assim como a análise dos mesmos.

No capítulo 6 são dadas as conclusões dos estudos realizados, sendo que se sugere também possíveis intervenções futuras no tema.

2 ESTADO DE CONHECIMENTO

Este capítulo descreve a história e evolução que as argamassas têm vindo a sofrer ao longo dos tempos fazendo um enquadramento geral e histórico das mesmas. Será dada também uma abordagem teórica ao que é uma argamassa, argamassa térmica, organizações existentes, materiais de mudança de fase e resistência de argamassas ao fogo e altas temperaturas.

2.1 Noção de argamassa

Uma argamassa, de forma a se perceber aquilo que irá ser retratado no decorrer do trabalho, define-se como sendo uma mistura de ligante, areia e água (Aguiar, 2007).

Como o próprio nome indica, os ligantes são usados na união de partículas quando lhes é adicionada água. A união dos três constituintes forma uma pasta que posteriormente ganhará presa e endurece devido a reações de carbonatação e/ou hidratação. Antes da escolha do tipo de ligante a ser utilizado em obra deve-se ter em conta o local para o qual a argamassa irá desempenhar a sua função, podendo a obra ser junto a zonas marítimas, em contacto permanente com o ar ou então enterradas.

2.1.1 Tipos de ligantes

Os diversos tipos de ligantes podem-se aglomerar em dois grupos, sendo eles (Martins, 2012):

- Hidrófilos: - Aéreos (cal aérea e gesso)
- Hidráulicos (cal hidráulica e cimento)

Estes ligantes são usados em argamassas e betões. No decorrer da dissertação estes serão os ligantes que serão alvo de estudo. Este tipo de ligante pode ser aglomerado com outros materiais quando misturado com água, formando uma pasta que depois de endurecida cria a argamassa ou betão.

- Hidrófobos: - Alcatrão (betumes, asfaltos, resinas)

Usados como impermeabilizantes e em pavimentos. Não serão alvo de estudo na presente dissertação, no entanto será curioso saber que os mesmos não necessitam de água para endurecerem, repelindo a mesma quando já estão endurecidos. A forma de tratar este ligante é através de uma fonte de calor a uma determinada temperatura que

aumentará a viscosidade do material permitindo a sua trabalhabilidade, endurecendo quando arrefece.

2.2 Enquadramento histórico

O uso de argamassas remonta aos primórdios da humanidade. Desde sempre que o Homem procurou o conforto e proteção, como tal procurou soluções que permitissem a habitabilidade cumprindo esses requisitos. Estes foram ao longo do tempo sofrendo uma melhoria contínua, que por sua vez seria refletida no conforto dos espaços. As soluções construtivas e os materiais usados foram-se tornando cada vez melhores e com técnicas mais sofisticadas que permitiam ir ao encontro das necessidades e exigências que a evolução acarretava.

No que às argamassas diz respeito, estas foram feitas e usadas com o propósito de proteger e reforçar as construções existentes, revestindo-as superficialmente e dando-lhes uma estética mais agradável.

A argamassa em si, nos seus primórdios era feita apenas por barro, que era utilizado tal e qual como era encontrado na Natureza. De forma a atingir maior eficiência foram-se juntando fibras vegetais e palha o que tornava a argamassa mais consistente. Com esta mistura, existiam alguns problemas referentes à retração que era então necessário combater, o que fez com que se comesse a adicionar areia na mistura, o que combatia este inconveniente e produzia uma argamassa mais resistente e dura.

Remonta aos povos Etruscos e Egípcios o uso de argamassas na construção de arcos, abóbadas e pirâmides, que utilizavam como aglutinantes principalmente cal e gesso. Mais tarde começaram a ser fabricadas argamassas em que em vez de cal e gesso se usavam cimentos naturais obtidos misturando lava vulcânica (endurece debaixo de água), cabendo este feito ao povo Romano.

Salientando que estas argamassas eram já pozolânicas, com propriedades hidráulicas. Desde então e até ao século XVIII este tipo de material não sofreu grandes evoluções nem desenvolvimentos na sua tecnologia ou técnica de aplicação.

Apenas em 1756, foi descoberto por um engenheiro britânico, John Smeaton que os melhores cimentos hidráulicos eram aqueles que eram obtidos de calcário impuro. Este mesmo engenheiro foi protagonista de uma das primeiras obras de grande envergadura com o uso de

argamassas de cimento, sendo o mentor do farol Eddystone em Inglaterra (construído entre 1724 e 1792) (Martins & Assunção, 2010).

Em 1812 foi determinado por um engenheiro francês, Louis Vicat , a forma e o meio para o fabrico de cimentos artificiais, contribuindo ainda a uma grande escala para conhecimentos sobre a influência da razão água-cimento e da granulometria das areias na resistência das argamassas.

Em 1824, Aspdin consegue fazer a primeira cozedura de um cimento, registando nesse mesmo ano a patente do cimento Portland. Desde então até ao século XX que a opção passou para este ligante hidráulico. No entanto isto trazia alguns problemas como argamassas mais fissuráveis. Entre 1950 e 1970, tanto na Europa como nos Estados Unidos, a indústria da construção sofreu um crescimento bastante acentuado. Este facto levou a que as argamassas começassem a ser construídas em fábrica e não em obra (Bayer & Lutz, 2003).

Devido à crescente evolução e procura de argamassas construídas em fábrica, originou-se um rápido desenvolvimento de novos materiais e tecnologias na construção, obtendo maior qualidade e rapidez de execução. Assim sendo as fábricas de produção de argamassas secas multiplicaram-se na Europa, localizando-se geralmente junto dos grandes consumidores. Já em 2004 e devido à diretiva dos produtos da construção 89/106/EEC foi instituída a marcação “Conformité Européene” (CE) das argamassas (APFAC, 2008).

Atualmente têm-se verificado estudos de argamassas térmicas, onde se adicionam materiais de mudança de fase junto das argamassas tradicionais, de forma a obter uma técnica que permita o armazenamento de calor no interior dos edifícios.

Em termos da utilização das argamassas, existem diversos fins específicos tais como:

- Argamassas de assentamento – faz a junção de materiais;
- Cimento-cola – elemento de colagem de materiais;
- Argamassas de juntas – isolar as juntas entre revestimentos;
- Argamassas de regularização – material de enchimento ou nivelamento;
- Argamassas de revestimento de suportes – acabamento de superfícies, proteção e efeito visual de paredes.

No que diz respeito ao revestimento de paredes em Portugal e na Europa, dos materiais mais utilizados estão as argamassas. As argamassas de reboco são usadas há já vários séculos e devem possuir as seguintes características:

- Boa impermeabilização;
- Proteção contra as ações físicas/químicas do meio ambiente;
- Bom efeito estético;
- Resistência à fendilhação;
- Boa aderência ao suporte.

Este tipo de revestimento tem constantemente sofrido evoluções tecnológicas tentando acompanhar as exigências dos utilizadores no que ao conforto diz respeito, além de ter em conta a estética interior/exterior dos edifícios é também cada vez mais visada a vertente do ambiente (Bayer & Lutz, 2003).

Existem diversas classificações das argamassas de reboco sendo elas subdivididas de acordo com o local em que esta é produzida (industrial, semi-industrial e feita no local), de acordo com a sua conceção (desempenho, formulação) e de acordo com as propriedades e uso (uso geral, leve, colorido, uso externo, renovação, isolamento térmico) (Alves, 2011).

Com o evoluir dos tempos, além do aumento das exigências por parte dos utilizadores, também as exigências regulamentares têm aumentado e evoluído de forma a obter um produto com mais qualidade e fiabilidade. De forma a conseguir o controlo de qualidade requerido, a utilização de argamassas confeccionadas em obra tem vindo a decair de uma forma lenta e gradual. Por sua vez com as argamassas industriais tem acontecido o contrário, isto é, tem-se verificado um aumento da sua utilização.

Em Portugal, devido à conjuntura económica e à vasta oferta no mercado imobiliário, existem indicadores que preveem uma diminuição de construções novas e um aumento da reabilitação de edifícios, tendência que se verifica também na Europa (Alves, 2011).

2.3 Evolução das Argamassas

De uma forma geral, as argamassas são usadas com a mesma funcionalidade desde os primórdios da sua utilização. As mesmas são usadas como proteção e revestimento dos elementos opacos dos edifícios, como paredes, tetos... Visto que estas têm desempenhado corretamente o papel para o qual foram concebidas, não têm sofrido uma evolução significativa (Martins & Assunção, 2010).

Em geral as alterações e evoluções que as argamassas têm sofrido, dizem respeito à melhoria da sua resistência mecânica e trabalhabilidade. Outra vertente que se tem tentado melhorar é o conforto visual que a argamassa final tem. De forma a alcançar estes objetivos, foram ao longo dos tempos sendo estudadas diferentes argamassas, que diferiam no tipo de agregado e/ou ligante e ainda estudando a introdução de fibras ou adjuvantes de forma a conferir uma determinada característica específica pretendida para a argamassa em causa (Alves, 2011).

Na Universidade do Minho decorre desde 2004 uma investigação onde estão a ser estudadas argamassas com propriedades térmicas, obtidas através da adição de materiais de mudança de fase (PCM). A troca de fase do material irá permitir aos utilizadores do edifício um conforto constante sem ser necessário o uso excessivo de sistemas de climatização, permitindo assim poupanças a nível energético (Cunha et al, 2012).

Este material de mudança de fase, apesar de ser uma novidade nas argamassas, já foi utilizado até agora na indústria do vestuário e em interiores de automóveis, de forma a obter o conforto de uma temperatura constante aos clientes que usufruam desse determinado produto (Alves, 2011).

Tem vindo a desenvolver-se um estudo (Cunha et al, 2012) em relação ao comportamento destas argamassas térmicas, no entanto ainda não se verificou como seria o seu comportamento em relação ao fogo, ou a altas temperaturas. Esta questão é deveras importante, pois o PCM utilizado neste estudo é constituído por um núcleo em parafina, e por uma parede em melamina formaldeído. É então importante perceber como se comportará a argamassa térmica quando sujeita a esse tipo de solicitação.

2.4 Propriedades das argamassas

A propriedade das argamassas mais relevantes para o decorrer da presente dissertação é a sua resistência mecânica, sendo as resistências à compressão, tração e aderência por tração que serão alvo de estudo.

A resistência mecânica de uma argamassa está relacionada com a capacidade de esta resistir a esforços mecânicos (que podem ser esforços internos, externos ou provenientes das condições ambientais) sem degradação ou deformações plásticas visíveis e também pela resistência ao desgaste superficial. Note-se que esta resistência depende da natureza e quantidade dos ligantes e agregados que constituem a argamassa (Martins & Assunção, 2010).

2.4.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão das argamassas para assentamento de alvenarias e cantarias deve ser na ordem dos 5 a 10 MPa, uma vez que normalmente o local de aplicação é sujeito a tensões significativas (Martins & Assunção, 2010).

A sua resistência dependerá então de vários fatores como:

- Dureza da areia;
- Qualidade do aglutinante;
- Composição granulométrica da areia;
- Quantidade de água de amassadura;
- Dosagem do aglutinante;
- Modo de fabricação da argamassa.

2.4.2 Resistência à flexão

A resistência à flexão pode ser determinada através de um ensaio que permite além de avaliar esta propriedade, avaliar o módulo de elasticidade à flexão de um dado material. Note-se que se deve ter em conta a possibilidade de dispersão de resultados, daí ser aconselhável ensaiar vários provetes, estabelecendo-se assim um valor médio.

De salientar que a resistência à flexão não terá valores muito elevados quando comparados com os valores da resistência à compressão, no entanto poderá existir proporcionalidade entre os valores obtidos.

2.4.3 Resistência à aderência

A resistência à aderência está relacionada com a capacidade que a interface substrato/argamassa possui de absorver tensões tangenciais e normais a ela, sem ocorrer a separação da argamassa ao substrato (Sabbatini, 1984). Note-se que segundo Sabbatini, não existe correspondência entre um dado parâmetro e a capacidade de aderência.

A aderência da argamassa à alvenaria pode-se desenvolver por dois mecanismos distintos, sendo eles (Carvalho et al, 2005):

- Aderência química: resistência aderente proveniente de forças covalentes entre o substrato e a argamassa.
- Aderência mecânica: resistência aderente devido aos produtos provenientes da hidratação do ligante que migram para a superfície dos poros do substrato devido a efeitos de sucção ou absorção capilar.

2.5 Organizações

Visto a crescente industrialização do setor das argamassas, foi criado a nível europeu a EMO (European Mortar Industry Organization) a organização que representa este setor. Trata-se da Federação Europeia de Fabricantes de Argamassas de Construção que agrega 15 países entre os quais Portugal. Em Portugal a EMO é representada pela APFAC, a Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas e ETICS, que tem por objetivo contribuir para a solidariedade entre os associados, representando-os e defendendo os seus interesses, promovendo os seus produtos aos diversos clientes alvo (www.apfac.pt,20013).

2.6 Argamassas térmicas

A evolução dos tempos, da Humanidade e dos padrões de conforto que são cada vez mais exigentes, trazem vantagens, pois aumenta o nível anímico e sentimental do cidadão. O conforto de uma habitação prende-se na maioria das vezes com o seu conforto térmico, capacidade de manter uma temperatura constante e dentro dos parâmetros considerados aceitáveis (Verão – 25°C e Inverno - 20°C) (Ministério das Obras Públicas, 2006). No entanto este conforto carece

do gasto de energia para os sistemas de climatização que são usados em cada edifício, o que faz com se despenda por vezes bastante dinheiro e se gastem fontes de energia não renováveis. O uso deste tipo de energias não renováveis leva a um aumento da poluição atmosférica, que tem vindo a crescer desde a era da Industrialização.

Para controlar a emissão de gases que contribuem para a poluição atmosférica e consequente aumento do efeito de estufa, foi criado a 16 de Fevereiro de 2005 o Protocolo de Quioto. Trata-se de um acordo internacional sobre o ambiente que visa a redução no mínimo de 5% (quando comparado com o ano de 1990) das emissões de gases com efeito de estufa (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorcarbonos, hidrocarbonetos perfluorados e hexafluoreto de enxofre) sendo estes, responsáveis pelo crescente aquecimento global que se tem registado (www.infopedia.pt,2013).

Em Portugal os gastos energéticos, no que ao setor dos edifícios diz respeito, têm vindo a aumentar na ordem dos 7% ao ano. Esse mesmo setor dos edifícios tem uma fatia considerável no consumo de energia, consumindo cerca de 60% da eletricidade consumida em Portugal, conforme se verifica no gráfico da Figura 2.1.

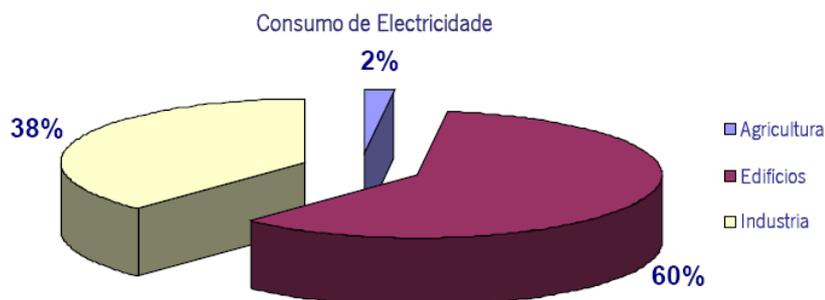


Figura 2.1– Distribuição do consumo de energia em Portugal (Almeida, 2012)

Verifica-se assim que existe um grande contributo por parte dos edifícios no consumo de energia. No que respeita aos gastos nos edifícios associados ao conforto dos mesmos, estes recaem em grande escala sobre as necessidades de aquecimento dos espaços úteis, dispêndio de energia na iluminação e eletrodomésticos e também no aquecimento de águas sanitárias (Figura 2.2).

Como se verifica no gráfico da Figura 2.2, um quarto da energia que se consome num edifício resulta do uso de sistemas de climatização. Sabendo que alguns destes sistemas contribuem

para emissões de gases de efeito de estufa, será importante alcançar alternativas que permitam diminuir esta dependência.



Figura 2.2 – Necessidades energéticas nos edifícios residenciais (Almeida, 2012)

Segundo o Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), existem limites impostos em termos de temperatura para os edifícios de habitação e edifícios de serviço com área inferior a 1000 m^2 sem sistemas de climatização centralizados ($P \leq 25 \text{ kW}$). Os limites são os seguintes (Ministério das Obras Públicas, 2006):

- Estação de Arrefecimento (Verão) – Temperatura de referência de 25°C e Humidade Relativa de 50%;
- Estação de Aquecimento (Inverno) – Temperatura de referência de 20°C .

Estes limites vão ao encontro do conforto dos ocupantes dos edificadados, no entanto, apesar de esse conforto ser atingido, ocorre também um maior dispêndio de energia nos sistemas usados para manter este conforto. Assim sendo torna-se fulcral tomar medidas mitigadoras destes consumos (Ministério das Obras Públicas, 2006).

Sabe-se que todos os materiais interagem com o ambiente, contudo a maioria destes não possui a capacidade de alterar as suas propriedades de acordo com as características do ambiente em que estão inseridos. Os materiais que atualmente constituem as soluções construtivas dos edifícios, armazenam a energia que é captada pelo sol, transformando-a em energia térmica. Essa capacidade de armazenamento é representada pela inércia térmica que o edifício em questão terá. Este armazenamento energético possibilita a posterior libertação dessa mesma energia quando a temperatura ambiente do edifício diminuir. Podem ainda ser tomadas medidas na fase de projeto de um edificadado que ajudem a minimizar as necessidades de aquecimento e arrefecimento do mesmo obtendo um aproveitamento de energia solar térmica e ventilação natural, tendo em conta a localização e orientação do edifício e o tipo de soluções construtivas.

Tendo em conta este facto, porque não encontrar uma técnica que permitisse aumentar significativamente a capacidade de armazenamento térmico, diminuindo assim as necessidades energéticas dos edifícios, obtendo assim uma maior poupança quer a nível económico quer a nível ambiental.

Este aumento da capacidade de armazenamento térmico pode ser obtido com o uso de argamassas térmicas nas paredes dos edifícios. Com esta inovação a temperatura interior do edifício não sofreria grandes alterações ao longo do dia, mantendo-se um ambiente constante e confortável. De salientar que isto não significa a total independência do edifício de sistemas de climatização, apenas permitiria a redução da sua solicitação, o que já traria grandes vantagens quer a nível económico quer a nível ambiental reduzindo os custos e emissões de GEE.

Está então em estudo a incorporação de um material de mudança de fase (PCM) nas argamassas de revestimento (Cunha et al, 2012).

2.7 Material de mudança de fase (PCM)

Um material de mudança de fase (PCM) é um material com a capacidade de alterar as suas propriedades de acordo com as características do ambiente em que o mesmo é aplicado. A sua alteração verifica-se quando existem mudanças de temperatura no ambiente interior do edifício. O princípio deste material baseia-se na alteração do seu estado físico, isto é, quando a temperatura ambiente que rodeia o PCM aumenta e quando esse aumento ultrapassa o seu ponto de fusão, o mesmo passa do estado sólido para o estado líquido. Esta mudança de estado, permite a absorção e armazenamento da energia calorífica do ambiente (Pacheco-Torgal, 2013). De seguida, quando a temperatura desce e ultrapassa o ponto de solidificação do PCM, o mesmo passa agora do estado líquido para o sólido. Neste caso a mudança de estado líquido para o sólido, permite a libertação da energia calorífica para o meio ambiente interior outrora armazenada, conforme se pode verificar na Figura 2.3.

Em termos físicos, o PCM deve ser encapsulado (garantindo que na fase líquida não ocorra o risco deste se deslocar do local onde foi aplicado) devendo a microcápsula ser esférica. A cápsula deve ser feita de um material polimérico, formando assim a parede do PCM. O núcleo deve ser constituído por um substância ativa, que pode ser sólida, líquida ou gasosa.

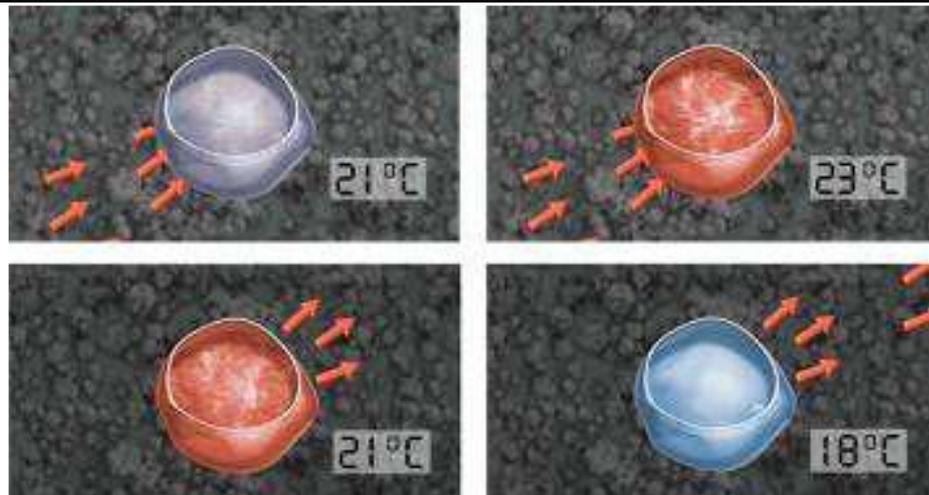


Figura 2.3 – Processo de mudança de fase do PCM (Cunha et al, 2012).

2.7.1 Tipos de PCM

Existem vários tipos de PCM, sendo eles (Pacheco-Torgal e Jalali, 2010):

- Substâncias orgânicas (Tabela 2.1): materiais parafínicos ou não parafínicos, têm a capacidade de mudarem de fase vezes sem conta;
- Substâncias inorgânicas (Tabela 2.2): sais hidratados e metálicos, sendo os sais hidratados os mais vantajosos por possuírem um alto calor de fusão por unidade de volume, tendo uma alta condutibilidade térmica e obtendo pequenas mudanças de volume durante a fusão, no entanto o seu peso é uma grande desvantagem;
- Misturas eutécticas (Tabela 2.3): combinação de 2 ou mais compostos orgânicos e/ou inorgânicos.

O uso deste tipo de material vai ter efeitos positivos e significativos na capacidade de armazenamento de temperatura do interior do edifício (Pacheco-Torgal, 2013). Com isso, mantêm-se os padrões de conforto que são exigidos pelos utilizadores, o que por sua vez permitirá reduzir custos nos sistemas de aquecimento e arrefecimento do edificado (Cunha et al, 2012).

Tabela 2.1– PCM’s orgânicos. (Fonte: Pacheco-Torgal e Jalali, 2010)

Substância	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de fusão (kJ/kg)
Estereato de butilo	19	140
Parafina C₁₆ – C₁₈	20-22	152
Ácidos cáprico e láurico	21	143
C₁₂H₂₂O₄	21	120
Poliglicol E600	22	127,2
Parafina C₁₂ – C₃₄	22-24	189
34% Ácido mistrico+66% ácido cáprico	24	147,7
1-Dodecanol	26	200
Parafina C₁₈ (45%-55%)	28	244
Estereato de vinilo	27-29	122
Ácido cáprico	32	152,7

Tabela 2.2 – PCM’s Inorgânicos. (Fonte: Pacheco-Torgal e Jalali, 2010)

Substância	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de fusão (kJ/kg)
KF.4H₂O	18,5	231
Mn(NO₃)₂.6H₂O	25,8	152,9
CaCl₂.6H₂O	29	190,8
LiNO₃.3H₂O	30	296
Na₂SO₄.10H₂O	32	251

Tabela 2.3 – PCM’s eutéticos. (Fonte: Pacheco-Torgal e Jalali, 2010)

Substância	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de fusão (kJ/kg)
66.6% CaCl₂.6H₂O + 33.3% MgCl₂.6H₂O	25	127
47% Ca(NO₃)₂.4H₂O + 53% Mg(NO₃)₂.6H₂O	30	136
60% Na(CH₃COO).3H₂O + 40% CO(NH₂)₂	30	200.5
48% CaCl₂ + 4.3% NaCl + 0.4% KCl + 47.3 H₂O	26.8	188

Assim sendo obtêm-se vantagens em várias vertentes, sendo elas a vertente social, ambiental e económica. Estas vertentes estão associadas à muito aclamada construção sustentável. No que diz respeito ao âmbito social obtêm-se aumento do conforto térmico, temperaturas no interior

do edifício constantes e benefícios relativos à humidade. Na vertente ambiental, como se utiliza menos os sistemas para climatização, permite reduzir o recurso a fontes de energia não renováveis, diminuindo a emissão de gases de efeito de estufa. Por fim a nível económico, existem também vantagens, pois trata-se de uma técnica onde os custos são facilmente suportados pelo utilizador, uma vez que, a camada aplicada com o PCM será de apenas cerca de 1 mm, ocorre a diminuição dos consumos energéticos e existe um grande desfasamento dos consumos elevados (Cunha et al, 2012).

Apesar das vantagens que são apresentadas, é necessário garantir o compromisso entre a trabalhabilidade, resistência mecânica e aparência estética que a argamassa possuirá.

Tem-se vindo a desenvolver este tipo de estudo (Cunha et al, 2012) sobre as três características acima referidas, no entanto será importante perceber como se comportará o PCM, quando exposto a altas temperaturas ou ao fogo.

Estes tipos de ensaios não foram ainda executados para a argamassa em estudo, sendo então importante perceber como se comportarão quando sujeitas a estas ações.

2.7.2 Microencapsulamento

O microencapsulamento do material de mudança de fase, é o processo que consiste em envolver um dado material em estado líquido ou sólido, por um outro material no estado sólido, sendo que o material envolvido designa-se por núcleo e o material envolvente por cápsula esférica, cujo tamanho varia entre 0.020 μ m e os 2000 μ m. Este processo permite que o PCM não altere as suas propriedades físicas nem volumétricas (Cunha et al, 2012).

As vantagens inerentes ao processo de microencapsulamento, verificam-se pelo aumento da razão superfície/volume do PCM, beneficiando-se a transferência de calor entre o material e o meio em que o mesmo está inserido, sendo que este processo impede também como já referido que quando o núcleo se encontra na fase líquida não ocorra o risco deste se deslocar do local onde foi aplicado.

Existem diversos processos de microencapsulamento (Tabela 2.4), sendo que a diferença básica entre os métodos existentes está no tipo de envolvimento ou aprisionamento do material ativo pelo agente encapsulante, uma vez que a combinação entre o material e o agente ativo pode ser de natureza física, química ou físico-química (Suave et al, 2006).

Tabela 2.4 – Processos de Microencapsulamento. Fonte: (Silva, 2009)

Processos	Descrição
Químicos	<ul style="list-style-type: none">• Polimerização por emulsão, dispersão, suspensão;• Policondensação interfacial, por dispersão, por suspensão.
Físico-Químicos	<ul style="list-style-type: none">• Evaporação do solvente;• Suspensão por cross-linking;• Coacervação;• Extrusão.
Mecânicos	<ul style="list-style-type: none">• Revestimentos;• Extrusão;• Spray;• Deposição de fluidos;• Micronização.

2.7.2.1 Técnicas de microencapsulamento de PCM

O objetivo do microencapsulamento de PCM é diferente do objetivo do processo aplicado a produtos cosméticos, fragâncias, fármacos ou outro tipo de produto contido em microcápsulas onde existe uma libertação controlada dessas substâncias. No caso do PCM, o objetivo é que o material se mantenha no interior da microcápsula e que mantenha as suas condições normais de manuseamento, interagindo assim indiretamente com o local que o mesmo está inserido.

A estabilidade química, física e mecânica do material aplicado na formação da cápsula será determinante na escolha do processo de microencapsulamento. Usualmente o processo mais utilizado é a dispersão de gotas de PCM numa solução aquosa (dispersão de óleo-em-água) na qual se formam paredes poliméricas à volta das gotículas suspensas, usando técnicas como a coacervação, policondensação interfacial assim como outros processos de polimerização in-situ (Silva, 2009). A constituição da cápsula pode derivar de diversos materiais como poliureiam oliuretano, polimetilmetaacrilato, polivi-nilacetato, polivinilacetato, poliestireno ou serinas de ureia-formaldeído, melamina-formaldeído ou gelatina-formaldeído (Silva, 2009; Cunha et al, 2012).

2.7.3 Aplicação de PCM na construção

A pesquisa de materiais de construção eco eficientes tem presente a preocupação já referida do conceito de desenvolvimento sustentável. Desta forma de entre as mais variadas áreas de pesquisa de materiais para a construção e edificação, incluem-se a pesquisa de materiais que permitam atenuar as necessidades de arrefecimento dos edifícios, ficando presente desta forma a importância da aplicação deste tipo de materiais na construção (Pacheco-Torgal, 2013).

Para a aplicação de PCMs na construção será deveras importante perceber de que forma ocorrem as trocas de energia térmica num edifício, uma vez que sendo o principal objetivo do PCM intervir neste ponto, pretende-se melhorar o comportamento térmico dos edifícios sem recurso a energias não renováveis. Assim sendo, as principais trocas de energia térmica que ocorrem num edifício dão-se por radiação e/ou por convecção.

Sabendo-se quais as formas de transferência de energia, é importante perceber em que partes de um edifício se poderá incorporar PCMs consoante a troca de energia que ocorra. No caso do fenómeno de radiação pode-se optar por explorar o uso dos mesmos em paredes, pavimento e tetos, atuando de uma forma passiva, que funciona com base no conceito de arquitetura solar, ou de forma ativa, que funciona como sistema híbrido, articulando sistemas de ventilação natural ou circulação de fluídos. No caso do fenómeno de convecção a exploração do mesmo é feita através do uso dos PCMs como meio de transferência em sistemas de ventilação e ar condicionado, passando um fluxo de ar, quente ou frio, no seio do PCM ou então por contacto direto em contracorrente com uma suspensão de PCM (Silva, 2009).

Em termos de aplicações em edifícios, já foram exploradas aplicações dos dois sistemas descritos em diversos componentes dos mesmos, sendo as aplicações de maior relevância em paredes, pavimentos, tetos, envidraçados, sistemas de ventilação, betão, tijolos/blocos entre outros sistemas (Silva, 2009).

2.8 Fibras

Das diversas fibras que existem, aquelas de importância mais relevante na presente dissertação são as fibras sintéticas de poliamida, vulgarmente conhecidas como “nylon”. Este tipo de fibras foram as primeiras a serem sintetizadas a partir do petróleo, gás natural e água (Martins, 2012; Factori, 2009).

As propriedades das poliamidas permitem-lhe ter um vasto campo de aplicações em engenharia, pois combinam boas propriedades resistentes quer química quer a abrasão, elevada resistência à tensão e à flexão, estabilidade dimensional, fácil processamento, baixa absorção de humidade, rápida secagem e grande poder de resistência contra insetos nocivos e ao apodrecimento. No entanto as poliamidas têm a desvantagem de serem hidrofílicas, propriedade que faz variar com a humidade a sua estabilidade dimensional, densidade, resistência mecânica e resistência elétrica (Factori, 2009).

2.9 Resistência de argamassas ao fogo e a altas temperaturas

O fogo, segundo Silva (2010), é uma ação, considerada como acidental, com grande influência nos materiais de construção, os quais apresentam comportamento diferente à sua ação.

A resistência ao fogo define-se em termos regulamentares como o intervalo de tempo em que a estrutura consegue assegurar uma suficiente capacidade resistente, face à ação do fogo (Civil L. N., 1990).

Outro problema que poderá advir do fogo está diretamente ligado com o mesmo. As altas temperaturas geradas podem trazer grandes problemas aos materiais de construção que fazem parte dos diversos sistemas construtivos. No caso das argamassas pode gerar a separação completa de uma área delaminada, fenómeno conhecido como spalling (Silva, 2010).

Assim sendo nesta análise de resistência é necessário referir parâmetros que nos indicarão qual o comportamento do material.

Como tal os parâmetros serão (Silva, 2010):

- Estabilidade do material ao fogo (a qualificação da estabilidade é feita no intervalo de tempo em que o mesmo mantém a sua resistência à ação aplicada);
- Pára-Chama (material que permite barrar a passagem de chamas ou gases para o lado não sujeito ao fogo, isto é, classifica a estanquidade do material);
- Corta-Fogo (característica dos materiais que permite além do mesmo ser para-chamas, isolar em termos térmicos a face não exposta da face exposta ao fogo).

É importante reter, que são necessários três fatores em simultâneo para que haja fogo. Estes três fatores formam o conhecido como triângulo do fogo (Figura 2.4).



Figura 2.4 – Representação do triângulo de fogo (sapadoresdecoimbra.no.sapo.pt,2013).

Desta forma os fatores são:

- Fonte de calor;
- Combustível;
- Comburente (oxigénio).

Para que se verifique a ocorrência de um incêndio é necessário que a mistura combustível/oxigénio atinja temperaturas suficientemente altas para que ocorra a combustão (Real, 2003).

É neste campo como já referido anteriormente que poderão surgir as desvantagens dos tipos de argamassas que serão ensaiadas sendo uma grande desvantagem do PCM de natureza parafínica a sua inflamabilidade.

2.9.1 Inflamabilidade dos PCM

Como já referido o material que constitui o núcleo do PCM será de origem parafínica, sendo uma das suas desvantagens a sua inflamabilidade. Este facto torna inviável a utilização e incorporação de PCM na maioria das aplicações pretendidas, pois trata-se de uma propriedade bastante importante e decisiva aquando da acreditação de um produto. De uma forma geral a inflamabilidade de certos PCM está diretamente relacionada com o seu ponto de ignição, que corresponde à temperatura mínima que um dado material consegue libertar uma mistura inflamável com o ar, em quantidade suficiente para iniciar a combustão, sob condições atmosféricas normais (Silva, 2009).

É então importante perceber quais os principais fatores que influenciam o ponto de ignição dos PCM:

- Ponto de ebulição;
- Peso molecular;

- Temperatura de autoignição da molécula.

No que diz respeito às parafinas, que é o caso que está em estudo, a sua combustão produz, além de produtos intermediários, dióxido de carbono, água e calor sendo a reação muito exotérmica. O aumento do número de átomos de carbono faz com que as reações sejam normalmente incompletas, tal facto leva à formação de subprodutos (monóxido de carbono, óxidos de azoto, entre outros). O incremento do tamanho da molécula pode ser tal que os hidrocarbonetos tornam-se mais difíceis de inflamar (Silva, 2009).

Devido ao facto mencionado acima, torna-se vital perceber o comportamento que o PCM com núcleo de parafina terá quando se encontra num meio em que a temperatura é elevada. É uma propriedade que se torna um requisito essencial para qualquer artigo que seja usado e comercializado. Estudando o comportamento deste material, pode-se tentar contornar e melhorar o seu comportamento, caso ocorra o que acima foi descrito, podendo obter melhorias alterando a parede do PCM ou pode a solução passar pela incorporação ou posterior aplicação de revestimentos com capacidades retardadoras de chama.

3 MATERIAIS E COMPOSIÇÕES

No decorrer deste capítulo serão enumerados todos os materiais que foram usados no decorrer de todos os ensaios e estudos elaborados assim como as composições de argamassas que foram alvos de estudo.

3.1 Materiais usados na preparação das argamassas

Os diversos materiais usados na preparação das diversas argamassas que foram alvo de estudo serão apresentados cada um de forma individual para assim se saber a sua proveniência e as suas características.

Note-se que algumas das propriedades dos materiais não são mencionadas pois ainda não tinham sido disponibilizados dados mais concretos pelos fabricantes.

3.1.1 Cal Aérea

A cal aérea utilizada na preparação das argamassas, é comercializada pela Calcidrata e neste caso foi fornecida em sacos com cerca de 22 kg (Figura 3.1). Trata-se de um material extremamente fino e de elevado grau de brancura.



Figura 3.1 - Saco de cal aérea

3.1.2 Cal Hidráulica

A cal hidráulica utilizada no fabrico das argamassas, foi fornecida em sacos de 40 kg pela SECILMARTINGANÇA (Figura 3.2) sendo a mesma certificada segundo a norma NP EN 459-1:2010.



Figura 3.2 – Saco de Cal Hidráulica

3.1.3 Gesso

O gesso usado, foi fornecido em sacos de 30 kg (Figura 3.3) pela SIVAL é fabricado segundo a norma EN 13279-1.



Figura 3.3 – Saco de Gesso

3.1.4 Cimento

O cimento usado no fabrico das argamassas foi fornecido pela SECIL em sacos de 40 kg (Figura 3.4) sendo do tipo CEM II/B-L 32.5 N.



Figura 3.4 – Saco de Cimento

3.1.5 Areia

A areia (Figura 3.5) usada em todas as composições possui um tamanho médio de partícula de $439.9\mu\text{m}$, com granulometria compreendida entre 0.5 mm e 0.063 mm. Note-se que a massa volúmica da mesma é de cerca de 2600 kg/m^3 .



Figura 3.5 – Areia

3.1.6 PCM

O PCM que foi incorporado nas composições alvo de estudo, é comercializado em pó (seco) ou em emulsão. No caso desta investigação, adotou-se o uso do PCM em pó (Figura 3.6), o que facilita a incorporação do mesmo em argamassas prontas. De salientar que o ponto de transição deste material ronda os $23\text{ }^\circ\text{C}$, com uma entalpia de 110kJ/kg .



Figura 3.6 – PCM

3.1.7 Superplastificante

O superplastificante (Figura 3.7) utilizado é baseado em poliacrilato, com uma densidade de 1050kg/m^3 .



Figura 3.7 – Superplastificante

3.1.8 Fibras

As fibras usadas foram fibras sintéticas de poliamida (nylon) (figura 3.8), com um comprimento de 6mm e densidade de 1380kg/m^3 . Note-se que as fibras apenas foram adicionadas nas constituições que continham PCM.



Figura 3.8 – Fibras de poliamida

3.1.9 Água

No fabrico de todas as amassaduras a água utilizada proveio da rede de abastecimento da Universidade do Minho, Guimarães.

3.2 Composições estudadas

Salienta-se desde já que não foi necessário efetuar o estudo da composição das argamassas alvo desta investigação, uma vez que as mesmas são referentes a estudos que têm vindo a ser elaborados no doutoramento pela Engenheira Sandra Cunha, estudos esses ainda em desenvolvimento.

Desta forma apresenta-se na Tabela 3.1 as composições alvo de estudo sem adição de fibras e na Tabela 3.2 as composições das argamassas alvo de estudo com adição de fibras.

Note-se que todas as composições que contêm PCM tem 40% do mesmo na sua composição, sendo esta percentagem em relação à massa do agregado.

Tabela 3.1 – Composições das argamassas estudadas sem fibras

Composição	Quantidades em kg/m ³				
	Ligante	Areia	Superplastificante	PCM	Água
Cal hidráulica - 0% PCM	500	1351,1	15	0	270
Cal hidráulica - 40% PCM	500	571,6	15	228,64	310
Cal aérea - 0% PCM	500	893,4	15	0	235
Cal aérea - 40% PCM	800	451,2	24	180,48	272
Gesso - 0% PCM	500	1360,4	15	0	280
Gesso - 40% PCM	500	540,1	15	216,04	350
Cimento - 0% PCM	500	1418,8	15	0	275
Cimento - 40% PCM	500	644,3	15	257,72	280

Tabela 3.2 – Composições das argamassas estudadas com fibras

Composição	Quantidades em kg/m ³					
	Ligante	Areia	Superplastificante	PCM	Água	Fibras
Cal hidráulica - 40% PCM	500	569,4	15	227,76	310	2,5
Cal aérea - 40% PCM	800	447,7	24	179,08	272	4
Gesso - 40% PCM	500	537,9	15	215,16	350	2,5
Cimento - 40% PCM	500	642,2	15	256,88	280	2,5

4 METODOLOGIA

Neste capítulo serão abordados os procedimentos e métodos que foram usados para a preparação dos provetes em estudo, assim como a descrição de todos os ensaios a que os mesmos foram sujeitos.

Salienta-se que os ensaios elaborados, flexão, compressão e aderência, foram executados de forma a perceber qual a influência que a temperatura teria no comportamento das argamassas em estudo.

4.1 Preparação das argamassas e preparação dos provetes

Todas as argamassas foram elaboradas no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, sendo que todos os materiais necessários para a preparação dos mesmos foram fornecidos e disponibilizados.

Como já referido foram estudados 4 ligantes diferentes contendo ou não na sua composição PCM, perfazendo assim 8 composições diferentes conforme visto no ponto anterior. O previsto seria ensaiar apenas estas composições, no entanto como já mencionado foi necessário adicionar fibras nas argamassas com 40% de PCM, aumentando em 4 o número de composições estudadas.

Para a execução de todas as argamassas sem adição de PCM o procedimento foi o mesmo para todas elas, sendo os passos principais os seguintes:

- Pesar todos os constituintes das argamassas na balança eletrónica (Figura 4.1);
- Adicionar no balde da misturadora água mais superplastificante;
- Ligar a misturadora (Figura 4.2) durante 30 segundos na velocidade 1;
- Retirar o balde da misturadora e adicionar a areia e o ligante em estudo;
- Ligar a misturadora novamente durante 1 minuto na velocidade 1;
- Passado o minuto acima referido aumenta-se para a velocidade 2 durante 2 minutos;
- Finalizados os 2 minutos retira-se o balde e a argamassa encontra-se pronta a ser utilizada.



Figura 4.1 – Balança eletrônica



Figura 4.2 – Misturadora mecânica

Para a execução de todas as argamassas com adição de PCM o procedimento foi igual para todas elas, sendo os principais passos:

- Pesar todos os constituintes das argamassas na balança eletrônica (Figura 4.1);
- Adicionar no balde da misturadora água mais superplastificante;
- Ligar a misturadora (Figura 4.2) durante 30 segundos na velocidade 1;
- Retirar o balde da misturadora e adicionar o PCM;
- Ligar a misturadora novamente durante 2 minutos à velocidade 1;
- Retirar novamente o balde da misturadora e juntar a areia mais o ligante;
- Ligar novamente a misturadora à velocidade 1 durante 1 minuto;
- Passado o minuto acima referido, aumentar a velocidade da misturadora para 2 e aguardar 3 minutos;
- Finalizado o ciclo, as argamassas estão prontas a se utilizadas.

Na preparação das argamassas que continham fibras, os passos foram os mesmos acima referidos, sendo que as mesmas foram adicionadas na mesma altura que a água e o superplastificante. Note-se que apenas foram adicionadas fibras nas constituições que incorporam PCM.

Os moldes usados (Figura 4.3) na preparação dos provetes a ensaiar à flexão e compressão são fabricados em aço. Cada molde permitiu a execução de 3 provetes com as dimensões normalizadas de $40 * 40 * 160 \text{ mm}^3$.



Figura 4.3 – Provetes $4*4*16 \text{ cm}^3$ e processo compactação

Para o uso dos moldes foi necessário uma preparação prévia que começa por untar os mesmos com óleo descofrante, que facilita o desmolde. Feito isso iniciou-se o enchimento do molde até meio (mais ou menos) e compactou-se o mesmo com compactador (Figura 4.3) dando 25 pancadas. De seguida encheu-se o molde e deu-se novamente 25 pancadas com o compactador.

Finalizado o enchimento dos moldes os mesmos foram cobertos com sacos plásticos, permitindo assim reduzir a retração das argamassas. O desmolde foi feito passados cerca de catorze dias, sendo as argamassas alvo de estudo ensaiadas aos 28 dias de idade, quer à flexão quer à compressão.

No que respeita ao ensaio à aderência, o fabrico das argamassas alvos de estudo foi o acima mencionado, sendo que as mesmas foram aplicadas em tijolo cerâmico. Apenas foram usadas neste ensaio as argamassas sem adição de PCM e as argamassas com adição de 40% de PCM com fibras.

Antes da aplicação das argamassas nos tijolos, os mesmos foram submersos em água durante cerca de trinta minutos (Figura 4.4). Retirado o tijolo da água colocaram-se duas tábuas

lateralmente, de forma a servir de cofragem (Figura 4.5), permitindo assim à argamassa atingir a altura de 10 mm. Colocou-se a argamassa e posteriormente alisou-se a mesma. Acabada a colocação da argamassa nos tijolos, os mesmos foram cobertos por sacos plásticos impedindo assim uma retração exagerada que poderia fissurar a argamassa em causa. A descofragem do tijolo pode ser feita logo no dia a seguir ao que se coloca a argamassa no tijolo, salvo se a mesma ainda não estiver solidificada, no entanto o ensaio de aderência ocorre aos 28 dias de idade.

Como já enunciado foram feitos estudos para diversas gamas de temperatura, sendo que os provetes e tijolos foram deixados numa sala de acondicionamento, onde a temperatura é constante, durante os 28 dias. Para o caso da temperatura ambiente não foi necessário colocar no forno nenhum provete ou tijolo, apenas se aguardou os 28 dias de idade e ensaiaram-se. Nas restantes temperaturas, 200 °C e 600 °C, os provetes e tijolos (já com 28 dias de idade) foram colocados no forno (Figura 4.6) até atingirem a temperatura pretendida, que uma vez atingida foi mantida durante quatro horas, sendo que só se retiraram do forno e foram ensaiados quando os mesmos já se encontravam à temperatura ambiente. Note-se que não existe uma norma que rege este procedimento, os passos adotados foram tidos em conta consoante o tempo e temperatura que poderá ocorrer num incêndio.

Por fim salienta-se que todos os provetes foram pesados numa balança (Figura 4.7) antes de se executar qualquer ensaio.



Figura 4.4 – Tanque com tijolo totalmente submerso



Figura 4.5 – Cofragem colocada no tijolo



Figura 4.6 – Forno



Figura 4.7 – Balança eletrônica

4.2 Resistência à flexão

O ensaio foi realizado segundo a norma EN 1015-11:1999. Utilizam-se moldes de 3 provetes com as dimensões já referidas. Os mesmos foram ensaiados através da máquina universal LLOYD LR50K plus (Figura 4.8). Note-se que o ensaio foi realizado com controlo de força e a uma velocidade de 10 N/s.



Figura 4.8 – Máquina LLOYD LR50K plus (Ensaio de Flexão)

O procedimento para o ensaio de resistência à flexão foi o mesmo para todos os provetes elaborados, seguindo-se os seguintes passos:

1. Antes de efetuar o ensaio e após pesar os provetes, todos eles foram marcados com três cm de cada lado, ficando os mesmos distanciados 10 cm entre si, para que as superfícies de contacto entre provete e máquina de ensaio sejam as corretas e referidas na norma;
2. Uma vez marcados, colocaram-se os provetes na máquina de ensaio, um de cada vez, na posição correta, conforme se pode verificar na Figura 4.8, e iniciou-se o ensaio até à rotura de cada provete;
3. Depois de ensaiados todos os provetes retiraram-se os dados que ficam gravados no software da própria máquina de ensaio.
4. Uma vez obtidos os dados calculou-se a resistência à flexão pra cada provete através da equação (1):

$$R_F = 1.5 * \frac{F * l}{b * d^2} \quad (1)$$

Onde: F – força máxima aplicada no ensaio aquando da rotura do provete (N)
l – distância entre apoios onde é colocado o provete (100 mm)
b – comprimento da secção do provete (40 mm)
d – altura da secção do provete (40 mm)

Finalizado todo o processo, guardam-se as duas metades que ficam de cada provete para iniciar o ensaio à compressão.

4.3 Resistência à compressão

O ensaio foi realizado segundo a norma EN 1015-11:1999. Os ensaios foram efetuados recorrendo às metades dos provetes originados no ensaio à flexão, usando assim desta forma provetes com dimensões de $4 * 4 * (\pm)8 \text{ cm}^3$. Os mesmos foram ensaiados também usando a máquina universal LLOYD LR50K, sendo o ensaio realizado com controlo de força e a uma velocidade de 150 N/s.

O procedimento para o ensaio de resistência à compressão foi o mesmo para todos os provetes elaborados, seguindo-se os seguintes passos:

1. Finalizado o ensaio à flexão, trocam-se as peças da máquina de ensaio de forma a iniciar-se o ensaio à compressão sendo que os provetes a ensaiar são as 2 metades de cada provete resultantes do ensaio à flexão;
2. Prepara-se a máquina LLOYD (Figura 4.9) para que a força exercida sobre o provete em estudo seja numa superfície de contacto com área de $4*4 \text{ cm}^2$;
3. Inicia-se o ensaio, sendo que o mesmo termina quando ocorrer a rotura;
4. Depois de ensaiados todos os provetes retiram-se os dados que ficam gravados no software da própria máquina de ensaio.
5. Uma vez obtidos os dados calcula-se a resistência à compressão para cada provete através da equação (2):

$$R_C = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Onde: F – força máxima de rotura à compressão (N)
A – área de aplicação da carga (1600 mm^2)

6. Repete-se o procedimento para todos os provetes em estudo.



Figura 4.9 - Máquina LLOYD LR50K plus (Ensaio de Compressão)

4.4 Ensaio “Pull-off”

O ensaio “Pull-off” foi feito de acordo com a norma EN 1015-12:2000. De forma sucinta o ensaio será feito para cada intervalo de temperatura acima referido, sendo a argamassa colocada em tijolo cerâmico.

Os principais passos a seguir são:

1. Efetuar os carotes na argamassa usando a caroteadora representada na Figura 4.10, provido duma broca circular oca, com 50 mm de diâmetro interior;
2. Preparar a cola que será usada para colar os discos metálicos (Figura 4.11) na argamassa;
3. Uma vez colados aguardam-se cerca de 24 horas para a cola atuar;
4. Passadas as 24 horas inicia-se o ensaio usando a máquina de arrancamento representada na Figura 4.12 (atendendo que a mesma deve estar nivelada). A máquina deverá ser constituída essencialmente por (LNEC, 1986):
 - Um dinamómetro de ar colocado entre e discos metálicos (2) e (3). O disco inferior (3) possui 3 pés (4) dispostos simetricamente em relação ao centro.
 - Uma haste (5), munida de roscas nas 2 extremidades, que atravessa os 2 discos e o dinamómetro. Esta haste só pode ter movimentos longitudinais visto a sua rotação ser impedida por um cavilha (6) alojada num disco (7) que, por sua vez, está fixo ao disco (2).

- Uma peça (8), com cavidade interior terminando inferiormente por uma superfície esférica, que enrosca na rosca inferior da haste.
- Um volante (9) que é enroscado na extremidade da haste e que se apoia sobre o disco (7) por meio dum rolamento de esferas (10).
- Um parafuso (11), cuja cabeça esférica fica alojada na cavidade da peça (8).
- Um manómetro com mostrador graduado (12)
- Pastilhas metálicas cilíndricas (13), com 50 mm de diâmetro e 10 mm de espessura, providas numa das faces dum rosca perfeitamente centrada.



Figura 4.10 – Caroteadora

Note-se que para efetuar o ensaio de aderência, a superfície dos discos metálicos assim como a superfície da argamassa onde se colam os discos devem estar limpos de poeiras para que o ensaio seja o mais preciso possível. Dessa forma para a limpeza dos discos colocaram-se os mesmos por limpar (Figura 4.13) no forno (Figura 4.14) a 400 °C durante cerca de uma hora. Posteriormente e com os discos já arrefecidos procedeu-se à limpeza dos mesmos com a ajuda da máquina de furar representada na Figura 4.15 (foi colocado na máquina uma peça adequada à limpeza dos discos).

Note-se que o procedimento da preparação do ensaio só se iniciou quando os provetes foram retirados do forno, se for o caso.



Figura 4.11 – Peças metálicas com 50mm diâmetro e cola de alta resistência

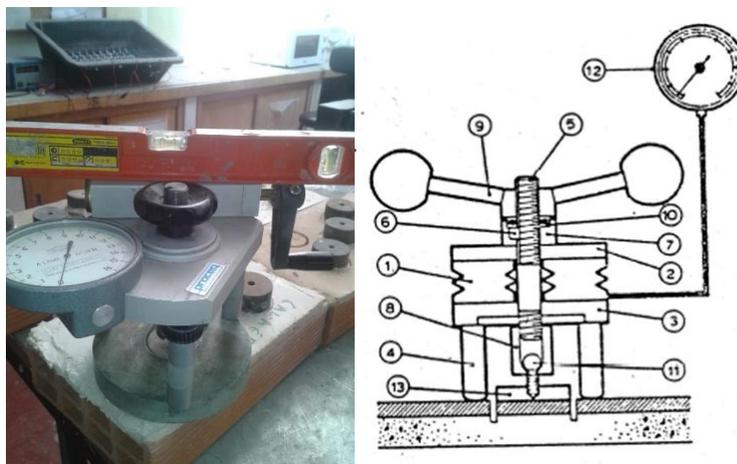


Figura 4.12 – Máquina de arrancamento



Figura 4.13 – Discos esféricos por limpar



Figura 4.14 – Forno



Figura 4.15 – Sequência da limpeza de cada disco

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos, fazendo uma discussão e análise aos mesmos. De forma a facilitar a leitura e compreensão dos resultados obtidos, os mesmos serão apresentados através de gráficos e tabelas acompanhados da descrição do que ocorre em cada situação. Importa referir que neste capítulo se adotam as seguintes siglas:

- AR - argamassa de referência;
- PCM - argamassa com 40% de PCM;
- PCM mais Fibras - argamassa com 40% de PCM mais fibras.

5.1 Resistência à flexão

No que respeita à resistência à flexão cada ligante estudado teve um comportamento distinto, assim sendo será apresentado para cada um deles a descrição do que sucedeu.

Cal aérea

Na Figura 5.1 está representado o comportamento em termos de resistência à flexão das várias composições com ligante de cal aérea estudadas quando submetidas às temperaturas alvo de estudo, sendo que:

- A resistência à flexão da AR entre os 20 °C e os 200 °C não apresenta diferenças que se considerem assinaláveis, pois a mesma é de apenas 4% conforme se verifica na Tabela 5.1. No entanto constata-se que para a temperatura de 600 °C o valor de resistência à flexão diminui cerca de 74% (Tabela 5.1) comparando com os resultados obtidos aos 20 °C.
- A argamassa com PCM apresenta resistência à flexão semelhante à AR para a temperatura de 20 °C, sendo a diferença entre elas de apenas cerca de 7% (Tabela 5.2). Porém para todas as outras temperaturas (200 °C e 600 °C) os provetes ficaram destruídos (Figura 5.2).
- Por fim verifica-se que as argamassas com PCM mais fibras registam a 20 °C e 200 °C resultados superiores às outras 2 composições, no entanto aos 600 °C os provetes ficaram destruídos (Figura 5.3). Note-se que a mesma regista sempre uma perda de resistência com o aumento da temperatura. Os valores superiores de resistência quando

comparados à AR pode ser explicado pela adição de fibras que irá preencher os poros da argamassa conferindo-lhe uma maior resistência.



Figura 5.1 – Provetes de Cal aérea + PCM submetidos a 200 °C e 600 °C



Figura 5.2 – Provetes de Cal aérea + PCM + Fibras submetidos a 600 °C

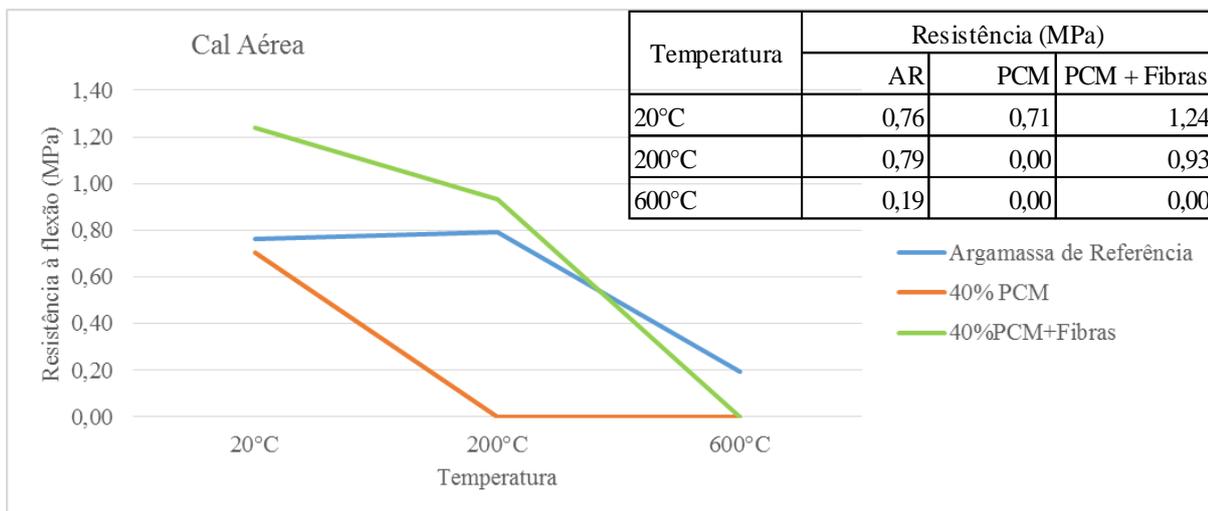


Figura 5.3 – Resistência à flexão das argamassas de cal aérea submetida a altas temperaturas

Tabela 5.1 – Variação da resistência à flexão ao longo dos valores de temperatura estudadas de cada composição (cal aérea)

Temperatura	Perda %		
	AR	PCM	PCM + Fibras
20°C	4,41	-100	-24,96
200°C			
20°C	-74,70	-100	-100
600°C			

Tabela 5.2 – Variação da resistência à flexão das argamassas com PCM ao longo dos valores de temperaturas estudadas em relação à AR (cal aérea)

Temperatura	Perda %	
	PCM	PCM + Fibras
20°C	-7,21	63,18
200°C	-100	17,29
600°C	-100	-100

A evolução descrita da resistência à flexão de cada composição com ligante de cal aérea pode ser vista em termos percentuais nas Tabelas 5.1 e 5.2.

- Verifica-se na Tabela 5.1 como já referido que a AR tem apenas uma diferença percentual de resistência à flexão de 4% comparando os valores obtidos aos 20 °C e aos 200 °C, no entanto comparando a sua resistência entre os 20 °C e 600 °C a mesma tem uma perda próxima dos 75%. Constata-se também que para a argamassa de PCM ocorre a perda total de resistência quer aos 200 °C quer aos 600 °C, comparando com a sua resistência à flexão aos 20 °C, pois os provetes como já referido ficaram destruídos. Por fim verifica-se na argamassa de PCM mais fibras, que a perda de resistência (comparando com a sua resistência à flexão aos 20 °C) para os 200 °C ronda os 25%, perfazendo 100% quando a mesma é sujeita aos 600 °C (provetes ficaram destruídos).
- A Tabela 5.2 permite constatar que no caso da argamassa com PCM aos 20 °C as diferenças de resistências à flexão comparadas com a AR são de apenas 7%, daí se considerar que as resistências são semelhantes, porém aos 200 °C e 600 °C a diferença percentual é de 100% pois os provetes como já referido ficaram destruídos. Todavia a argamassa com PCM mais fibras obteve um aumento de 63% na sua resistência à flexão aos 20 °C comparando com a AR e 17% aos 200 °C. No entanto aos 600 °C verifica-se uma perda de 100% da sua resistência pois os provetes destruíram-se.

Tabela 5.3 – Ganho na resistência à flexão proporcionada pela adição de fibras nas argamassas com PCM (cal aérea)

Temperatura	Ganho % - fibras PCM + Fibras
20°C	75,86
200°C	100
600°C	-----

A Tabela 5.3 demonstra o efeito que a adição de fibras proporcionou na resistência à flexão das argamassas de cal aérea com PCM, sendo que aos 20 °C há um aumento na ordem dos 76% e aos 200 °C um aumento de 100%, pois os provetes que apenas continham PCM ficaram destruídos e os que tinha adição de fibras não. Aos 600 °C não permite tirar conclusão alguma pois os provetes de ambas as composições ficaram destruídos.

Cal hidráulica

Na Figura 5.4 está representado o comportamento em termos de resistência à flexão das várias composições com ligante de cal hidráulica estudadas quando submetidas às temperaturas alvo de estudo, sendo que:

- Verifica-se na AR que os resultados da resistência à flexão são semelhantes para as temperaturas de 20 °C e 200 °C, sendo que os valores obtidos têm uma diferença de apenas cerca de 8% (Tabela 5.4). No entanto para os 600 °C constata-se que existe perda de resistência à flexão bastante acentuada.
- No caso da argamassa com PCM, verifica-se que a mesma apresenta resistência inferior em relação à AR para a temperatura de 20 °C e 200 °C, sendo que os provetes ficaram destruídos quando submetidos à temperatura de 600 °C (Figura 5.5). Denota-se também que a mesma perde resistência com o aumento da temperatura.
- Por último verifica-se que as argamassas com PCM mais fibras apresentam um comportamento em tudo semelhante à argamassa com PCM sendo que as melhorias registadas aos 20 °C e 200 °C não são consideráveis pois os seus valores são semelhantes (nunca superiores a 8%, Tabela 5.6). Aos 600 °C os provetes ficaram destruídos (Figura 5.6).

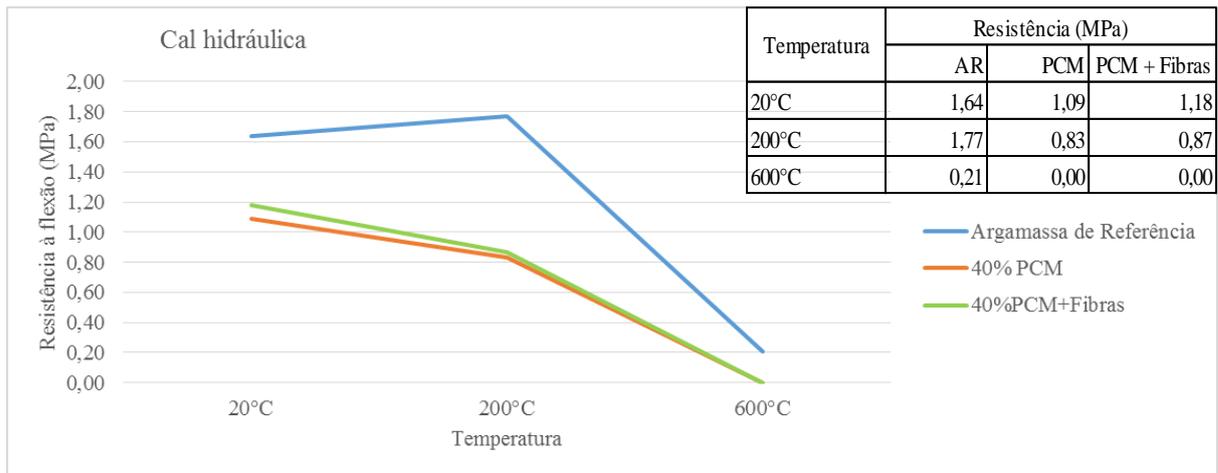


Figura 5.4 – Resistência à flexão das argamassas de cal hidráulica submetida a altas temperaturas



Figura 5.5 – Provetes de Cal hidráulica + PCM submetidos a 600 °C



Figura 5.6 – Provetes de Cal hidráulica + PCM + Fibras submetidos a 600 °C

A evolução descrita das perdas de resistência à flexão de cada composição com ligante de cal hidráulica pode ser vista em termos percentuais nas Tabelas 5.4 e 5.5.

- Pelo que se pode verificar na Tabela 5.4 a AR tem valores semelhantes aos 20 °C e 200°C como já referido sendo a diferença entre eles na ordem dos 8%, no entanto

comparando a sua resistência entre os 20 °C e 600 °C a mesma tem uma perda próxima dos 87%. Constata-se que para a argamassa de PCM ocorre aos 200 °C uma perda de cerca de 23% da resistência à flexão e a perda total da mesma quando sujeito a 600 °C (comparando com os resultados aos 20 °C). Verifica-se por fim que na argamassa de PCM mais fibras, que a perda de resistência à flexão (comparando com a sua resistência à flexão aos 20 °C) para os 200 °C ronda os 26%, perfazendo 100% quando a mesma é sujeita aos 600 °C.

- A Tabela 5.5 permite identificar que a argamassa com PCM regista perdas de resistência à flexão que aos 20 °C rondam os 33% e aos 200 °C os 53%, quando comparados os resultados obtidos para a AR nesses esses mesmos valores de temperatura. Por fim aos 600 °C os provetes como ficaram destruídos a perda é total (100%). A argamassa com PCM mais fibras obteve uma diminuição de 28% na sua resistência à flexão comparando com a AR aos 20 °C. Aos 200 °C a perda ronda os 51% comparando com o resultado obtido para a AR a essa mesma temperatura. Por fim aos 600 °C verifica-se que a argamassa com PCM mais fibras perde 100% da sua capacidade resistente comparando à AR.

Tabela 5.4 – Variação da resistência ao longo dos valores de temperatura estudadas de cada composição (cal hidráulica)

Temperatura	Perda %		
	AR	PCM	PCM + Fibras
20°C			
200°C	8,08	-23,37	-26,32
20°C			
600°C	-87,45	-100	-100

Tabela 5.5 – Variação da resistência das argamassas com PCM ao longo dos valores de temperatura estudadas em relação à AR (cal hidráulica)

Temperatura	Perda %	
	PCM	PCM + Fibras
20°C	-33,69	-28,21
200°C	-52,98	-51,06
600°C	-100	-100

Tabela 5.6 – Ganho na resistência à flexão proporcionada pela adição de fibras nas argamassas com PCM (cal hidráulica)

Temperatura	Ganho % - fibras
	PCM + Fibras
20°C	8,26
200°C	4,10
600°C	-----

A Tabela 5.6 demonstra que o efeito da adição de fibras na resistência à flexão das argamassas de cal hidráulica com PCM é insignificante pois as melhorias obtidas são inferiores a 10% em qualquer valor de temperatura estudado. Aos 600 °C não permite tirar nenhuma conclusão pois os provetes de ambas as composições ficaram destruídos.

Cimento

Na Figura 5.7 está representado o comportamento em termos de resistência à flexão das várias composições com cimento estudadas quando submetidas às temperaturas alvo de estudo, constatando que:

- Na AR os resultados da resistência à flexão são semelhantes para as temperaturas de 20 °C e 200 °C, sendo que os valores obtidos têm uma diferença de apenas cerca de 3% (Tabela 5.7). No entanto para os 600 °C constata-se que existe perda de resistência à flexão bastante acentuada.
- No caso da argamassa com PCM, verifica-se que a mesma apresenta resistência inferior em relação à AR para todos os valores de temperatura estudados. Os valores de resistência à flexão diminuem com o aumento da temperatura.
- Por último verifica-se também que a argamassa com PCM mais fibras diminui a sua resistência à flexão em todos os intervalos de temperatura, sendo os mesmos inferiores aos obtidos na AR. Note-se que de seguida se comparará a mesma com a argamassa com PCM.

A evolução descrita das perdas de resistência à flexão para cada composição cujo ligante é cimento pode ser constatada em termos percentuais nas Tabelas 5.7 e 5.8.

- A Tabela 5.7 mostra que a AR obtém resultados de resistência à flexão bastante semelhantes para os 20 °C e 200 °C, sendo que a diferença percentual não ultrapassa os 3%. Porém quando a mesma é sujeita aos 600 °C a perda ronda os 75%. No caso da argamassa com PCM verifica-se que a mesma tem perda de resistência à flexão superior

Resistência a Altas Temperaturas de Argamassas Com Incorporação de Materiais de Mudança de Fase (PCM)

a 50% quando sujeitas a 200 °C, e esse valor de perda atinge os 96% quando a mesma é sujeita a 600 °C. Por último constata-se que na argamassa com PCM mais fibras as perdas rondam os 47% aos 200 °C e os 94% aos 600 °C.

- A análise da Tabela 5.8 permite verificar que as argamassas de PCM e PCM mais fibras apresentam perdas na ordem dos 50% quando comparadas com a AR logo aos 20 °C. Essas vão se acentuando conforme ocorre o aumento da temperatura, sendo que para os 600 °C as perdas rondam os 90%.

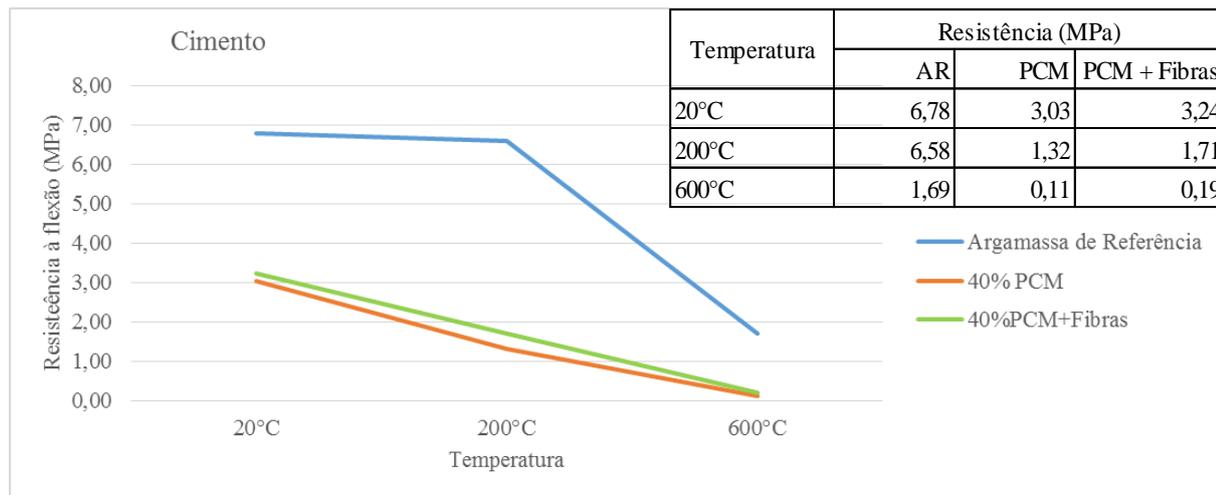


Figura 5.7 – Resistência à flexão das argamassas de cimento submetida a altas temperaturas

Tabela 5.7 – Variação da resistência à flexão ao longo dos valores de temperatura estudadas de cada composição (cimento)

Temperatura	Perda %		
	AR	PCM	PCM + Fibras
20°C	-3,06	-56,40	-47,20
200°C	-75,05	-96,22	-94,26
600°C			

Tabela 5.8 – Variação da resistência à flexão das argamassas com PCM ao longo dos valores de temperatura estudadas em relação à argamassa de referência (cimento)

Temperatura	Perda %	
	PCM	PCM + Fibras
20°C	-55,27	-52,26
200°C	-79,88	-73,99
600°C	-93,23	-89,02

Tabela 5.9 – Ganho na resistência à flexão proporcionada pela adição de fibras nas argamassas com PCM (cimento)

Temperatura	Ganho % - fibras
	PCM + Fibras
20°C	6,74
200°C	29,27
600°C	62,16

A Tabela 5.9 demonstra o efeito que a adição de fibras proporcionou na resistência à flexão das argamassas de cimento com PCM, sendo que aos 20 °C as melhorias são insignificativas (7%). Contudo aos 200 °C há uma melhoria de 29% nos resultados obtidos e aos 600 °C um aumento de cerca de 62%.

Gesso

Na Figura 5.8 está representado o comportamento em termos de resistência à flexão das várias composições com ligante de gesso estudadas quando submetidas às temperaturas alvo de estudo, sendo que:

- A AR sofre diminuições na sua resistência à flexão logo aos 200 °C, acentuando-se as perdas aos 600 °C.
- A argamassa com PCM tem resistência à flexão inferior à AR, em qualquer valor de temperatura estudado, sendo que a sua resistência diminui também com o aumento da temperatura.
- A argamassa com PCM mais fibras, é a argamassa que obtém resultados inferiores em todos os intervalos de temperatura, sendo que os seus valores diminuem com o aumento da temperatura.

A evolução descrita das perdas de resistência à flexão para cada composição com ligante de gesso pode ser constatada em termos percentuais nas Tabelas 5.10 e 5.11.

- Observando a Tabela 5.10 verifica-se que todas as composições têm perda de resistência à flexão com o aumento da temperatura. Note-se que aos 20 °C a AR têm uma perda de 30% e aos 600 °C uma perda de cerca de 80%. A argamassa com PCM obtém aos 200 °C perdas na ordem dos 50% e aos 600 °C perdas próximas dos 90%. Por fim verifica-se nas argamassas de PCM mais fibras perdas superiores à argamassa de PCM, como já

tinha sido referido, sendo que aos 200 °C apresenta perdas cerca de 60% e aos 600 °C perdas de 94%.

- A Tabela 5.11 permite verificar que nas argamassas com PCM e PCM mais fibras ocorrem perdas superiores de resistência à flexão superiores a 50% logo aos 20 °C, acentuando-se essa diferença com o incremento da temperatura.

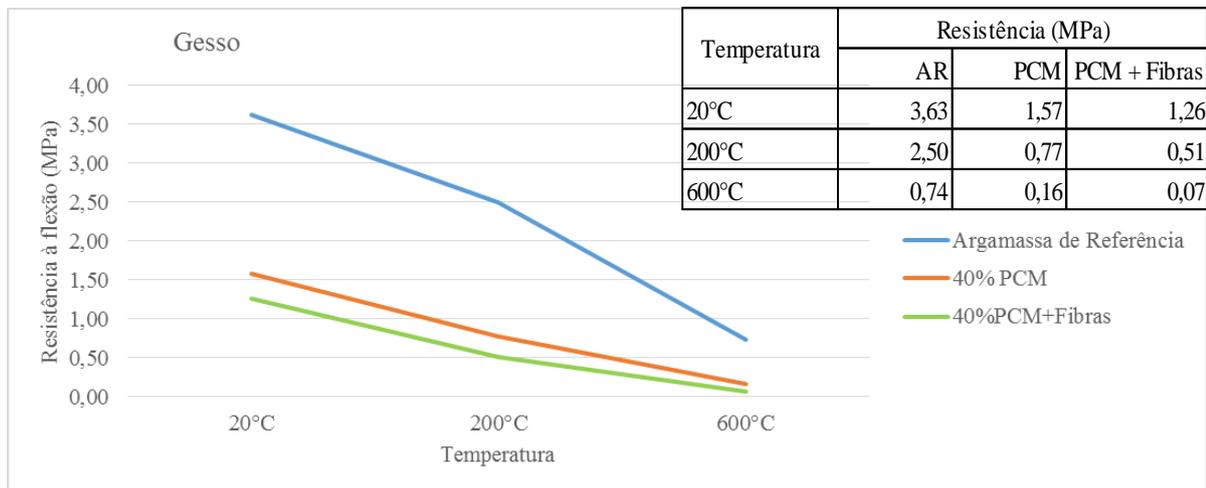


Figura 5.8 – Resistência à flexão das argamassas de gesso submetida a altas temperaturas

Tabela 5.10 – Variação da resistência à flexão ao longo dos valores de temperatura estudadas de cada composição (gesso)

Temperatura	Perda %		
	AR	PCM	PCM + Fibras
20°C	-30,99	-51,18	-59,54
200°C	-79,73	-89,59	-94,37
600°C			

Tabela 5.11 – Variação da resistência das argamassas com PCM ao longo dos valores de temperatura estudadas em relação à argamassa de referência (gesso)

Temperatura	Perda %	
	PCM	PCM + Fibras
20°C	-56,59	-65,39
200°C	-69,28	-79,71
600°C	-77,71	-90,38

Tabela 5.12 – Ganho na resistência à flexão proporcionada pela adição de fibras nas argamassas com PCM (gesso)

Temperatura	Ganho % - fibras
	PCM + Fibras
20°C	-20,28
200°C	-33,94
600°C	-56,83

Pela Tabela 5.12 constata-se que a adição de fibras nas argamassas de gesso que contêm PCM tem um efeito negativo, pois diminuem a sua resistência à flexão. Esse efeito negativo é tanto mais significativo quanto maior for o incremento da temperatura.

Após se analisar o comportamento ligante a ligante apresenta-se na Figura 5.9 o comportamento das argamassas com PCM a altas temperaturas de forma a perceber graficamente as perdas de resistência à flexão com o aumento da temperatura, constatando o comportamento já explicado para cada uma delas, sendo que o ligante de cimento é o que apresenta melhores resultados. A Figura 5.10 representa essa mesma percepção acima referida mas agora para as várias argamassas com PCM mais fibras, verificando-se então que o ligante de cimento é o que apresenta melhores resultados.

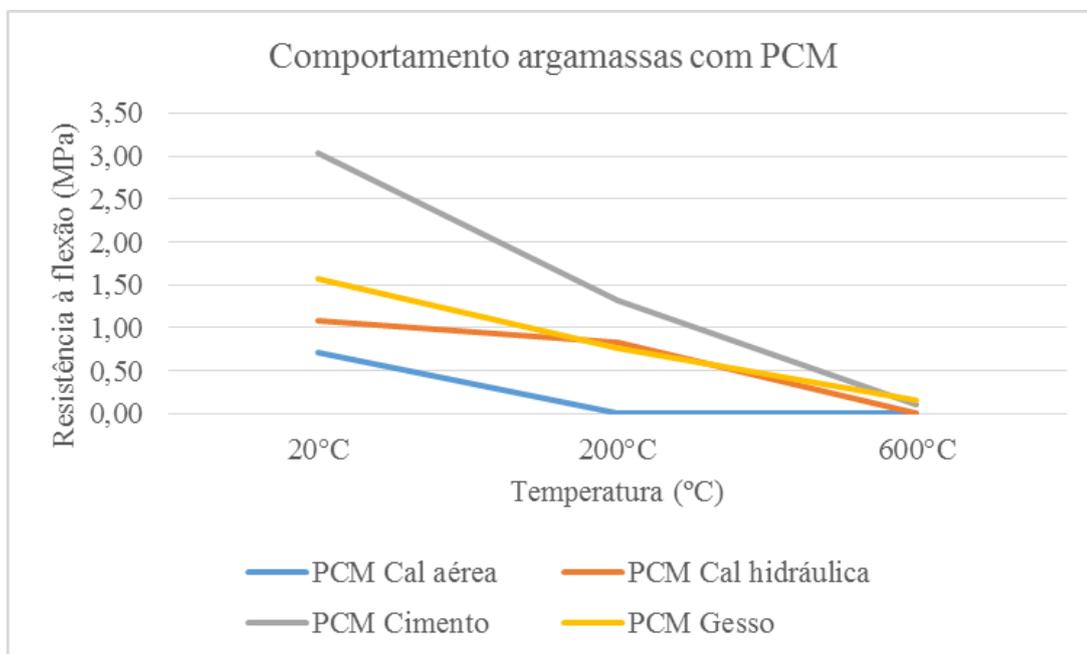


Figura 5.9 – Resistência à flexão a altas temperaturas das argamassas com PCM

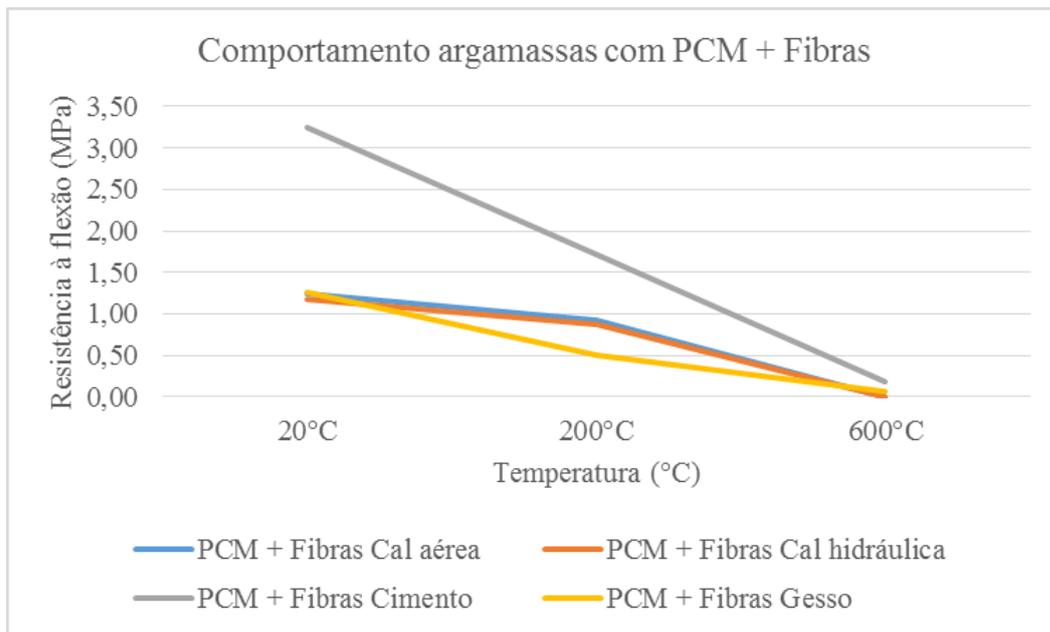


Figura 5.10 – Resistência à flexão a altas temperaturas das argamassas com PCM + Fibras

Após efetuadas todas as análises ao comportamento a altas temperaturas dos vários ligantes e das várias composições alvo de estudo, verifica-se que a resistência à flexão é afetada com o aumento da temperatura, isto é, verifica-se que a mesma diminui.

Aos 200 °C todas as AR, excetuando a AR de gesso, não apresentam uma afetação que seja considerável na sua resistência à flexão, no entanto aos 600 °C verifica-se que a perda é bastante acentuada. A altas temperaturas os materiais constituintes das argamassas dilatam, porém existem incompatibilidades nos coeficientes de dilatação dos mesmos, fazendo com que ocorram microfissuras na própria argamassa (Lion et al, 2005). Estas microfissuras podem também ser provocadas pela alta pressão de vapor interna que se gera nos provetes quando os mesmos são sujeitos a altas temperaturas, além de que se pode desenvolver um gradiente térmico entre as camadas exteriores e interiores dos provetes que conseqüentemente causa fissuras (Yazici et al, 2012). Estas microfissuras reduzem a área resistente das secções transversais, sendo que as tensões de tração provocam a expansão das mesmas diminuindo assim a resistência à flexão das argamassas (Aydin & Baradan, 2007).

No caso das argamassas com PCM verifica-se que aos 20 °C a sua resistência à flexão é inferior à AR, excetuando a de ligante de cal aérea onde a diferença é considerada baixa (7%). Esta diminuição pode ser explicada pelo aumento da quantidade de água nas composições com

adição de PCM, pois a adição deste material faz com que aumente a sua superfície específica, daí se necessitar de mais água. Note-se que o aumento de água e a adição de PCM nas amassaduras aumentam a sua porosidade o que faz com que a sua resistência diminua. Com o aumento da temperatura ocorrem os fenómenos de fissuração descritos na AR, sendo que no caso destas composições os coeficientes de dilatação do material que constitui a parede do PCM (polimérico) tem um coeficiente bastante diferente dos restantes, acentuando as tensões que se geram nos provetes.

Por fim verifica-se que a adição de fibras nas argamassas com PCM proporcionam efeitos na resistência à flexão diferentes consoante o ligante em causa. Assim sendo, no caso da cal aérea, cal hidráulica e cimento verifica-se que ocorre um aumento de resistência à flexão comparando-os com as argamassas que apenas contêm PCM. Salienta-se que na cal aérea esse aumento de resistência é tal que os valores ultrapassam os resultados da AR para a temperatura de 20 °C e 200 °C. Contrariamente ao que ocorre nestes ligantes, no gesso a adição de fibras tem um efeito negativo que faz com que a sua resistência seja inferior à argamassa com PCM. Constata-se que o aumento da temperatura faz diminuir a resistência à flexão nas argamassas com PCM mais fibras, sendo que esta diminuição pode ser explicada pelo que foi descrito nas argamassas com PCM.

5.2 Resistência à compressão

No que respeita à resistência à compressão cada ligante estudado teve um comportamento distinto, assim sendo será apresentado para cada um deles a descrição do que sucedeu. Salienta-se que nos casos em que os provetes ficaram destruídos e impedidos assim de efetuar o ensaio da resistência à compressão assume-se que o seu valor será zero pois os provetes não resistiram às tensões devido ao aumento da temperatura criadas na microestrutura das argamassas (logo o seu valor de resistência à compressão será muito próximo de zero).

Cal aérea

Na Figura 5.11 está representado o comportamento em termos de resistência à compressão das várias composições com ligante de cal aérea estudadas quando submetidas às temperaturas alvo de estudo, verificando-se que:

- A AR de cal aérea sofre um aumento de resistência à compressão aos 200 °C quando comparada com a resistência da mesma aos 20 °C. No entanto aos 600 °C a resistência

da argamassa diminui em comparação aos 200 °C (mas é superior à resistência aos 20°C).

- A argamassa com PCM apenas obtém valor para resistência aos 20 °C, pois como já referido os provetes sujeitos a 200 °C e 600 °C ficaram destruídos. Note-se que aos 20 °C a resistência é semelhante ao valor da AR sendo a diferença entre elas de cerca de 7% (Tabela 5.14).
- A argamassa com PCM mais fibras regista a 20 °C resultados superiores às outras duas composições, porém aos 200 °C a sua resistência mantém-se superior à argamassa com PCM (que ficou destruída) mas o seu valor é semelhante com o obtido na AR (diferença inferior a 10%, Tabela 5.14). Aos 600 °C os provetes ficaram destruídos. Note-se que a mesma regista sempre uma perda de resistência com o aumento da temperatura.

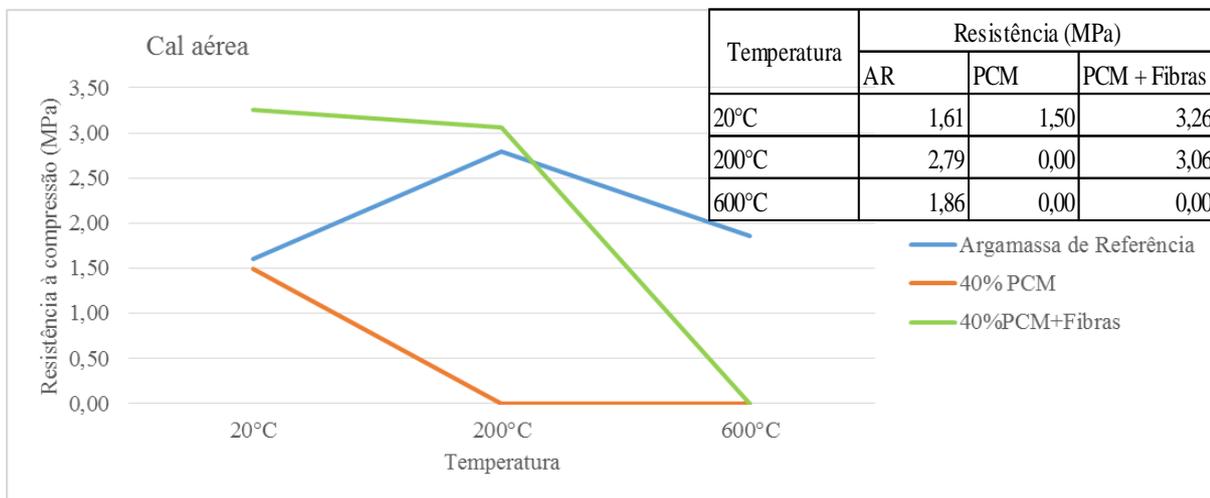


Figura 5.11 – Resistência à compressão das argamassas de cal aérea submetida a altas temperaturas

Os comportamentos descritos acima podem ser observados em termos percentuais também nas Tabelas 5.13 e 5.14.

- Verifica-se então na Tabela 5.13 que a AR ganha resistência aos 200 °C, sendo esse aumento de cerca de 73% quando comparada com a resistência aos 20 °C. Aos 600 °C verifica-se que a AR continua com a sua resistência à compressão superior aos resultados obtidos aos 20 °C, no entanto neste caso será de apenas 15%. No que refere à argamassa com PCM, verifica-se que os provetes como ficaram destruídos, têm perda total da sua resistência à compressão aos 200 °C e 600 °C. Por fim, a argamassa de PCM mais fibras apresenta uma quebra insignificativa na sua resistência à compressão aos 200 °C (cerca de 6%), contudo aos 600 °C ocorreu a perda total da mesma.

- Na Tabela 5.14 constata-se que a argamassa com PCM tem resistência à compressão semelhante à AR para a temperatura de 20 °C sendo a diferença entre ambas de cerca de 7%. Porém verifica-se que nas restantes gamas de temperatura estudadas que a diferença entre ambas é de 100% pois os provetes deste tipo de composição ficaram destruídos. No caso da argamassa com PCM mais fibras a sua resistência à compressão sofre um incremento superior a 100% quando comparada com a AR aos 20 °C. Aos 200 °C as diferenças de resistência à compressão entre esta composição e a AR é inferior a 10%. Note-se que aos 600 °C a perda é de 100%, pois os provetes destruíram-se.

Pela Tabela 5.15 verifica-se o efeito que a adição de fibras proporcionou na resistência à compressão das argamassas de cal aérea com PCM, sendo que aos 20 °C há um aumento na ordem dos 118% e aos 200 °C um aumento de 100%, pois os provetes que apenas continham PCM ficaram destruídos e os que tinha adição de fibras não. Aos 600 °C não permite tirar conclusão alguma pois os provetes de ambas as composições ficaram destruídos.

Tabela 5.13 – Variação da resistência à compressão ao longo dos valores de temperaturas estudadas de cada composição (cal aérea)

Temperatura	Perda %		
	AR	PCM	PCM + Fibras
20°C	73,41	-100	-6,22
200°C			
20°C	15,49	-100	-100
600°C			

Tabela 5.14 – Variação da resistência à compressão das argamassas com PCM ao longo dos valores de temperaturas estudadas em relação à argamassa de referência (cal aérea)

Temperatura	Perda %	
	PCM	PCM + Fibras
20°C	-6,83	102,73
200°C	-100	9,63
600°C	-100	-100

Tabela 5.15 – Ganho na resistência à compressão proporcionada pela adição de fibras nas argamassas com PCM (cal aérea)

Temperatura	Ganho % - fibras
	PCM + Fibras
20°C	117,59
200°C	100
600°C	-----

Cal hidráulica

Na Figura 5.12 está representado o comportamento em termos de resistência à compressão das várias composições com ligante de cal hidráulica estudadas quando submetidas às temperaturas alvo de estudo, sendo que:

- Verifica-se então que a AR sofre um aumento de resistência à compressão aos 200 °C e uma perda acentuada aos 600 °C, quando comparada com a resistência que a mesma obteve aos 20 °C.
- A argamassa com PCM apresenta valores de resistência à compressão inferiores à AR para todas as gamas de temperaturas estudadas. Note-se que resistência da mesma diminui com o aumento da temperatura
- A argamassa com PCM mais fibras apresenta resultados superiores à argamassa com PCM, no entanto são inferiores à AR, sendo que mais uma vez a sua resistência diminui com o aumento da temperatura.

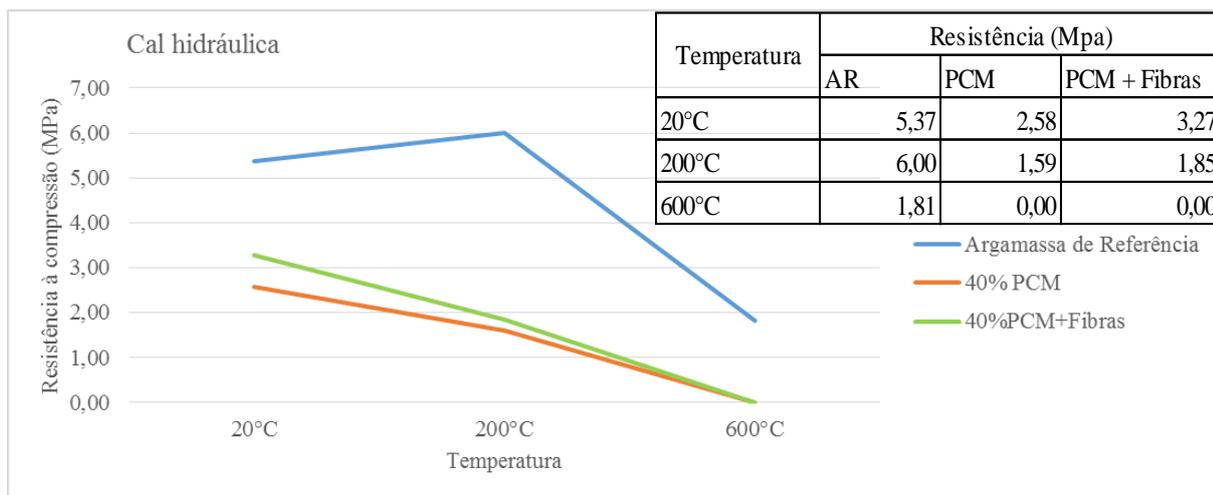


Figura 5.12 - Resistência à compressão das argamassas de cal hidráulica submetida a altas temperaturas

A evolução de em termos percentuais do descrito acima pode ser verificada nas Tabelas 5.16 e 5.17.

- Pelo que se pode confirmar na Tabela 5.16 a AR sofre um aumento de resistência à compressão aos 200 °C de cerca de 11% quando se compara com o valor obtidos aos 20 °C. No entanto aos 600 °C a resistência à compressão tem uma quebra de cerca de 66%. A argamassa com PCM sofre uma quebra na sua resistência à compressão com o

aumento da temperatura, sendo que aos 200 °C a quebra é de cerca de 38% e aos 600 °C a perda é de 100% pois os provetes ficaram destruídos. No caso da argamassa com PCM mais fibras ocorre o mesmo que nas argamassas com PCM, no entanto aos 200 °C a perda de resistência é de 43%.

- Pela Tabela 5.17 constata-se que as argamassas de PCM e PCM mais fibras têm em qualquer gama de temperatura uma quebra na sua resistência à compressão quando comparados com a AR, sendo essa quebra menos acentuada na composição com adição de fibras.

Pela Tabela 5.18 verifica-se que a adição de fibras na argamassa com PCM proporcionou um aumento na resistência à compressão das mesmas, sendo que aos 20 °C há um aumento na ordem dos 27% e aos 200 °C um aumento de 16%. Aos 600 °C não permite tirar conclusão alguma pois os provetes de ambas as composições ficaram destruídos.

Tabela 5.16 – Variação da resistência à compressão ao longo dos valores de temperaturas estudadas de cada composição (cal hidráulica)

Temperatura	Perda %		
	AR	PCM	PCM + Fibras
20°C			
200°C	11,67	-38,12	-43,37
20°C			
600°C	-66,30	-100	-100

Tabela 5.17 – Variação da resistência à compressão das argamassas com PCM ao longo dos valores de temperaturas estudadas em relação à argamassa de referência (cal hidráulica)

Temperatura	Perda %	
	PCM	PCM + Fibras
20°C	-52,06	-39,06
200°C	-73,43	-69,09
600°C	-100	-100

Tabela 5.18 – Ganho na resistência à compressão proporcionada pela adição de fibras nas argamassas com PCM (cal hidráulica)

Temperatura	Ganho % - fibras
	PCM + Fibras
20°C	27,12
200°C	16,34
600°C	-----

Cimento

Na Figura 5.13 está representado o comportamento em termos de resistência à compressão das várias composições com ligante de cimento estudadas quando submetidas às temperaturas alvo de estudo, verificando-se que:

- Na AR a resistência à compressão diminui com o aumento da temperatura.
- Na argamassa com PCM as suas resistências à compressão são inferiores em todas as gamas de temperatura alvo de estudo
- Na argamassa com PCM mais fibras os valores de resistência à compressão são superiores à argamassa com PCM (ganhos superiores a 27%, Tabela 5.21) mas ainda assim inferiores à AR.

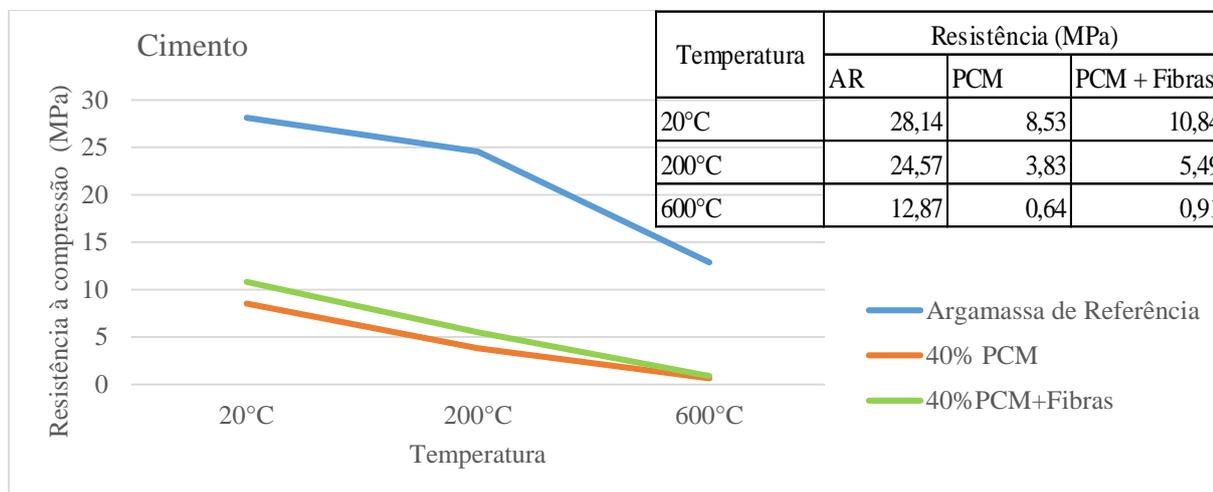


Figura 5.13 – Resistência à compressão das argamassas de cimento submetida a altas temperaturas

Os comportamentos descritos podem ser verificados de forma percentual nas Tabelas 5.19 e 5.20:

- A Tabela 5.19 demonstra que a AR tem uma perda de resistência aos 200 °C de cerca de 12% e aos 600 °C de 54%. Por sua vez as restantes argamassas com adição de PCM e PCM mais fibras, têm perdas de resistência à compressão aos 200 °C na ordem dos 55% e 49% respetivamente. No entanto aos 600 °C ambas obtêm perdas de cerca de 92% na sua resistência.
- Pela Tabela 5.20 verifica-se que ambas as composições que contêm PCM têm uma perda de resistência à compressão quando comparadas com a AR, rondando essas perdas o valor de 70% e 61% aos 20 °C para as argamassas com PCM e PCM mais fibras,

respetivamente. Aos 200 °C as perdas passam para os 84% e 77% e aos 600 °C rondam os 95% e 93%.

Tabela 5.19 – Variação da resistência à compressão ao longo dos valores de temperaturas estudadas de cada composição (cimento)

Temperatura	Perda %		
	AR	PCM	PCM + Fibras
20°C			
200°C	-12,70	-55,13	-49,31
20°C			
600°C	-54,27	-92,49	-91,62

Tabela 5.20 – Variação da resistência à compressão das argamassas com PCM ao longo dos valores de temperaturas estudadas em relação à argamassa de referência (cimento)

Temperatura	Perda %	
	PCM	PCM + Fibras
20°C	-69,70	-61,50
200°C	-84,43	-77,64
600°C	-95,03	-92,94

Tabela 5.21 – Ganho na resistência à compressão proporcionada pela adição de fibras nas argamassas com PCM (cimento)

Temperatura	Ganho % - fibras
	PCM + Fibras
20°C	27,08
200°C	43,57
600°C	41,88

A Tabela 5.21 demonstra que a adição de fibras na argamassa com PCM proporcionou um aumento na resistência à compressão, sendo que aos 20 °C há um aumento na ordem dos 27%, aos 200 °C um aumento de 44% e aos 600 °C um aumento de cerca de 41%.

Gesso

Na Figura 5.14 está representado o comportamento em termos de resistência à compressão que as várias composições com ligante de gesso obtiveram quando submetidas às temperaturas alvo de estudo, sendo que:

- A AR diminui a sua resistência com o aumento da temperatura.

Resistência a Altas Temperaturas de Argamassas Com Incorporação de Materiais de Mudança de Fase (PCM)

- A argamassa com PCM apresenta valores de resistência à compressão em todas as gamas de temperatura inferiores aos obtidos na AR, sendo que a sua resistência diminui com o aumento da temperatura.
- A argamassa com PCM mais fibras obtém valores de resistência à compressão inferiores quer à AR quer à argamassa com PCM, sendo que a sua resistência também diminui com o aumento da temperatura.

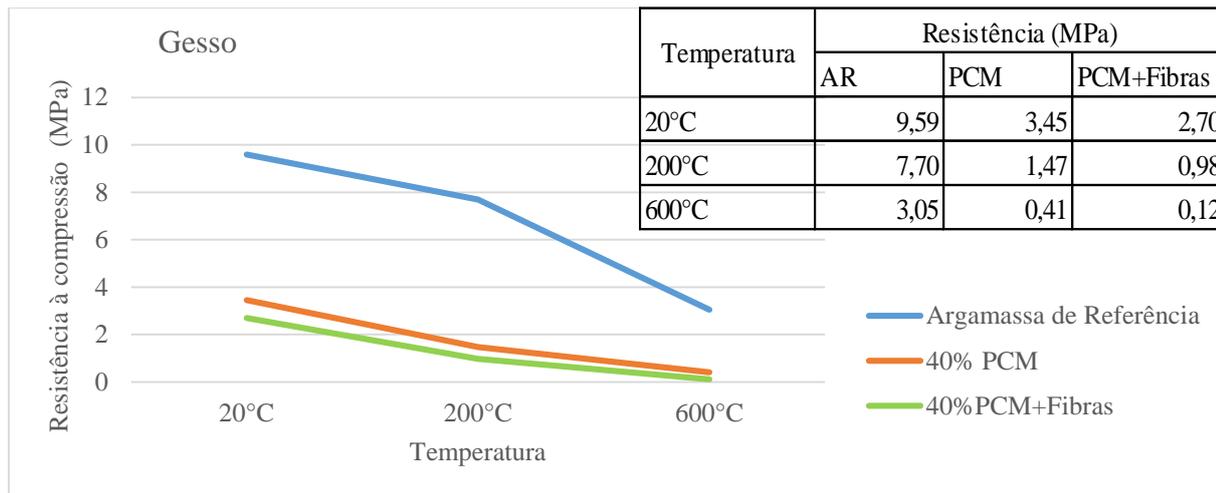


Figura 5.14 – Resistência à compressão das argamassas de gesso submetida a altas temperaturas

Pelas Tabelas 5.22 e 5.23 pode-se verificar o comportamento descrito em termos percentuais.

- Verifica-se pela Tabela 5.22 que a AR tem perdas na ordem dos 19% aos 200 °C e de 68% aos 600 °C quando comparados os resultados de resistência à compressão obtidos aos 20 °C. A argamassa com PCM demonstra perdas com o aumento da temperatura, na ordem dos 57% aos 200 °C e perdas de 88% aos 600 °C. A argamassa com PCM aos 200 °C apresenta perdas de cerca de 63% e aos 600 °C perdas de cerca de 95%.
- A Tabela 5.23 permite constatar que as perdas de resistência à compressão das argamassas com PCM mais fibras são superiores do que na argamassa com PCM quando comparadas com a AR. Note-se que em todas as gamas de temperatura a diferença entre ambas e a AR ultrapassa os 50%.

Tabela 5.22 – Variação da resistência à compressão ao longo dos valores de temperaturas estudadas de cada composição (gesso)

Temperatura	Perda %		
	AR	PCM	PCM + Fibras
20°C	-19,74	-57,41	-63,85
200°C	-68,25	-88,03	-95,68
600°C			

Tabela 5.23 – Variação da resistência à compressão das argamassas com PCM ao longo dos valores de temperaturas estudadas em relação à argamassa de referência (gesso)

Temperatura	Perda %	
	PCM	PCM + Fibras
20°C	-64,06	-71,86
200°C	-80,93	-87,32
600°C	-86,45	-96,17

Tabela 5.24 – Ganho na resistência à compressão proporcionada pela adição de fibras nas argamassas com PCM (gesso)

Temperatura	Ganho % - fibras
	PCM + Fibras
20°C	-21,70
200°C	-33,54
600°C	-71,74

A Tabela 5.24 mostra que a adição de fibras na argamassa de gesso com PCM tem um efeito negativo, pois em todos os valores de temperatura estudados existem perdas superiores a 20% na sua resistência à compressão.

Após se analisar o comportamento ligante a ligante apresenta-se na Figura 5.15 o comportamento das argamassas com PCM a altas temperaturas de forma a perceber graficamente as perdas de resistência à compressão com o aumento da temperatura, constatando o comportamento já explicado para cada uma delas. A Figura 5.16 representa essa mesma percepção acima referida mas agora para as várias argamassas com PCM mais fibras.

Após efetuadas todas as análises ao comportamento a altas temperaturas dos vários ligantes e das várias composições alvo de estudo, verifica-se que a resistência à compressão é afetada de forma diferente para cada um deles com o aumento da temperatura.

Aos 200 °C no caso das AR verifica-se que nos ligantes de cal aérea e cal hidráulica ocorre um aumento de resistência aos 200 °C, no entanto aos 600 °C a resistência diminui. Note-se que para perceber este aumento, interessa perceber o processo de cura destes tipos de ligantes (Kanan, 2008), sendo que no caso da cal aérea o processo de cura faz-se por carbonatação e ocorre em 2 fases:

- Primeira a fase onde ocorre a evaporação da água da mistura, o que resulta numa contração do volume da argamassa;
- Segunda fase, que é uma reação lenta do dióxido de carbono com cal hidratada, onde se origina carbonato de cálcio que por sua vez irá aumentar a resistência mecânica da argamassa.

No caso da cal hidráulica a cura acontece em 2 fases também no entanto são diferentes da cal aérea, sendo:

- Numa primeira fase a cal hidráulica sofre uma rápida reação de hidratação dos seus compostos hidráulicos com a água;
- Numa segunda fase sofre carbonatação, que tal como no caso da cal aérea é uma reação lenta.

Como referido a cura é um processo lento, no entanto com o aumento da temperatura esse processo é acelerado, o que faz com que aos 200 °C os valores de resistência sejam mais elevados. No entanto aos 600 °C a resistência diminui pois o aumento de temperatura para valores mais elevadas faz com que os processos referenciados na explicação de perda de resistência à flexão sejam mais acentuados e a degradação dos provetes provoca a diminuição da sua resistência.

As restantes AR onde o ligante é gesso e cimento, apresentam perdas logo aos 200 °C, pois o processo que lhes dá resistência é diferente do acima mencionado. Segundo Lion et al, (2005) as modificações micro estruturais nas argamassas de cimento, ocorrem devido à perda de água proporcionado pelo aumento da temperatura. Este facto juntando aos processos referidos na perda de resistência à flexão, fazem com que a resistência à compressão diminua, acetuando-se os efeitos quando a temperatura é elevada. Note-se que aos 600 °C podem mesmo começar a ocorrer processos de desidratação dos ligantes (Morales et all, 2011) agravando ainda mais as perdas de resistência.

No caso das argamassas com PCM verifica-se que aos 20 °C a sua resistência à flexão é inferior à AR, excetuando a de ligante de cal aérea onde a diferença é considerada baixa (cerca de 7%).

Resistência a Altas Temperaturas de Argamassas Com Incorporação de Materiais de Mudança de Fase (PCM)

Verifica-se também que a sua resistência diminui com o aumento de temperatura. Todas estas conclusões explicam-se pelos mesmos motivos que foram referenciados na justificação da resistência à flexão.

Por fim verifica-se que a adição de fibras nas argamassas com PCM proporcionam efeitos positivos na resistência à compressão dos vários ligantes, excetuando o gesso onde a resistência diminui. Salienta-se que na cal aérea esse aumento de resistência é tal que os valores ultrapassam os resultados da AR para a temperatura de 20 °C e 200 °C. Em termos do efeito na resistência à compressão que o aumento da temperatura tem nas argamassas com PCM mais fibras, verifica-se que estas sofrem uma diminuição da mesma. Este fenómeno pode ser explicado pelo que foi descrito na justificação da sua resistência à flexão.

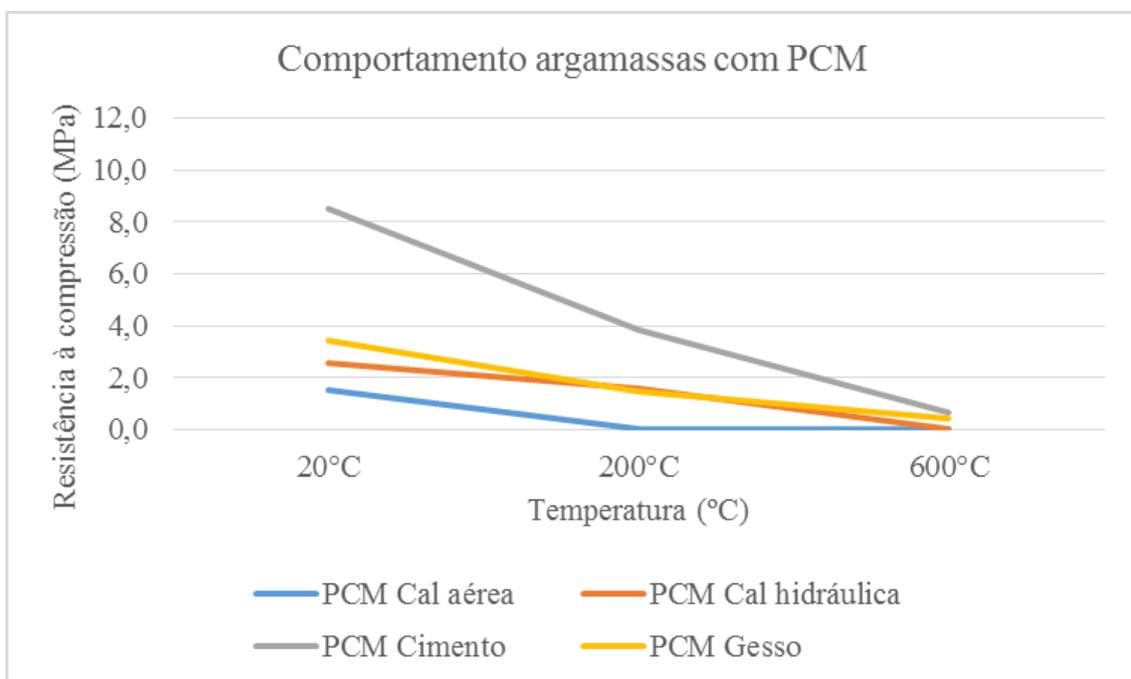


Figura 5.15 – Resistência à compressão a altas temperaturas das argamassas com PCM

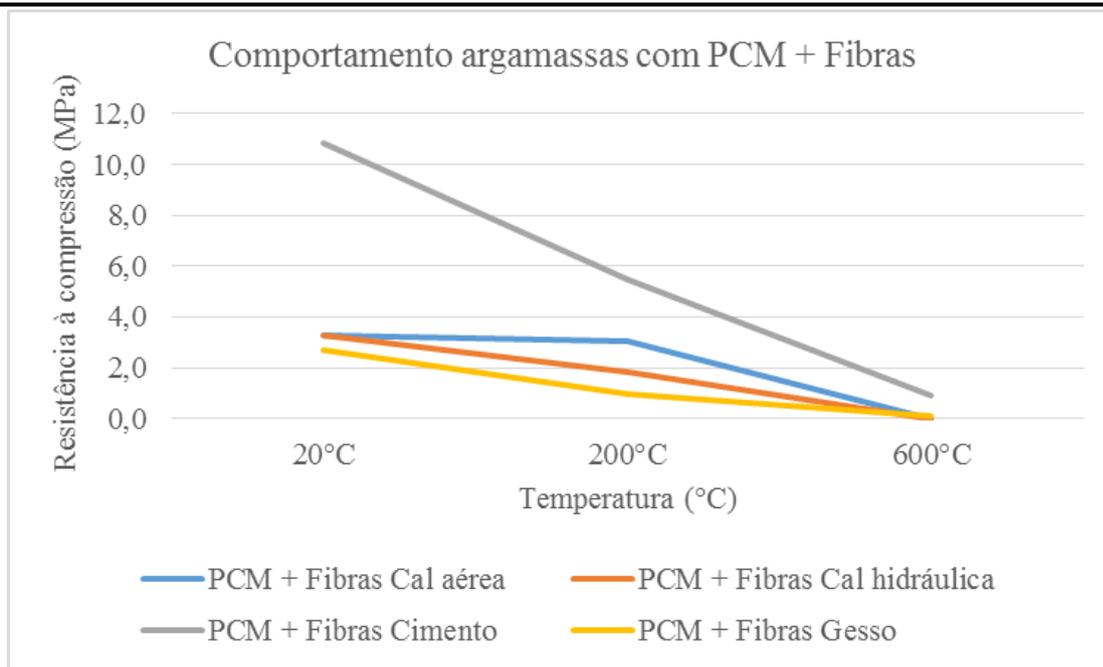


Figura 5.16 – Resistência à compressão a altas temperaturas das argamassas com PCM + Fibras

5.2.1 Classe de resistência das argamassas

Apresenta-se de seguida a classificação das propriedades das argamassas endurecidas conforme a norma NP EN 998-1:2010. Salienta-se que as classificações são dadas tendo em conta os resultados obtidos na resistência à compressão.

Na Tabela 5.25 mostra quais as classificações obtidas para a temperatura de 20 °C para cada composição estudada. No caso da cal aérea a mesma mantém sempre a classificação de CSII para qualquer composição. No caso da cal hidráulica verifica-se que a AR obtém uma classificação de CSIII enquanto as composições com PCM e PCM mais fibras obtém classificação de CSII. No caso do cimento constata-se que a classificação é igual para todas as composições, obtendo o máximo de classificação possível que a normativa apresenta, sendo de CSIV. Por fim as argamassas que tem como ligante gesso, são as mais afetadas pela junção de PCM e PCM mais fibras na sua composição, uma vez que a AR obtém classificação de CSIV enquanto as restantes composições obtém a classificação de CSII.

Na Tabela 5.26 evidencia-se quais as classificações alcançadas para a temperatura de 200 °C para cada composição alvo de estudo. Na cal aérea verifica-se que a mesma obtém para a AR e argamassa com PCM mais fibras, a classificação de CSII (igual à obtida aos 20 °C), sendo que

a argamassa com PCM não obtém classificação pois os seus provetes ficaram destruídos, como já referido. A cal hidráulica verifica para a AR um aumento na sua classe resistente de CSIII (obtida aos 20 °C) para CSIV, enquanto as restantes composições deste ligante mantêm a classificação de CSII (igual ao valor alcançado aos 20 °C). No caso do ligante de cimento, verifica-se que a AR manteve a classificação de CSIV enquanto as restantes composições deste ligante viram reduzida a sua classificação de CSIV (aos 20 °C) para CSIII. Por fim a argamassa onde o ligante é o gesso tem para a sua AR a mesma classificação obtida aos 20 °C, isto é, mantem-se como sendo uma argamassa CSIV, enquanto as restantes composições deste ligante diminuem a sua classificação de CSII (aos 20 °C) para CSI.

Por fim na Tabela 5.27 estão visíveis as classificações resistentes que as composições estudadas alcançaram quando submetidas a uma temperatura de 600 °C. No caso do ligante de cal aérea apenas a AR manteve a classificação de CSII, sendo que as outras composições ficaram destruídas. No caso do ligante de cal hidráulica verifica-se para a AR uma quebra da classe resistente de CSIV para CSII, sendo que as restantes composições deste ligante ficaram destruídas. No caso do cimento constata-se que para a AR a classificação não se altera sendo de CSIV, no entanto as composições com PCM e PCM mais fibras têm uma quebra na sua classificação passando a ser CSI. Por fim as composições com ligante de gesso apresentam para a AR uma descida na sua classificação resistente passando a ter a classificação de CSII, a argamassa com PCM continua a ter a classificação de CSI e por fim a argamassa com PCM mais fibras, apesar de não se ter destruído, apresenta valores de resistência muito baixo não obtendo qualquer classificação.

Resistência a Altas Temperaturas de Argamassas Com Incorporação de Materiais de Mudança de Fase (PCM)

Tabela 5.25 – Classes de resistência (NP EN 998-1,2010) para a temperatura 20 °C

Temperatura	Ligante	%PCM	Resistencia à Compressão (MPa)	Classe de resistência (NP EN 998-12010)
20°C	Cal-Aérea	0	1,61	CS II
		40	1,50	CS II
		40 + Fibras	3,26	CS II
	Cal-Hidráulica	0	5,37	CS III
		40	2,58	CS II
		40 + Fibras	3,27	CS II
	Cimento	0	28,14	CS IV
		40	8,53	CS IV
		40 + Fibras	10,84	CS IV
	Gesso	0	9,59	CS IV
		40	3,45	CS II
		40 + Fibras	2,70	CS II

Tabela 5.26 – Classes de resistência (NP EN 998-1,2010) para a temperatura 200 °C

Temperatura	Ligante	%PCM	Resistencia à Compressão (MPa)	Classe de resistência (NP EN 998-12010)
200°C	Cal-Aérea	0	2,79	CS II
		40	0,00	
		40 + Fibras	3,06	CS II
	Cal-Hidráulica	0	6,00	CS IV
		40	1,59	CS II
		40 + Fibras	1,85	CSII
	Cimento	0	24,57	CS IV
		40	3,83	CS III
		40 + Fibras	5,49	CS III
	Gesso	0	7,70	CS IV
		40	1,47	CS I
		40 + Fibras	0,98	CS I

Tabela 5.27 – Classes de resistência (NP EN 998-1,2010) para a temperatura 600 °C

Temperatura	Ligante	%PCM	Resistencia à Compressão (MPa)	Classe de resistência (NP EN 998-12010)
600°C	Cal-Aérea	0	1,86	CS II
		40	0,00	
		40 + Fibras	0,00	
	Cal-Hidráulica	0	1,81	CS II
		40	0,00	
		40 + Fibras	0,00	
	Cimento	0	12,87	CS IV
		40	0,64	CS I
		40 + Fibras	0,91	CS I
	Gesso	0	3,05	CS II
		40	0,41	CS I
		40 + Fibras	0,12	Sem classificação

5.3 Resistência à aderência por tração

No que respeita à resistência à aderência das composições alvo de estudo, todas tiveram o mesmo comportamento, isto é, apesar de obterem como é normal valores diferentes entre composições, todas elas registaram valores superiores nas argamassas de referência quando comparadas com as argamassas com PCM mais fibras em qualquer temperatura alvo de estudo. No entanto posteriormente será visto para cada composição de que forma as mesmas romperam no ensaio de aderência. Verifica-se também que em todas as composições o aumento da temperatura diminui a sua resistência, sendo que este facto pode ser explicado pela diferença de coeficientes de dilatação térmica que as argamassas têm em relação ao tijolo. Note-se que o aumento de temperatura irá aumentar a dilatação dos materiais constituintes das argamassas, que fica impedida de expandir pela aderência da mesma ao tijolo, aumentando assim a tensão substrato/argamassa. Essa tensão juntamente com a perda de água que evapora com o aumento da temperatura diminui a aderência da argamassa junto do tijolo.

As Figuras 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20 mostram o comportamento acima referido.

Resistência a Altas Temperaturas de Argamassas Com Incorporação de Materiais de Mudança de Fase (PCM)

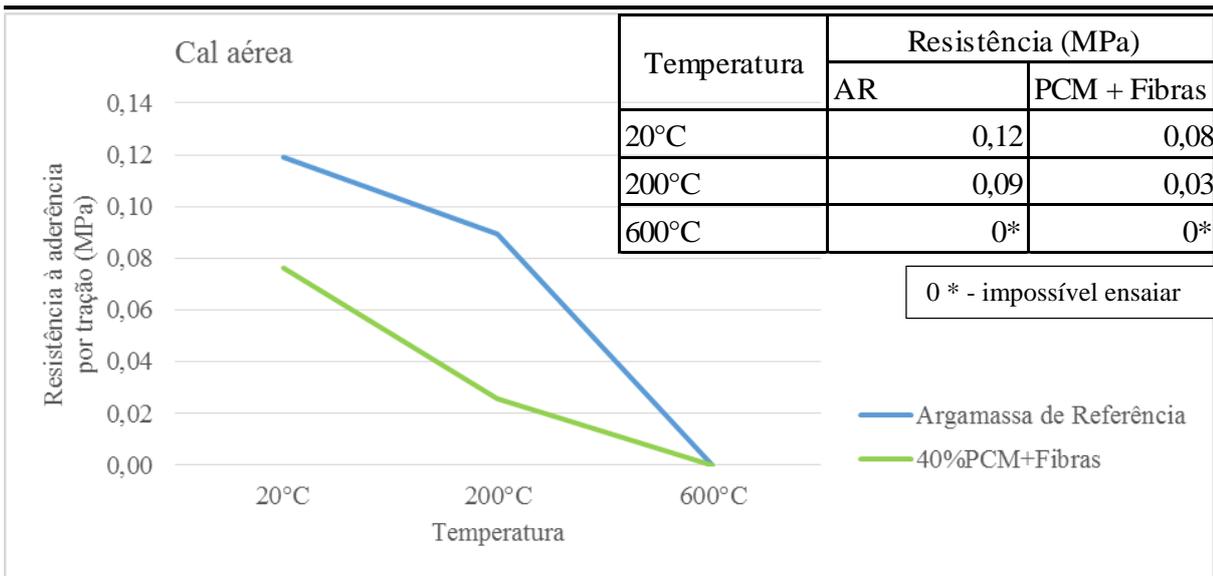


Figura 5.17 – Resistência à aderência por tração das argamassas de cal aérea submetida a altas temperaturas

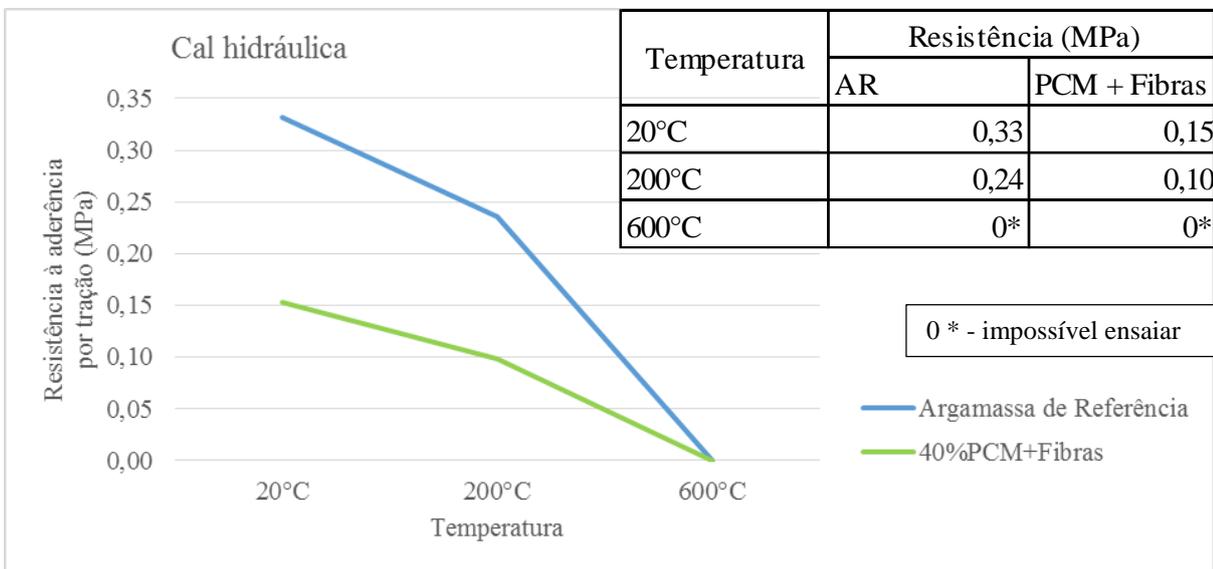


Figura 5.18 – Resistência à aderência por tração das argamassas de cal hidráulica submetida a altas temperaturas

Resistência a Altas Temperaturas de Argamassas Com Incorporação de Materiais de Mudança de Fase (PCM)

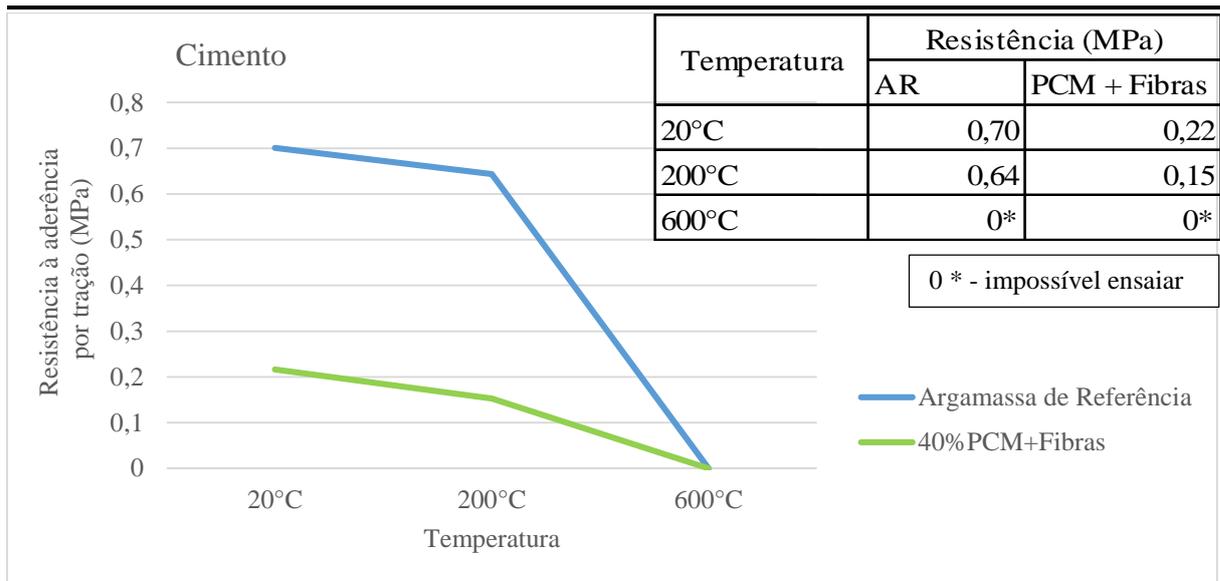


Figura 5. 5.19 – Resistência à aderência por tração das argamassas de cimento submetida a altas temperaturas

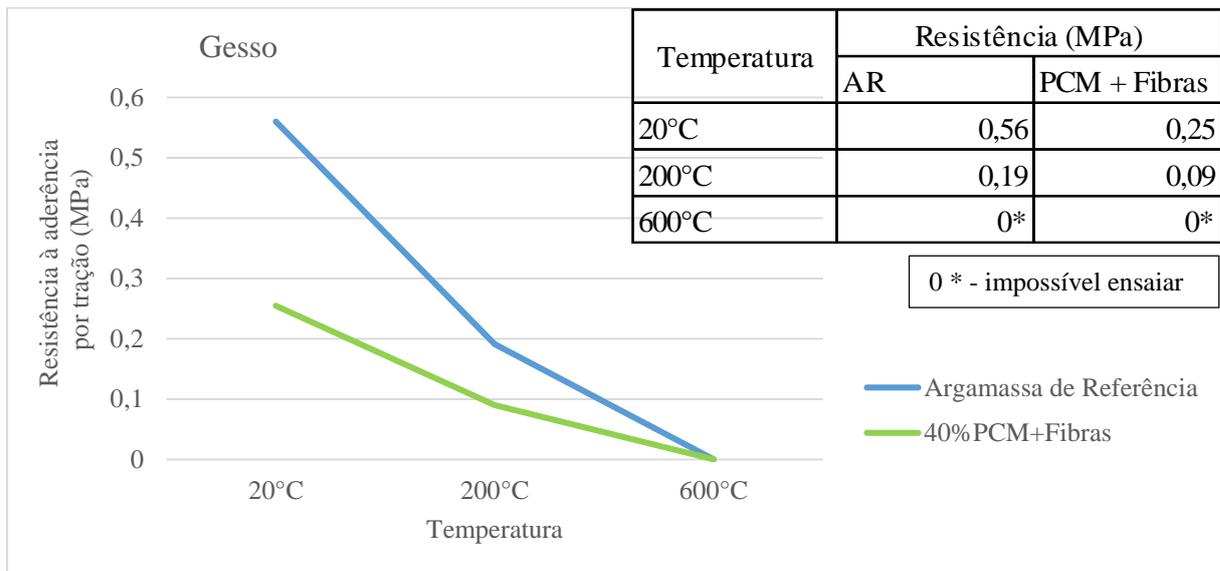


Figura 5.20 – Resistência à aderência por tração das argamassas de gesso submetida a altas temperaturas

De salientar que aos 600 °C não foi possível obter qualquer valor de resistência pois as argamassas ficaram de tal forma degradadas que tornou impossível o seu ensaio, conforme se pode verificar na Figura 5.21.



a) Argamassa de cimento + PCM + fibras



b) Argamassa de cimento



c) Argamassa de gesso + PCM + fibras



d) Argamassa de gesso



e) Argamassa de cal aérea + PCM + fibras



f) Argamassa de cal aérea



g) Argamassa de cal hidráulica + PCM + fibras



h) Argamassa de cal hidráulica

Figura 5.21 – Argamassas estudadas e aplicadas no tijolo submetidas a 600 °C

Relatados os resultados numéricos do ensaio à aderência, interessa também perceber por onde a argamassa rompeu a ligação com o tijolo.

No caso da cal aérea tanto na AR como na argamassa com PCM mais fibras verifica-se que as mesmas romperam na ligação tijolo argamassa conforme se verifica na Figura 5.22, logo segundo a norma EN 1015-12:2000, o valor da resistência é o obtido no ensaio.

No que se refere à argamassa de cal hidráulica ambas as composições (AR e PCM mais fibras) romperam pela argamassa (Figura 5.23), o que significa segundo a norma EN 1015-12, que a resistência à aderência é superior ao valor registado

As argamassas de cimento por sua vez romperam de forma diferente sendo que a AR rompeu pelo tijolo (Figura 5.24), logo segundo a norma EN 1015-12 o valor registado é superior à resistência do tijolo. Por sua vez a argamassa com PCM mais fibras rompeu pela argamassa (Figura 5.24), o que revela que a mesma segundo a norma EN 1015-12, tem uma resistência à aderência superior ao registado.

Por fim as argamassas de gesso conforme se verifica na Figura 5.25 têm um comportamento um pouco diferente entre a AR e a argamassa com PCM mais fibras, isto é, a AR apesar de romper pela ligação ao tijolo, tem partes que arrancaram fragmentos de tijolo, o que leva a crer que a sua resistência à aderência poderá ser próxima da do tijolo. Por sua vez a argamassa com PCM mais fibras rompe pela ligação da argamassa ao tijolo o que permite concluir segundo a norma EN 1015-12, que a resistência da mesma é superior aos valores registados.

A Figura 5.26 permite verificar e comparar os resultados obtidos da resistência à aderência por tração de todas as composições alvo de estudo que continham PCM mais fibras, podendo-se verificar que à temperatura de 20 °C a argamassa com maior aderência é a de ligante de gesso. No entanto aos 200 °C verifica-se que agora a argamassa de ligante de cimento é a que apresenta melhores resultados, sendo que aos 600 °C a resistência é nula para todas as composições pois as amostras ficaram destruídas conforme já indicado. Salienta-se que a argamassa de cal aérea é a que apresenta em todas as gamas de temperatura piores resultados.



Figura 5.22 – Rompimento da argamassa Cal aérea + PCM + fibras e Cal aérea



Figura 5.23 – Rompimento da argamassa Cal hidráulica + PCM + fibras e Cal hidráulica



Figura 5.24 – Rompimento da argamassa Cimento + PCM + fibras e Cimento



Figura 5.25 – Rompimento da argamassa Gesso + PCM + fibras e Gesso

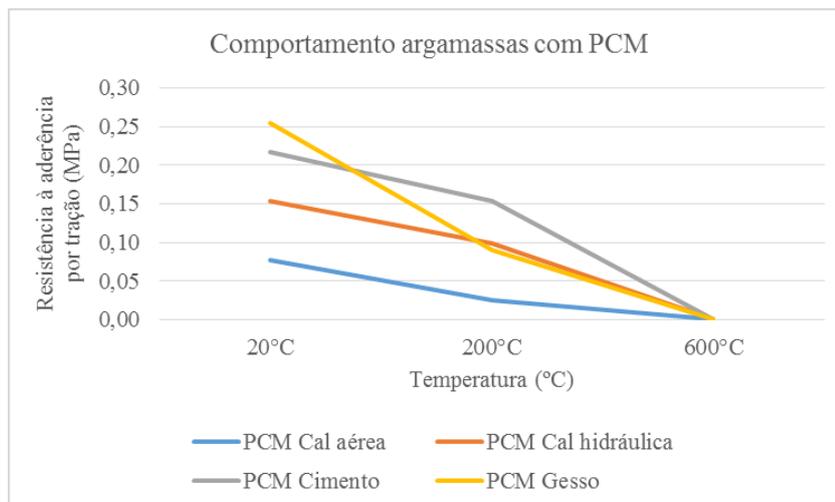


Figura 5.26 – Resistência à aderência por tração a altas temperaturas das argamassas com PCM + Fibras

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo apresentam-se as conclusões do trabalho executado e também perspectivas de trabalhos futuros que poderão ser executados.

6.1 Conclusão

O principal objetivo desta dissertação era perceber qual o comportamento em termos de resistência mecânica de argamassas com incorporação de materiais de mudança de fase sujeitas a altas temperaturas. Note-se que as mesmas serão usadas como argamassas de revestimento interior.

Depois de analisados todos os dados referentes aos ensaios a que as argamassas foram sujeitas podem-se tirar algumas conclusões relativas ao efeito que a incorporação dos materiais referidos tem no comportamento mecânico das argamassas, sendo elas:

- Em termos de gerais verifica-se que a adição de PCM nas argamassas diminui a sua resistência mecânica em todas as gamas de temperatura estudadas, comparando com a argamassa de referência, sendo que a redução varia consoante o ligante em causa. Note-se que a adição de fibras na maioria dos casos melhora o comportamento das argamassas excetuando no caso onde o ligante é o gesso.
- O efeito de deterioração das temperaturas elevadas sobre a resistência à flexão das amostras de argamassas alvo de estudo foi mais grave do que na resistência à compressão.
- Aos 20 °C a classe de resistência das argamassas com PCM e PCM mais fibras não se altera quando comparada com a argamassa de referência, excetuando as argamassas onde o ligante é o cimento, pois as mesmas sofrem uma diminuição na sua classe resistente. Porém o aumento de temperatura aos 200 °C faz com que ocorram diminuições da classe resistente das argamassas, acentuando-se essa diminuição aos 600 °C.
- Verifica-se que a altas temperaturas as argamassas com ligante de cal aérea são as que mais deterioração sofrem com a adição de PCM, levando mesmo à destruição dos provetes, quando sujeitos a 200 °C. Porém são nestas argamassas que a adição de fibras na composição que contém PCM onde se verificam melhorias mais significativas.

- Em termos de resistência à aderência por tração as argamassas com PCM mais fibras, apesar de obterem uma resistência inferior, têm um comportamento semelhante na forma de rotura comparando com a argamassa de referência. Aos 200 °C em todos os casos a resistência diminui, sendo que aos 600 °C todas as composições ficaram destruídas.

6.2 Trabalhos futuros

Para que se perceba se é viável a comercialização e colocação no mercado deste tipo de argamassas, seria importante perceber um pouco mais das mesmas. Desta forma, apresentam-se alguns possíveis temas de trabalho que futuramente se poderão levar a cabo.

Será importante fazer uma análise do ciclo de vida do material de mudança de fase utilizado, de forma a perceber qual o impacto ambiental que o mesmo terá. Dentro deste assunto será interessante executar um estudo económico de forma a perceber se é viável e sustentável a comercialização destas argamassas, onde poderá estar incluído um estudo de mercado de forma a perceber qual a predisposição de adesão a este produto.

Seria interessante estudar a adição de materiais que permitissem dar cor à argamassa, melhorando desta forma a estética da mesma, garantindo ao utilizador que não seria necessário ter qualquer tipo de pintura após a sua aplicação.

Visto que o material constituinte do núcleo do material de mudança de fase deriva do petróleo seria importante perceber qual a toxicidade do mesmo analisando quais os gases libertados quando o mesmo é sujeito a altas temperaturas. Tal como a análise toxicológica, seria importante perceber como reagirá a argamassa na presença de fogo.

Seria importante verificar se o PCM perderia ou não as suas propriedades de armazenamento de temperatura quando a argamassa é sujeita a altas temperaturas.

Verificar o comportamento deste tipo de PCM usado na constituição da argamassa em placas de gesso cartonado, uma vez que estas têm um uso corrente.

BIBLIOGRAFIA

- Aguiar, J. L. (2007). *Materiais de Construção I Pedras - Ligante - Argamassas - Madeiras - Metais*. Guimarães: Universidade do Minho.
- Aguiar, J. L., Gomes, J. I., Lopes, L. M., & Monteiro, J. M. (2005). *Portugal Patente Nº 103336*.
- Almeida, M. (2012). A Nova Regulamentação Térmica. *Enquadramento*. Guimarães, Portugal: Universidade do Minho.
- Alves, V. H. (2011). *Estudo de Argamassas Térmicas: Influência da Composição na Retração*. Guimarães: Universidade do Minho.
- APFAC. (2008). Monografias APFAC sobre Argamassas de Construção. *Tema 3: Argamassas de Reboco e Monomassas (EN 998-1)*. Lisboa: APFAC.
- Aydin, S., & Baradan, B. (2007). "Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature". *Cement and Concrete Research*, 37, 988-995.
- Bayer, R., & Lutz, H. (2003). *Dry Mortar*. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.
- Carvalho Jr, A. N., Brandão, P. R., & Freitas, J. M. (2005). *Relação entre a resistência de aderência de revestimento de argamassa e o perfil de penetração de pasta de aglomerante nos poros do bloco cerâmico*. Florianópolis: ANTAC.
- Civil, L. N. (1986). *Revestimentos de Paredes - Ensaio de Arrancamento por Tração*. Lisboa: Departamento de Edifícios - Núcleo de comportamento das Construções.
- Civil, L. N. (1990). Verificação da Segurança de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado em Relação à Acção do Fogo. *Recomendações LNEC*. Lisboa, Portugal.
- Cunha, S. R.; Alves, V. H.; Aguiar, J. B.; e Ferreira, V. M. (2012). *Argamassas Térmicas Sustentáveis: O contributo dos Materiais de Mudança de Fase*. Guimarães: Universidade do Minho.
- Cunha, S. R.; Alves, V. H.; Aguiar, J. B.; e Ferreira, V. M. (2012). Use of phase change materials microcapsules in aerial lime and gypsum mortars. *Cement Wapno Beton - Special Issue*, 17-21.

- EN 1015-11:1999. (1999) *Methods of test mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strenght of hardened mortar*. Bruxelas: European Committee for Standardization.
- EN 1015-12:2000. (2000) *Methods of test for mortar for masonry - Pat 12: Determination of adhesive strenght of hardened rendering and plastering mortars on substrates*. Bruxelas: European Committe for Standardization.
- Factori, I. M. (2009). *Processamento e propriedades de compósitos de poliamida 6.6 reforçada com partículas de vidro reciclado*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Kanan, M. I. (2008). *Manual de Conservação e Intervenção em Argamassas e Revestimentos à Base de Cal*. Brasília: Ipjan.
- Lion, M., Skoczylas, F., Lafhaj, Z., & Sersar, M. (2005). Experimental study on a mortar. Temperatura effects on porosity and permeability. Residual properties or direct measurements under temperature. *Cement and Concrete Research*, 35,1937-1942.
- Martins, J. G., & Assunção, J. S. (2010). *Materiais de Construção: Argamassas e Rebocos*. Lisboa: Universidade Fernando Pessoa.
- Martins, V. D. (2012). *Argamassas Sustentáveis de Baixa Rretração*. Guimarães: Universidade Do Minho.
- Ministério das Obras Públicas, T. e. (2006). Decreto-Lei nº 80. *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)*. Lisboa, Portugal.
- Morales, G., Campos, A., & Faganello, A. M. (2011). The action of the fire on the components of the concrete. *Ciências Exatas e Tecnológicas*, 32, 47-55.
- NP EN 998-1:2010. (2010) *Especificações de argamassas para alvenarias Parte 1: Argamassas para rebocos interiores e exteriores*. Bruxelas: Comité Europeu de Normalização.
- R.Cunha, S.; Alves, V. H.; Aguiar, J. B.; e Ferreira, V. M. (2012). Argamassas Sustentáveis: O contributo dos Materiais de Mudança de Fase. *4º Congresso Português de Argamassas e ETICS*. Coimbra.

Real, P. V. (2003). *Incêndio em estruturas metálicas: Cálculo estrutural*. Lisboa: Orion.

Sabbatini, F. H. (1984). *O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílico-calcária*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Silva, C. M. (2010). *Avaliação da Resistência ao Fogo de Produtos de Construção*. Aveiro: Universidade de Aveiro.

Silva, N. T. (2009). *Incorporação de Materiais de Mudança de Fase em Materiais de Construção*. Guimarães: Universidade do Minho.

Standardization, E. C. (August de 1999). Methods of test for mortar for masonry-Part 11: Determination flexural and compressive strenght of hardened mortar. *EN 1015-11*. Brussels: European Committe for Standardization.

Suave, J., Dall`agnol, E., Pezzin, A., Silva, D., Meier, M., e Solde, V. (2006). *Microencapsulação: Inovação em diferentes áreas*. Florianópolis: Universidade Federal Santa Catarina.

Pacheco-Torgal, F., e Jalali, S. (2010). *A sustentabilidade dos Materiais de construção*. Vila Verde: Gráfica Vilaverdense.

Pacheco-Torgal, F. (2013) Eco-efficient construction and building materials research under the EU Framework Programme Horizon 2020. *Construction and Building Materials*. (in press)

Yazici, S., Sezer, G. Í., & Sengül, H. (2012). The effect of high temperature on the compressive strength of mortars. *Construction and Building Materials*, 35, 97-100.

SITES VISITADOS

sapadoresdecoimbra.no.sapo.pt. (s.d.). Obtido em 10 de Fevereiro de 2013

www.apfac.pt. (s.d.). Obtido em 10 de Fevereiro de 2013

www.infopedia.pt. (s.d.). Obtido em 26 de Janeiro de 2013