

# Comportamento de argamassas com incorporação de materiais de mudança de fase submetidas a elevadas temperaturas

Sandra Cunha<sup>1,†</sup>, Luís Carneiro<sup>2</sup>, José B. Aguiar<sup>3</sup>, Fernando Pacheco-Torgal<sup>3</sup>

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal*

Victor Ferreira<sup>3</sup>

*Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil  
Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal*

António Tadeu<sup>3</sup>

*Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil  
Rua Luís Reis Santos - Pólo II da Universidade, 3030-788 Coimbra, Portugal*

## RESUMO

Atualmente, cada vez mais a sociedade se preocupa com a sustentabilidade e as boas práticas de construção, assim como o desempenho dos materiais quando sujeitos a condições ambientais desfavoráveis. As argamassas com incorporação de materiais de mudança de fase (PCM) possuem a capacidade de regular a temperatura no interior de edifícios, contribuindo para o conforto térmico e redução da utilização de equipamentos de climatização, apenas com recurso à energia fornecida pelo sol. Tendo em consideração a enorme dependência energética de Portugal e os elevados consumos energéticos no sector residencial, torna-se urgente desenvolver soluções construtivas que contribuam para a minimização do consumo de energias provenientes de fontes não renováveis. Assim, as argamassas funcionais aparecem como uma possível solução para a minimização desta problemática, uma vez que contribuem para a eficiência energética dos edifícios. No entanto, é importante que estas apresentem um bom comportamento quando submetidas a condições agressivas, tais como quando sujeitas a elevadas temperaturas. O principal objetivo deste trabalho consistiu em avaliar o comportamento a altas temperaturas de argamassas com incorporação de PCM, com base em diferentes ligantes. Sendo possível observar que a exposição a temperaturas elevadas deste tipo de argamassas, em geral conduziu a uma diminuição das suas propriedades mecânicas.

---

<sup>1</sup> Aluno de Doutoramento

<sup>2</sup> Mestre

<sup>3</sup> Professor

<sup>†</sup> [sandracunha86@gmail.com](mailto:sandracunha86@gmail.com)

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, tem vindo a verificar-se um crescente interesse sobre a segurança contra incêndio, apoiada por regulamentação ainda relativamente recente. Os incêndios podem ter consequências graves numa estrutura, conduzindo até ao colapso da mesma, à perda de vidas humanas e perdas económicas significativas. Assim, é necessário analisar o comportamento dos materiais a elevadas temperaturas, em especial os habitualmente utilizados na construção. A exposição de materiais de construção a elevadas temperaturas possui uma enorme influência nas propriedades dos mesmos, uma vez que quando sujeitos a esta ação podem apresentar comportamentos muito distintos daqueles que possuem em condições normais de funcionamento.

As argamassas são materiais frequentemente utilizados na construção, emergindo assim a necessidade de as tornar funcionais não só do ponto de vista energético, mas também dotá-las de capacidade para apresentarem um bom comportamento quando sujeitas a condições ambientais agressivas, especificamente neste trabalho a elevadas temperaturas.

A comunidade científica tem vindo a realizar estudos no âmbito da reação dos materiais a elevadas temperaturas. No entanto, o estudo sobre o comportamento de argamassas com incorporação de PCM expostas a temperaturas elevadas, constitui uma das principais lacunas de conhecimento no estudo deste tipo de argamassas. Portanto, o objetivo principal deste trabalho consiste em avaliar o comportamento de argamassas aditivadas com PCM quando sujeitas a elevadas temperaturas, desenvolvidas com base em diferentes ligantes. Foram desenvolvidas 12 composições distintas e testadas em 3 gamas de temperatura diferentes, tendo sido avaliadas a sua resistência à flexão, resistência à compressão e aderência.

## 2. MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

Os materiais de mudança de fase, possuem a capacidade de mudar o seu estado em função da temperatura ambiente. Quando a temperatura ambiente que rodeia o PCM aumenta e passa o ponto de fusão do material, este passa do estado sólido para estado líquido, absorvendo e armazenando a energia calorífica ambiente. Quando a temperatura ambiente baixa, e passa o ponto de solidificação do PCM, então este passa do estado líquido para o estado sólido, libertando a energia anteriormente armazenada.

Para a correta utilização do PCM, este deve ser encapsulado, caso contrário, durante a fase líquida pode correr-se o risco deste se deslocar do local em que foi aplicado. Existem duas principais formas de encapsulamento: microencapsulamento e Macroencapsulamento (Cabeza, 2011; Regin, 2008). O macroencapsulamento baseia-se na introdução de PCM em tubos, painéis ou outro recipiente de grandes dimensões, geralmente com dimensões superiores a 1 cm de diâmetro. O microencapsulamento consiste na colocação de uma pequena massa molecular em pequenas partículas, revestidas por polímeros de alto desempenho, com dimensões inferiores a 1 cm de diâmetro, sendo as suas dimensões preferenciais de 1 a 60  $\mu\text{m}$  (Cabeza, 2011; Tyagi, 2011).

Os materiais de mudança de fase são classificados como substâncias orgânicas, inorgânicas e misturas eutécticas. Os materiais orgânicos podem ser parafínicos e não-parafínicos, possuindo normalmente uma fusão congruente, mudando de fase vezes sem conta e sem degradação. Os materiais inorgânicos são classificados como sais hidratados e metálicos e têm vindo a ser extensivamente estudados para a sua utilização em sistemas de armazenamento térmico. As suas propriedades mais atraentes são o alto calor de fusão por unidade de volume, alta condutibilidade térmica (quase o dobro da parafina), e pequenas

mudanças de volume durante a fusão. Os sais metálicos ainda não foram seriamente considerados para armazenamento térmico devido ao seu peso. As misturas eutéticas resultam da combinação de dois ou mais compostos de natureza orgânica, inorgânica ou ambas, apresentando desta forma temperaturas de transição mais aproximadas às necessidades existentes, comparativamente com os compostos que as originam, individualmente (Sharma, 2009).

A incorporação de materiais de mudança de fase em edifícios possui impactos benéficos na dimensão social, económica e ambiental, demonstrando um contributo significativo para uma construção com maior valor de sustentabilidade.

Os benefícios sociais estão diretamente relacionados com o aumento do conforto térmico no interior das habitações, sendo este um requisito relevante para a obtenção de um edifício de qualidade. O aumento do conforto térmico é conseguido através da capacidade de armazenamento do PCM, permitindo armazenar e libertar energia, mantendo as temperaturas interiores sensivelmente constantes, ou pelo menos com variações inferiores.

O aspeto ambiental encontra-se relacionado com a redução do recurso a fontes de energia não renováveis, uma vez que esta tecnologia possui um efeito termoregulador do ambiente interior dos edifícios, proporcionando uma diminuição da utilização dos equipamentos de climatização, que também permite reduzir as emissões de gases poluentes para a atmosfera.

A dimensão económica diz respeito à adequação da tecnologia e custos associados à sua implementação. Os custos inerentes à sua aplicação devem ser facilmente suportados e amortizados pelo utilizador. Pode ainda referir-se que, os benefícios económicos da diminuição dos consumos energéticos e desfasamento dos mesmos para fora das horas de maior procura, são evidentes e podem ser conseguidos através do armazenamento térmico. A amortização e rentabilidade de uma solução com incorporação de PCM, é fortemente influenciada pelo preço do PCM e deve ser estudada antes da aplicação da tecnologia construtiva. No entanto, o aumento do preço da energia praticado nos últimos anos e a forte dependência de Portugal em termos energéticos, devem ser fatores a ponderar na estimativa de rentabilidade deste tipo de soluções.

### 3. MATERIAIS, COMPOSIÇÕES E FABRICO

#### 3.1. Materiais

A seleção dos materiais, tais como ligantes e microcápsulas de PCM teve em consideração trabalhos anteriores (Cunha, 2012; Cunha, 2013). Nesta investigação foram utilizados quatro ligantes diferentes: cimento Portland CEM II B-L 32.5N, cal hidráulica NHL5, cal aérea e gesso.

As microcápsulas de PCM são constituídas por uma parede em melamina-formaldeído, com temperatura de transição de 24°C e entalpia de 147.9 kJ/kg, possuindo uma distribuição de partícula de 5.8-339 µm e apresentando um tamanho médio de partícula de 43.91 µm. A areia utilizada apresentou um tamanho de partícula médio de 439,9 µm e uma massa volúmica real de 2600 kg/m<sup>3</sup>. O superplastificante utilizado é baseado em poliácrlato, com densidade de 1050kg/m<sup>3</sup>. Por último, as fibras utilizadas são fibras sintéticas de poliamida, com um comprimento de 6 mm e densidade de 1380 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.2. Composições e fabrico

Foram desenvolvidas 12 formulações distintas com base nos diferentes ligantes, as quais se apresentam na Tabela 1. As formulações em estudo são constituídas por diferentes ligantes, existindo sempre uma composição de referência, ou seja sem adição de PCM, e uma composição com incorporação de 40% de PCM. Com o objetivo de suprimir alguns problemas relacionados com a retração das argamassas foram ainda desenvolvidas argamassas com incorporação de fibras de poliamida. No que diz respeito às argamassas de cal aérea foi ainda necessário desenvolver composições para dosagens mais elevadas de ligante, com o objetivo de se obter um melhor desempenho mecânico.

O processo de mistura e fabrico dos provetes para a determinação da resistência à compressão e flexão foi efetuado de acordo com norma EN 1015-11, com ligeiras adaptações devido à incorporação do PCM no que respeita ao tempo de mistura e sequência de materiais incorporados (European Committee for Standardization, 1999). Para cada composição, foram moldados 3 provetes prismáticos com 40x40x160 mm<sup>3</sup>. Relativamente aos ensaios de determinação da aderência, o procedimento de preparação dos elementos de ensaio foi realizado em conformidade com a norma EN 1015-12 (European Committee for Standardization, 2000). Para cada composição em estudo, foram preparados cinco provetes circulares com um diâmetro de 50 mm, tendo sido a argamassa aplicada num suporte cerâmico, neste caso específico um tijolo.

Após o seu fabrico, todos os provetes foram conservados durante 7 dias em sacos de polietileno, sendo posteriormente colocados em laboratório à temperatura ambiente (cerca de 22 °C) durante 21 dias, totalizando 28 dias de cura, tal como é exigido pela norma NP EN 998-1, para a classificação segundo a resistência à compressão das mesmas (Instituto Português da Qualidade, 2013).

Tabela 1 – Formulação das argamassas (kg/m<sup>3</sup>).

Composição	Ligante		Areia	PCM	SP	Fibras	Água
CA500-0PCM	Cal Aérea	500	1447,2	0	15	0	225
CA800-40PCM	Cal Aérea	800	451,2	180,5	24	0	272
CA800-80PCM-F	Cal Aérea	800	447,7	179,1	24	4	272
CH500-0PCM	Cal Hidráulica	500	1351,1	0	15	0	270
CH500-40PCM	Cal Hidráulica	500	571,6	228,6	15	0	310
CH500-40PCM-F	Cal Hidráulica	500	569,4	227,8	15	2,5	310
C500-0PCM	CEM II B-L 32.5N	500	1418,8	0	15	0	275
C500-40PCM	CEM II B-L 32.5N	500	644,3	257,7	15	0	280
C500-40PCM-F	CEM II B-L 32.5N	500	642,2	256,9	15	2,5	280
G500-0PCM	Gesso	500	1360,4	0	15	0	280
G500-40PCM	Gesso	500	540,1	216,0	15	0	350
G500-40PCM-F	Gesso	500	537,9	215,2	15	2,5	350

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De forma a avaliar e comparar o comportamento das argamassas com incorporação de PCM quando submetidas a elevadas temperaturas, foram realizados ensaios de determinação da resistência à flexão, compressão e aderência. Os elementos de ensaio de cada composição foram submetidos a temperaturas elevadas durante cerca de 4 horas com recurso a um forno. Foram realizados testes para três gamas de temperaturas distintas, sendo estas 20°C, considerada como temperatura de referência, 200°C e 600°C.

#### 4.1. Comportamento à flexão

Para o comportamento em flexão foram utilizados provetes prismáticos com dimensões de 40x40x160mm<sup>3</sup>. Os ensaios foram realizados com controlo de força, a uma velocidade de 50N/s. De acordo com a Figura 1 foi possível observar que a submissão dos elementos de ensaio a elevadas temperaturas origina uma perda na sua resistência à flexão.

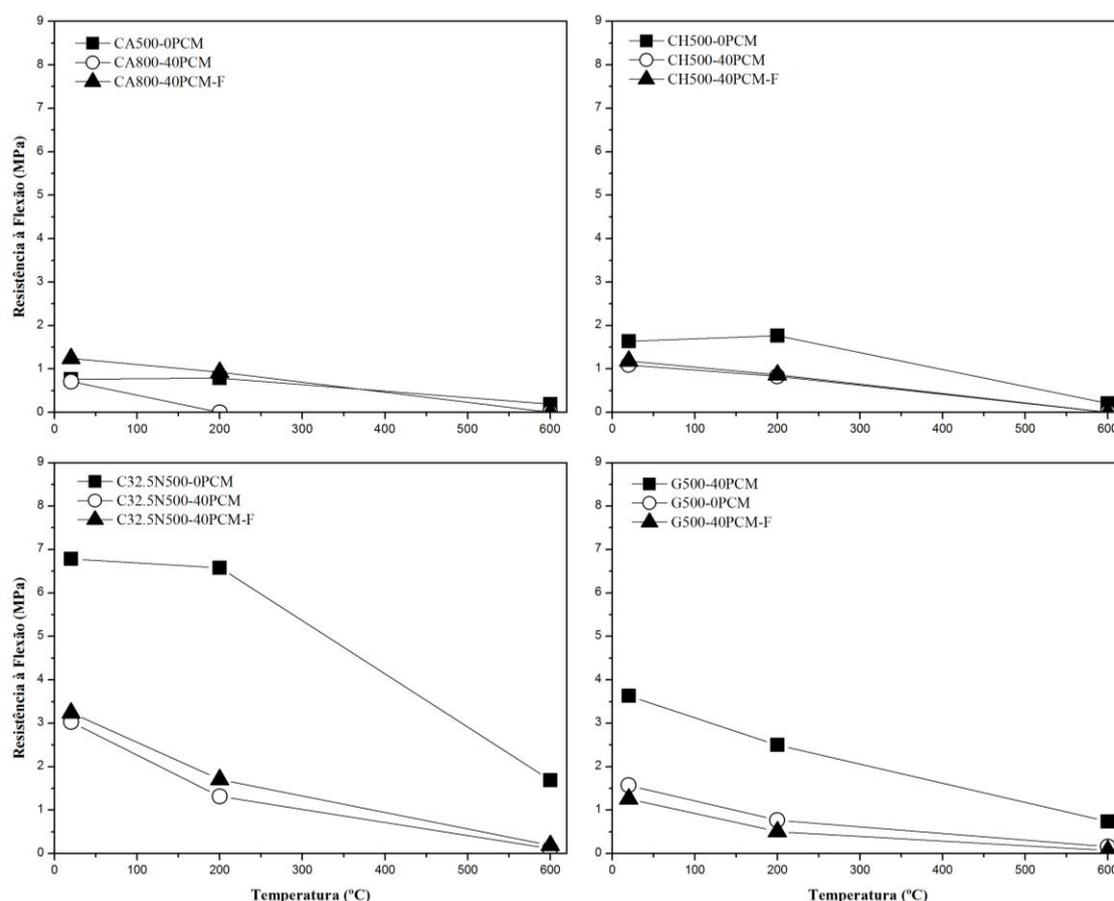


Figura 1 – Comportamento em flexão a temperaturas elevadas.

Para a temperatura de 200°C nenhuma das argamassas sem incorporação de PCM, exibe uma diminuição considerável da sua resistência à flexão, excetuando a argamassa à base de gesso. No entanto para a temperatura de 600°C verifica-se que a perda sofrida na resistência à flexão das argamassas em estudo é bastante significativa. Este comportamento pode ser justificado pelo facto das argamassas dilatarem e sofrerem microfissuras quando submetidas a elevadas temperaturas (Lion, 2005). Estas microfissuras podem também ser provocadas pela alta pressão de vapor interna gerada nos elementos de ensaio quando os mesmos são sujeitos a altas temperaturas, e pelo facto de se desenvolver um gradiente térmico entre as camadas exteriores e interiores dos provetes que conseqüentemente causa a fissuração (Yazici, 2012). A presença destas microfissuras reduz 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, 2007).

Relativamente às argamassas com incorporação de 40% de PCM verifica-se que aos 20 °C a sua resistência é inferior comparativamente à apresentada pelas argamassas de referência (0% PCM). Esta diminuição pode ser explicada pelo aumento da quantidade de

água nas composições com incorporação de PCM. Note-se que o aumento de água e a adição de PCM nas argamassas provoca um aumento na sua porosidade o que origina uma diminuição da sua resistência. Com o aumento da temperatura ocorrem os fenómenos de fissuração descritos para as argamassas de referência, sendo que no caso das composições com incorporação de PCM os coeficientes de dilatação do material que constitui a parede do PCM (material polimérico) são significativamente diferentes dos restantes, acentuando as tensões que se geram nos provetes (Lion, 2005).

A adição de fibras nas argamassas com PCM proporciona efeitos na resistência à flexão diferentes tendo em conta o ligante em causa. Assim as argamassas à base de cal aérea, cal hidráulica e cimento apresentam um aumento de resistência à flexão em relação às argamassas apenas com incorporação de PCM. Salienta-se que para a cal aérea este aumento de resistência é significativo, uma vez os valores são superiores às argamassas de referência para a temperatura de 20°C e 200 °C. Contrariamente, nas argamassas à base de gesso a adição de fibras tem um efeito negativo, exibindo uma resistência à flexão inferior à argamassa apenas com incorporação de PCM, o que pode ser justificado pela expansão característica deste tipo de ligante, provocando a diminuição da aderência entre as fibras e a argamassa. Constata-se ainda, que o aumento da temperatura faz diminuir a resistência à flexão nas argamassas com incorporação de PCM e fibras, sendo que esta diminuição pode ser explicada pelo que foi descrito anteriormente para as argamassas com PCM.

A Figura 2 e Tabela 2 apresentam a variação na resistência à flexão das várias argamassas estudadas, para uma temperatura de exposição de 200°C e 600°C. Sendo que os valores apresentados foram obtidos através da sua comparação com os valores das argamassas de referência ou seja das argamassas com exposição apenas a uma temperatura ambiente de cerca de 20°C. Desta forma, foi possível verificar que relativamente ao comportamento à flexão o ligante mais sensível a elevadas temperaturas é a cal aérea, verificando-se a destruição total dos elementos de ensaio para as duas temperaturas em estudo (Figura 3). Por outro lado, o cimento mostra ser o ligante com menores perdas de resistência.

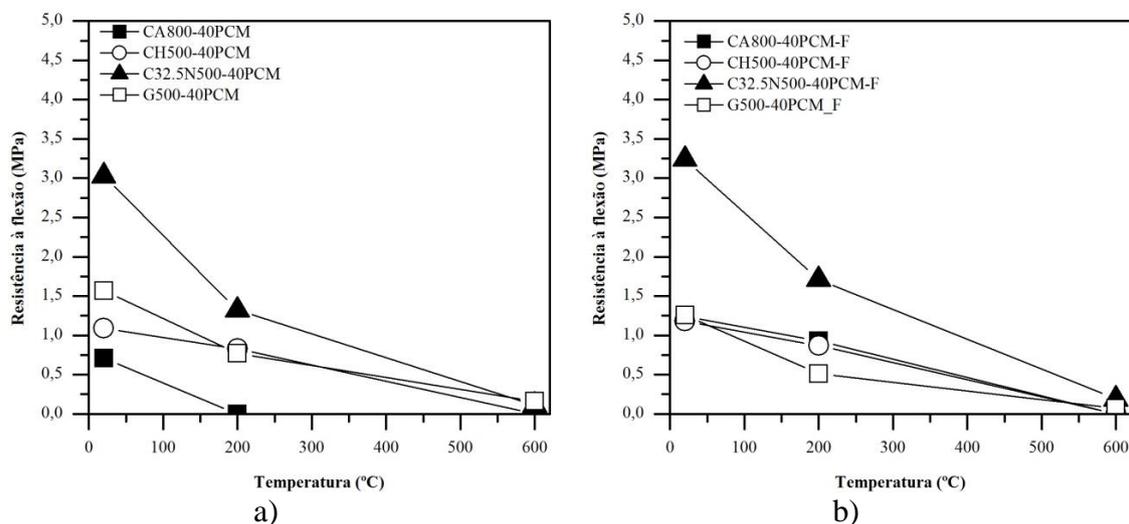


Figure 2 – Comportamento em flexão das argamassas: a) 40% de PCM; b) 40% de PCM e 1% de fibras.

Tabela 2 – Variação da resistência à flexão de acordo com a exposição a uma temperatura de 200°C e 600°C.

Composição	Ligante	Variação da Resistência à Flexão a 200°C (%)	Variação da Resistência à Flexão a 600°C (%)
CA500-0PCM	Cal Aérea	4	-75
CA800-40PCM	Cal Aérea	-100	-100
CA800-80PCM-F	Cal Aérea	-25	-100
CH500-0PCM	Cal Hidráulica	8	-87
CH500-40PCM	Cal Hidráulica	-24	-100
CH500-40PCM-F	Cal Hidráulica	-26	-100
C500-0PCM	CEM II B-L 32.5N	-3	-75
C500-40PCM	CEM II B-L 32.5N	-56	-96
C500-40PCM-F	CEM II B-L 32.5N	-47	-94
G500-0PCM	Gesso	-31	-80
G500-40PCM	Gesso	-51	-90
G500-40PCM-F	Gesso	-60	-94

#### 4.2. Comportamento à compressão

O comportamento em compressão foi avaliado efetuando a aplicação da carga no provete com recurso a uma peça metálica, suficientemente rígida para uniformizar a carga vertical. Os provetes utilizados para o ensaio foram as metades resultantes dos ensaios de flexão. Os ensaios foram realizados com controlo de força, a uma velocidade de 150N/s.

De acordo com as Figuras 4 e 5 foi possível verificar uma diminuição da resistência à compressão com o aumento da temperatura.

As argamassas de referência expostas aos 200°C mostram uma melhoria da sua resistência à compressão para os ligantes de cal aérea e cal hidráulica, 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 (Aydin, 2007), sendo que no caso da cal aérea o processo de cura é através da carbonatação e ocorre em 2 fases. Na primeira a fase ocorre a evaporação da água de mistura, o que resulta numa contração do volume da argamassa. Numa segunda fase, verifica-se uma reação lenta do dióxido de carbono com a cal hidratada, onde se origina carbonato de cálcio que por sua vez irá aumentar a resistência mecânica da argamassa. Para a cal hidráulica o processo de cura acontece também em duas fases, sendo que primeiramente a cal hidráulica sofre uma rápida reação de hidratação dos seus compostos hidráulicos com a água e numa segunda fase sofre carbonatação, que tal como no caso da cal aérea é uma reação lenta. Como foi referido o processo de cura é lento, no entanto com o aumento da temperatura esse processo é acelerado, o que permite que aos 200°C os valores de resistência sejam mais elevados. Aos 600 °C a resistência diminui pois a exposição a temperaturas mais elevadas faz com que os processos referenciados na justificação da diminuição da resistência à flexão sejam mais acentuados e a degradação dos provetes provoca a diminuição da sua resistência.



a)

b)

Figure 3 – Argamassas à base cal aérea com incorporação de 40% PCM: a) submetidas a 200°C; b) submetidas a 600°C.

As restantes argamassas de referência à base de gesso e cimento apresentam perdas para uma temperatura de exposição de 200°C, uma vez que o seu processo de endurecimento é diferente do explicado anteriormente. As modificações microestruturais nas argamassas de cimento, ocorrem devido à perda de água proporcionada pelo aumento da temperatura, que originam microfissuras devidas às variações de pressão de vapor internas que se geram nos elementos de ensaio quando os mesmos são sujeitos a altas temperaturas, e pelo facto de se desenvolver um gradiente térmico entre as camadas exteriores e interiores dos provetes que consequentemente causa fissuras (Lion, 2005; Yazici, 2012; Aydin, 2007). Note-se que aos 600°C podem mesmo começar a ocorrer processos de desidratação dos ligantes agravando ainda mais as perdas de resistência (Morales, 2011).

Nas argamassas com incorporação de PCM verifica-se que aos 20°C a sua resistência à compressão é inferior às argamassas de referência. Verifica-se também que a sua resistência diminui com o aumento de temperatura. O que mais uma vez é justificado pelo aumento na quantidade de água adicionada às argamassas o que provoca um aumento na sua porosidade, originado consequentemente uma diminuição da sua resistência.

Por fim verifica-se que, a adição de 1% de fibras nas argamassas com incorporação de PCM proporcionam efeitos positivos na resistência à compressão. Salienta-se que na cal aérea esse aumento de resistência é tal que os valores ultrapassam os resultados obtidos para as argamassas de referência para a temperatura de 20°C e 200°C. Contudo, verifica-se também para estas argamassas uma diminuição na sua resistência à compressão com o aumento da temperatura. O que mais uma vez é originado pelo desenvolvimento de microfissuras na matriz da argamassa.

A Tabela 3 apresenta a variação na resistência à compressão e a classificação das várias argamassas estudadas, segundo a norma NP EN 998-1:2010 para uma temperatura de exposição de 200°C e 600°C (Instituto Português da Qualidade, 2013). Para a temperatura de exposição de 200°C foi possível observar uma diminuição da classe de resistência. Contudo, mesmo assim a sua classificação ainda é satisfatória, com exceção das argamassas à base de cal aérea com incorporação de PCM cuja classificação não foi possível, uma vez que se verificou a destruição total dos elementos de ensaio. Para a temperatura de exposição de 600°C verificou-se uma classificação significativamente inferior, pelo que se pode concluir que as argamassas expostas até aos 200°C mantêm um comportamento satisfatório, para todos os ligantes em estudo.

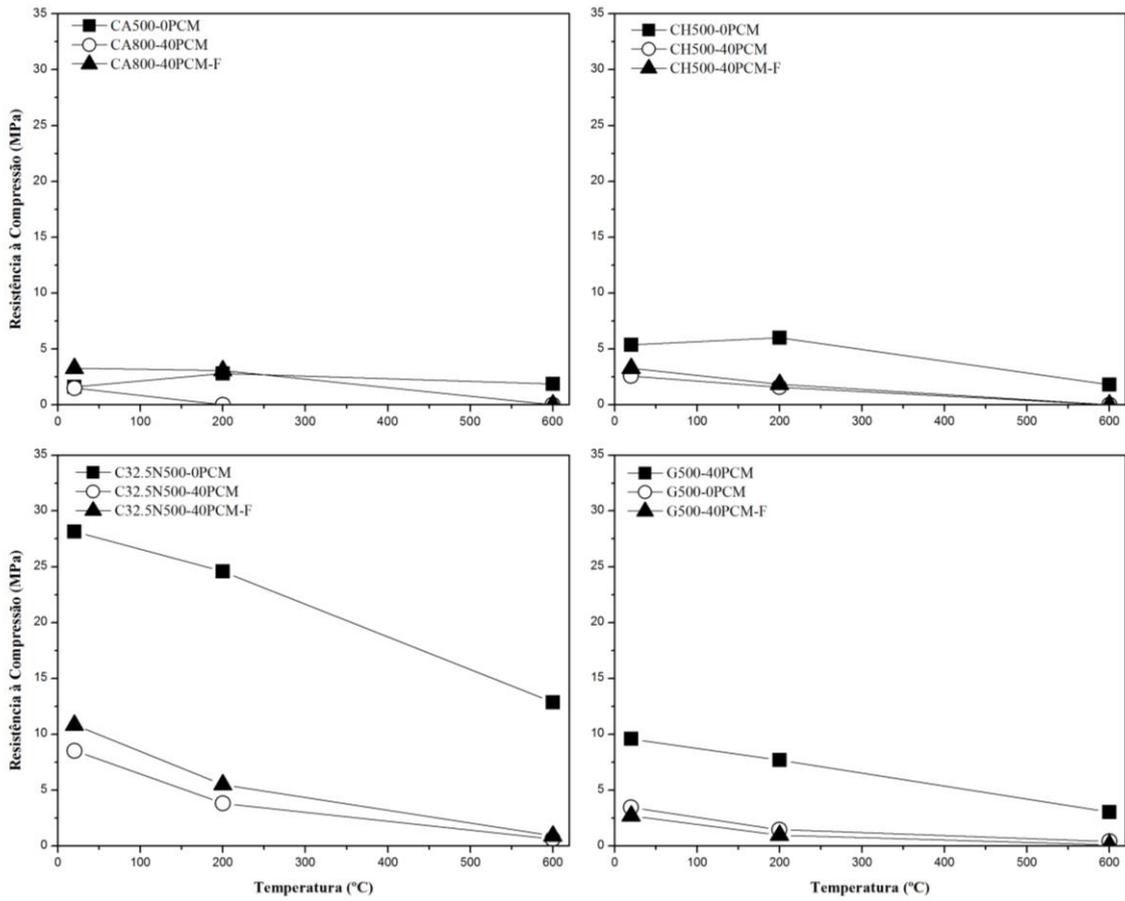


Figure 4 – Comportamento em compressão a temperaturas elevadas.

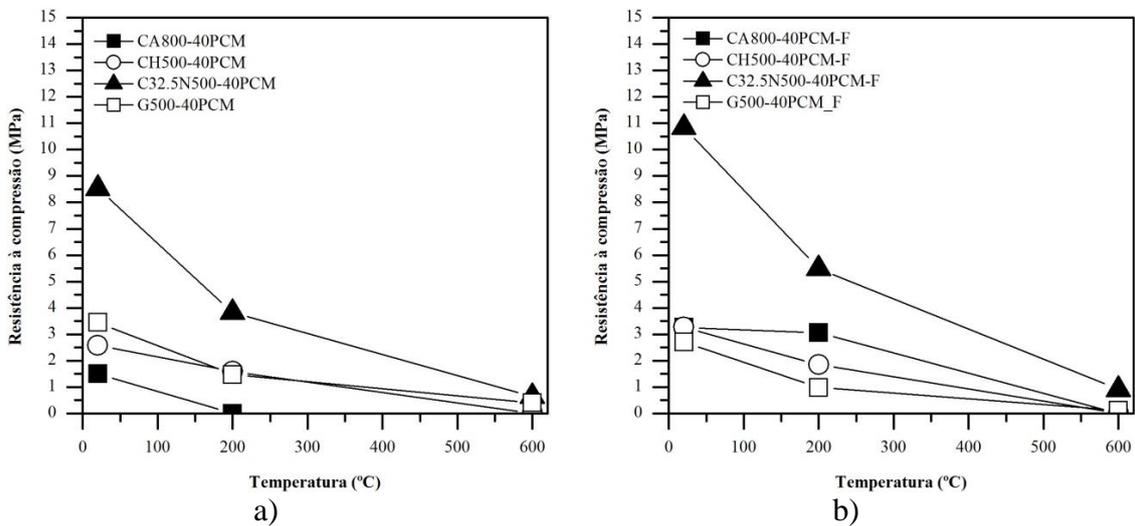


Figure 5 – Comportamento em compressão das argamassas: a) 40% de PCM; b) 40% de PCM e 1% de fibras.

Tabela 3 – Variação da resistência à compressão de acordo com a exposição a uma temperatura de 200°C e 600°C.

Composição	Ligante	Variação da Resistência à Compressão a 200°C (%)	Variação da Resistência à Compressão a 600°C (%)	Classificação NP EN 998-1:2010 para 200°C	Classificação NP EN 998-1:2010 para 600°C
CA500-0PCM	Cal Aérea	73	16	CSII	CSII
CA800-40PCM	Cal Aérea	-100	-100	-	-
CA800-80PCM-F	Cal Aérea	-7	-100	CSII	-
CH500-0PCM	Cal Hidráulica	12	-66	CSIII	CSII
CH500-40PCM	Cal Hidráulica	-38	-100	CSII	-
CH500-40PCM-F	Cal Hidráulica	-43	-100	CSII	-
C500-0PCM	CEM II B-L 32.5N	-13	-54	CSIV	CSIV
C500-40PCM	CEM II B-L 32.5N	-55	-92	CSIII	CSI
C500-40PCM-F	CEM II B-L 32.5N	-49	-92	CSIII	CSI
G500-0PCM	Gesso	-20	-68	CSIV	CSII
G500-40PCM	Gesso	-57	-88	CSI	CSI
G500-40PCM-F	Gesso	-64	-96	CSI	-

#### 4.3. Aderência

A avaliação da aderência foi realizada com base na norma EN 1015-1012. O ensaio permitiu estimar a aderência das argamassas aos 28 dias de idade, quando aplicadas a um substrato cerâmico. Este ensaio apenas foi realizado para as composições de referência, ou seja sem incorporação de PCM, e para as composições com 40% de PCM e 1% de fibras, uma vez que as composições apenas com incorporação de 40% de PCM relevaram uma retração elevada apresentando fissuras à superfície.

No que respeita à aderência das composições em estudo, todas apresentam o mesmo comportamento, apesar de obterem como é normal valores diferentes (Figura 6). Todas registaram valores superiores nas argamassas de referência quando comparadas com as argamassas com incorporação de 40% de PCM e 1% de fibras, para qualquer temperatura. Foi também possível observar que o aumento da temperatura originou uma diminuição da aderência. O aumento de temperatura poderá originar um incremento na dilatação dos materiais constituintes das argamassas, que fica impedida de expandir pela aderência da mesma ao tijolo, aumentando assim a tensão substrato/argamassa. Com o aumento da temperatura geram-se ações simultâneas de aumento da tensão e perda de água por evaporação o que diminui a aderência da argamassa ao substrato.

É de notar que para a temperatura de 600°C não foi possível obter qualquer valor de aderência pois a exposição das argamassas a esta temperatura levou a uma degradação excessiva das mesmas, impossibilitando a realização do ensaio (Figura 7).

De acordo com a Figura 8 e Tabela 4 foi possível verificar que as argamassas à base de cimento são aquelas cuja diminuição da aderência é menor, mostrando desta forma um melhor comportamento. O que se encontra relacionado com a maior resistência própria deste ligante.

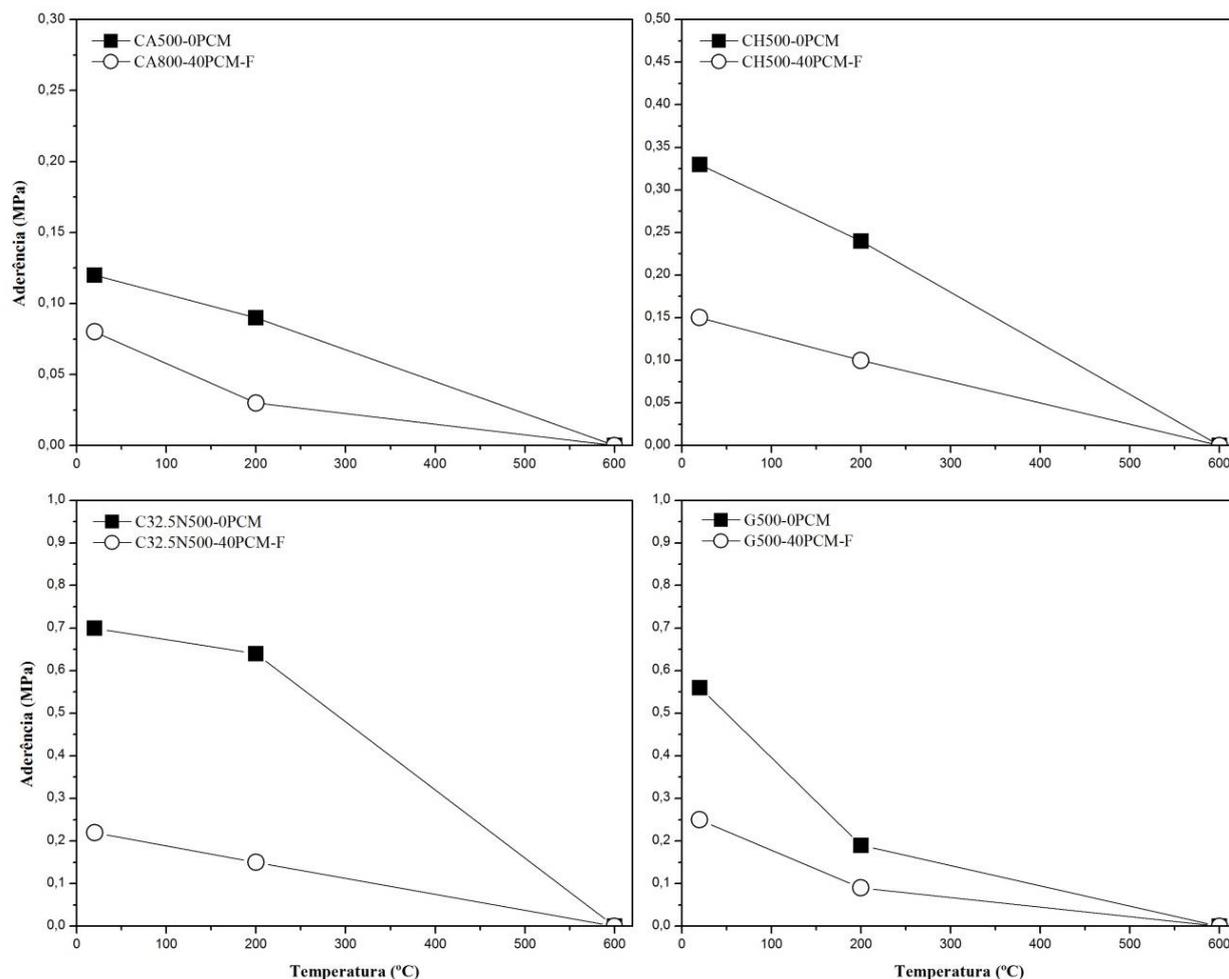


Figure 6 – Aderência a temperaturas elevadas.

Relativamente ao tipo de rotura foi possível identificar que as argamassas à base de cal aérea e gesso apresentaram uma rotura adesiva. Nas argamassas à base de cal hidráulica foi verificada uma rotura coesiva na argamassa. Por último, nas argamassas à base de cimento a rotura ocorreu no substrato cerâmico, sendo também uma rotura coesiva.



Figure 7 – Argamassas à base cimento submetidas a 600°C: a) 0% de PCM; b) 40% de PCM e 1% de fibras.

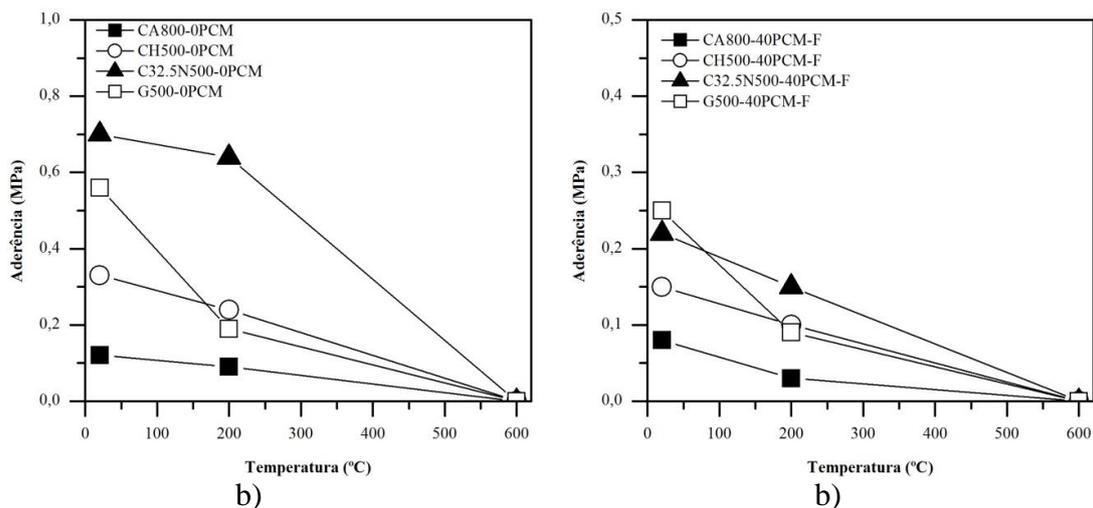


Figure 8 – Aderência das argamassas: a) 40% de PCM; b) 40% de PCM e 1% de fibras.

Tabela 4 – Variação da aderência de acordo com a exposição a uma temperatura de 200°C e 600°C.

Composição	Ligante	Variação da Resistência à Aderência a 200°C (%)	Variação da Resistência à Aderência a 600°C (%)
CA500-0PCM	Cal Aérea	-25	-100
CA800-80PCM-F	Cal Aérea	-63	-100
CH500-0PCM	Cal Hidráulica	-27	-100
CH500-40PCM-F	Cal Hidráulica	-33	-100
C500-0PCM	CEM II B-L 32.5N	-9	-100
C500-40PCM-F	CEM II B-L 32.5N	-32	-100
G500-0PCM	Gesso	-66	-100
G500-40PCM-F	Gesso	-64	-100

## 5. CONCLUSÃO

Com a realização deste trabalho foi possível concluir que a exposição de argamassas a elevadas temperaturas origina variações nas suas características mecânicas.

Globalmente foi possível observar que a adição de PCM nas argamassas diminui a sua resistência mecânica em todas as gamas de temperatura estudadas. Por outro lado, a adição de fibras na maioria dos casos melhora o comportamento das argamassas excetuando nas argamassas à base de gesso.

Foi também possível observar que a sensibilidade das argamassas a elevadas temperaturas é mais notória na resistência à flexão do que na resistência à compressão.

As argamassas com incorporação de 40% de material de mudança de fase apresentam sempre valores de resistência à flexão e compressão inferiores às argamassas de referência, para todas as gamas de temperaturas testadas, o que se encontra relacionado com a presença do PCM na microestrutura das argamassas.

As argamassas à base de cimento apresentam uma menor sensibilidade à exposição a elevadas temperaturas, apresentando conseqüentemente um melhor desempenho. Por outro lado, as argamassas à base de cal aérea revelaram uma maior deterioração, apresentando um comportamento mais sensível.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aydin, S. and Baradan, B., Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature, *Cement and Concrete Research*, **37**, 988-995 (2007).

Cabeza, L., Castell, A., Barreneche, C., Gracia, A. and Fernández, I., Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 1675-1695 (2011).

Cunha, S., Aguiar, J., Ferreira, V. and Tadeu, A., Influence of Adding Encapsulated Phase Change Materials in Aerial Lime based Mortars, *Advanced Materials Research*, **687**, 255-261 (2013).

Cunha, S., Aguiar, J., Kheradmand, M., Bragança, L. and Ferreira, V., Thermal mortars with incorporation of PCM microcapsules, *Restoration of Buildings and Monuments*, **19**, 171-177 (2013).

Cunha, S., Alves, V., Aguiar, J. and Ferreira, V., Use of phase change materials microcapsules in aerial lime and gypsum mortars, *Cement Wapno Beton*, **Special Issue**, 17-21 (2012).

European Committee for Standardization (CEN), EN 1015-11, Methods of test for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar (1999).

European Committee for Standardization (CEN), EN 1015-12, Methods of test for mortar for masonry – Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates (2000).

Instituto Português da Qualidade (IPQ), NP EN 998-1:2013, Especificação de argamassas para alvenarias. Parte 1: Argamassas para rebocos interiores e exteriores (2013).

Lion, M., Skoczylas, F., Lafhaj, Z. and Sersar, M., 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 (2005).

Morales, G., Campos, A. and Faganello A. M., The action of the fire on the components of the concrete, *Ciências Exatas e Tecnológicas*, **32**, 47-55 (2011).

Regin, A., Solanki, S. and Saini, J., Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**, 2438–2458 (2008).

Sharma A., Tyagi, V., Chen, C. and Buddhi, D., Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, 318–345 (2009).

Tyagi, V., Kaushik, S., Tyagi, S. and Akiyama, T., Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 1373-1391 (2011).

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