



**João Emanuel Ramos
Vieira**

**Funcionalização de argamassas para controlo das
condições ambiente**



**João Emanuel Ramos
Vieira**

**Funcionalização de argamassas para controlo das
condições ambiente**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais, realizada sob a orientação científica do Doutor João António Labrincha Batista, Professor Associado do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro e co-orientação do Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais, família e amigos.

o júri

presidente

Prof. Doutor Joaquim Manuel Vieira
Professor Catedrático do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro

vogais

Prof. Doutor João António Labrincha Batista
Professor associado com agregação no Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica

Prof. Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira
Professor associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutora Maria Margarida Tavares Lopes de Almeida
Professora auxiliar do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro

Doutor Luís Miguel Cardoso da Silva
Diretor de Marketing da Saint-Gobain Weber Portugal

agradecimentos

Ao meu orientador Prof. João Labrincha, pela oportunidade dada, pelo apoio, pela ajuda, pela disponibilidade e dedicação.

Ao meu co-orientador Prof. Victor Ferreira pela ajuda prestada.

À empresa Saint-Gobain Weber Portugal, SA. pela oportunidade, total disponibilidade do equipamento e materiais, e a todos os colegas do laboratório pela ajuda e pela amizade e em especial ao Eng.º Hélder Gonçalves.

Às empresas Wedi e Evonik pela disponibilização de material.

À Eng^a. Maria Carlos e ao Luciano Senff do Departamento de Engenharia Civil por toda a disponibilidade e ajuda ao longo do trabalho.

À Eng^a. Ana Ribeiro e Célia Miranda, ao Sr. Octávio e Sr. Jacinto do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica pela ajuda em alguns ensaios realizados e na elaboração dos moldes.

Aos meus pais e à minha família que sempre me apoiaram ao longo deste percurso.

Aos meus amigos que sempre ajudaram e motivaram ao longo destes anos e pelos bons momentos passados.

Obrigado!!

palavras-chave

Argamassa, humidade relativa, poliacrilato de sódio, moisture buffer value (MBV), processo fotocatalítico, dióxido de titânio (TiO_2), nanomateriais, calor latente, materiais de mudança de fase (PCM).

resumo

Nos últimos anos tem crescido a preocupação em termos ambientais e económicos, por parte das indústrias e das pessoas em geral. O sentimento de conforto depende muitas vezes do uso de aparelhos auxiliares, que consomem combustíveis fósseis. Para além do preço tendencialmente crescente destas fontes de energia, também resultante da menor disponibilidade e futura escassez, há hoje preocupações com as emissões de gases de estufa (ex. CO_2). Por isso, ganham relevo formas passivas de ajustar a temperatura e humidade relativa de ambientes interiores, onde as pessoas passam cada vez mais tempo ao longo da vida, ao mesmo tempo que se procuram soluções de limpeza e desinfeção do ar que se respira.

Neste trabalho estudou-se o efeito da incorporação de adjuvantes numa argamassa padrão de cimento e cal aérea usada no revestimento de paredes interiores de edifícios. Foi avaliado o desempenho da incorporação de poliacrilato de sódio (PA), materiais de mudança de fase (PCM) e de nanopartículas de dióxido de titânio (TiO_2), respetivamente em funções de modulação de humidade, temperatura e na oxidação de NO_x . Para além da incorporação individual de cada um daqueles agentes, testaram-se diferentes combinações dos três adjuvantes e distintas percentagens de PA. Foi também avaliada a influência que a incorporação daqueles materiais causa em propriedades comuns das argamassas, tanto no estado fresco (% de ar incluído e comportamento reológico) como após endurecimento (resistência mecânica, coeficiente de capilaridade, condutividade térmica, módulo de elasticidade).

Com a realização deste trabalho foi possível obter uma degradação de NO_x próxima de 42%, nas amostras com 1% (em massa) de TiO_2 . Verificou-se a atenuação na oscilação da temperatura em $2\text{-}3^\circ\text{C}$, em amostras contendo 20% de PCM, sobretudo por redução dos valores mínimos atingidos. Além disso, a variação térmica é retardada. As amostras com PA na sua constituição sujeitas a ensaio de MBV (método de Nordtest) atingem a classificação de Bom ($1\text{-}2\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$), não havendo acentuada perda de capacidade quando o material é revestido com uma camada de tinta. No entanto requer controlo especial a tendência expansiva (inchamento) revelada pelas amostras contendo combinações de PCM e PA, detetada durante os ensaios de capilaridade e de saturação de água. Este problema acarreta degradação da resistência mecânica e indesejáveis efeitos estéticos superficiais.

Relativamente às amostras mais promissoras sugere-se a realização de estudos de durabilidade.

keywords

Mortar; novel functions; moisture buffer value (MBV); sodium polyacrylate; TiO₂ photocatalyst; NO_x oxidation; latent heat; phase change materials (PCM); temperature modulation.

abstract

In recent years there has been a growing concern on environmental and energy demand to produce the building materials, as well during their use. At the same time, actual human living conditions correspond to occupation of interior spaces for a growing time. Requirements of increasing comfort and indoor air quality are obvious and the use of auxiliary devices that consume fossil fuels is more and more common. Reduced availability of fossil fuels and concerns about emissions of greenhouse gases (e.g. CO₂) induced the search for solutions of passive control and modulation of distinct indoor variables. This work studies the development of novel low impact vapour permeable mortars (internal walls) to control and passively regulate indoor environmental air pollutants, moisture and temperature, to provide improved comfort and health of building occupants.

Several functional additions were added to an industrial lime-based mortar: (i) sodium polyacrylate (PA) superabsorbent, phase change materials (PCM) and titanium dioxide (TiO₂) photocatalytic nanoparticles, attempting to (respectively) regulate indoor moisture and temperature values, while reducing the NO_x concentration. Besides the use of each individual addition, distinct combinations of two or three components were tested. Their effects on the novel functions were determined, while the control of common properties was also performed, including fresh state (% air included and rheological behavior) and hardened (mechanical strength, elasticity modulus, density, capillarity coefficient, thermal conductivity, etc) properties.

Samples containing 1 wt% TiO₂ degraded about 42% NO_x on repetitive trials. The amplitude of temperature variation was reduced on 2-3 °C by samples containing 20 wt% PCM. Furthermore, the temperature variation is retarded. Samples with 1-1.5 wt% PA were classed as Good (1-2 g/(m².% RH)) upon determinations of MBV values by the Nordtest method. The surface painting did not strongly affect the absorbing performance. The main problem was detected on samples containing PCM and PA combinations after performing capillary and water saturation tests, denoted by an expressive swelling. This expansive occurrence tends to degrade the mechanical strength of samples while created unpleasant aesthetical effects.

For the most promising samples further durability tests should be conducted. This work helped to develop knowledge and optimised solutions to facilitate the wider use of novel hygro-thermal eco-materials by the construction industry.

Índice geral

1.	Enquadramento e objetivos.....	1
2.	Introdução teórica	3
2.1.	Argamassas	3
2.2.	Evolução histórica das argamassas	3
2.3.	Tipos de argamassas	4
2.3.1.	Argamassa de revestimento	4
2.3.2.	Argamassas de Alvenaria.....	5
2.3.3.	Argamassas para juntas.....	6
2.3.4.	Argamassas-Cola	6
2.3.5.	Argamassas de suporte de pavimentos	6
2.4.	Constituintes das argamassas	6
2.4.1.	Agregados	7
2.4.2.	Ligantes.....	7
2.4.3.	Adjuvantes e aditivos.....	9
2.5.	Materiais Porosos.....	14
2.5.1.	Humidade.....	14
2.5.2.	Higroscopicidade dos materiais porosos.....	15
2.5.3.	Adsorção e desadsorção de humidade	16
2.6.	Avaliação da capacidade de controlo de humidade em argamassas	19
2.6.1.	Diferentes níveis de controlo de humidade.....	19
2.6.2.	Efusividade da humidade.....	20
2.6.3.	MBV ideal.....	21
2.6.4.	MBV prático	21
2.6.5.	Classificação dos materiais pelo método NordTest.....	22
3.	Argamassas com propriedades fotocatalíticas	25
3.1.1.	Descrição do processo fotocatalítico	25
3.1.2.	Deterioração de poluentes do ar interior.....	27
3.1.3.	Fatores que influenciam a degradação de poluentes.....	28
4.	Argamassas para controlo térmico	29
4.1.	Armazenamento de energia térmica.....	29
4.2.	Materiais de mudança de fase (PCM).....	30
4.2.1.	Requisitos técnicos.....	31
4.2.2.	Problemas associados aos PCM's.....	32
4.3.	Tipos de PCM	33
4.3.1.	PCM orgânicos.....	33
4.3.2.	PCM inorgânicos	33
4.3.3.	Eutéticos.....	34
5.	Procedimento experimental	35
5.1.	Argamassa padrão e argamassas técnicas	35
5.2.	Preparação da argamassa	36
5.3.	Caracterização das argamassas	37
5.3.1.	Ensaio em estado fresco	39
5.3.2.	Caracterização da argamassa endurecida.....	41
6.	Discussão e resultados	53
6.1.	Propriedades das argamassas em estado fresco	53
6.1.1.	Percentagem de água, de ar incluído e massa volúmica aparente.....	53
6.1.2.	Comportamento reológico	54

6.2.	Propriedades das argamassas endurecidas	58
6.2.1.	Variação de massa.....	58
6.2.2.	Variação dimensional.....	58
6.2.3.	Massa volúmica aparente	59
6.2.4.	Módulo de elasticidade dinâmico	60
6.2.5.	Resistência Mecânica	61
6.2.6.	Condutividade térmica	62
6.2.7.	Coefficiente de capilaridade.....	63
6.2.8.	Saturação e libertação de água	67
6.2.9.	MBVprático	69
6.2.10.	Desempenho térmico das argamassas com PCM.....	73
6.2.11.	Avaliação da capacidade fotocatalítica	75
7.	Conclusão.....	77
7.1.	Trabalhos futuros	79
8.	Referências bibliográficas.....	81

Índice de figuras

Figura 1: Diferentes camadas de argamassas de revestimento [8].	5
Figura 2: Poliacrilato de sódio em pó – a) e poliacrilato de sódio em gel – b).	13
Figura 3: Humidade em excesso visível na parede.	14
Figura 4: Balanço da humidade num compartimento [34].	15
Figura 5: Humidade adsorvida por materiais porosos higroscópicos [4].	16
Figura 6: Etapas do processo de adsorção de moléculas de água, onde: a) - adsorção monomolecular, b) - adsorção plurimolecular e c) - condensação capilar [11].	17
Figura 7: Curva de adsorção isotérmica, temperatura constante em função da variação da humidade relativa [4].	18
Figura 8: Comportamento higroscópico de materiais porosos, expresso pela quantidade de humidade por unidade de volume em função da humidade relativa [34].	18
Figura 9: Descrição do controlo de humidade em compartimentos fechados [29, 38].	20
Figura 10: Ciclo experimental de variação de humidade relativa no NordTest, para medição do valor de $MBV_{prático}$ [4].	21
Figura 11: Esquema ilustrativo do processo de fotocatalise por partículas de TiO_2 , onde VB é a banda de valência e CB a banda de condução [52].	26
Figura 12: Ilustração do mecanismo fotocatalítico na remoção de poluentes gasosos [58].	27
Figura 13: Equipamento de amassadura.	37
Figura 14: Equipamento utilizado para a medição da percentagem de ar.	39
Figura 15: Equipamento para medição da percentagem de ar sem e com argamassa respetivamente.	40
Figura 16: Reómetro utilizado no ensaio de reologia das argamassas.	41
Figura 17: Micrómetro utilizado para medir as variações dimensionais.	42
Figura 18: Equipamento utilizado para medir a frequência de ressonância das amostras.	43
Figura 19: Equipamento para a realização de ensaios de resistência à flexão e compressão.	44
Figura 20: Aparelho utilizado para a medição da condutividade térmica das placas.	45
Figura 21: Método de determinação do valor do coeficiente de absorção de água por capilaridade.	46
Figura 22: Provetes no processo de saturação.	47
Figura 23: Câmara climática usada para medir o $MBV_{prático}$.	47
Figura 24: Esquema de todo o processo de determinação de $MBV_{prático}$ [4].	48
Figura 25: Cubo de teste utilizado no cálculo do desempenho do PCM.	49
Figura 26: Câmara climática equipada com Datalog para o registo da temperatura ao longo do ensaio.	50
Figura 27: Esquema do equipamento experimental utilizado na avaliação fotocatalítica [66].	50
Figura 28: Placa colocada no interior do reator para o ensaio fotocatalítico.	51
Figura 29: Reator fotocatalítico utilizado nos ensaios de descontaminação gasosa instalado no departamento de Engenharia Civil.	52
Figura 30: Teor de água e de ar nas argamassas.	53
Figura 31: Massa volúmica aparente dos amassados.	54
Figura 32: Mesa de espalhamento da amostra 1PA20PCM.	55
Figura 33: (a) é a evolução da tensão de escoamento e (b) é a evolução da viscosidade plástica.	56
Figura 34: (a) - evolução da tensão de escoamento e (b) - evolução da viscosidade plástica das formulações com funções duplas e triplas.	57
Figura 35: Variação de massa das misturas ao fim de 7 e 28 dias de cura.	58
Figura 36: Variação dimensional das amostras ao fim de 7 e 28 dias de cura.	59

Figura 37: Massa volúmica aparente das argamassas após 1, 7 e 28 dias de cura.....	60
Figura 38: Módulo de elasticidade das amostras após 7 e 28 dias de cura.	61
Figura 39: Resistência à compressão das argamassas após 28 dias de cura.	62
Figura 40: Resistência à flexão das argamassas após 28 dias de cura.	62
Figura 41: Coeficiente de absorção de água por capilaridade de amostras curadas durante 28 dias.	64
Figura 42: Imagens de provetes de 1T1PA após o ensaio de capilaridade.	64
Figura 43: Superfície do provete 1T1PA que contactou com a água, observada numa Lupa Leica do modelo: EZ 4 HD.	65
Figura 44: Imagem de amostras de 1PA1T20PCM após o ensaio de capilaridade.	65
Figura 45: Imagem do provete de 1T1PA20PCM, seco após ser ensaiado à capilaridade.	65
Figura 46: Imagem da amostra de 1PA20PCM ensaiada à capilaridade e revelando inchamento superficial.	66
Figura 47: Imagens de provetes de 1PA20PCM, secos após o ensaio de capilaridade.	66
Figura 48: Resultados dos testes de saturação com água das amostras P, 1T20PCM, 20PCM e 1T.	67
Figura 49: Resultados dos testes de libertação de água das amostras P, 1T20PCM, 20PCM e 1T.	67
Figura 50: Resultados do teste de saturação com água das amostras com PA na sua constituição.	68
Figura 51: Resultados do teste de libertação de água das amostras com PA na sua constituição.	69
Figura 52: Variação mássica das amostras perante variações cíclicas de humidade; amostra P ($MBV_{prático}=0,94$) e amostra 1PA ($MBV_{prático}=1,4$).	70
Figura 53: Variação mássica das amostras perante variações cíclicas de humidade; amostra 1PA20PCM ($MBV_{prático}=1,22$) e amostra 1PA1T ($MBV_{prático}=1,51$).	70
Figura 54: Variação mássica das amostras perante variações cíclicas de humidade; amostra 1T1PA20PCM ($MBV_{prático}=1,13$) e amostra 1PA Pintada ($MBV_{prático}=1,11$).	71
Figura 55: Variação mássica da amostra perante variações cíclicas de humidade; amostra 1,5PA ($MBV_{prático}=1,46$).	71
Figura 56: Valores de $MBV_{prático}$ das argamassas.	72
Figura 57: Valores de MBV das argamassas, estimados nas etapas de adsorção e de libertação de humidade.	73
Figura 58: Variação de temperatura na câmara climática, sob a ação de diferentes argamassas (padrão, com PCM e com $TiO_2 + PCM$).	74
Figura 59: Variação de temperatura na câmara climática, sob ação de amostras contendo PCM e poliacrilato de sódio. Mostra-se também a curva registada com a amostra padrão.	74
Figura 60: Valores de degradação de NO_x	75
Figura 61: Evolução da % de degradação de NO_x ao longo do ensaio fotocatalítico.	76

Índice de tabelas

Tabela 1: Intervalos das classificações de $MBV_{prático}$ [36].	22
Tabela 2: Valor de $MBV_{prático}$ de vários materiais [36].	22
Tabela 3: Capacidade de armazenamento de calor de diferentes materiais [70].	30
Tabela 4: Composição da argamassa padrão.	35
Tabela 5: Composição das novas formulações.	36
Tabela 6: Ensaio realizados às argamassas preparadas.	38
Tabela 7: Diferença de % de H_2O do amassado e do preparado para reologia.	55

Tabela 8: Condutividade térmica das argamassas [W/mK] medida à temperatura de 30°C. ... 63

1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

Nos últimos 20 anos tem vindo a aumentar a preocupação ambiental e económica com o bem-estar das pessoas. As pessoas passam cerca de 80 a 90% do seu tempo no interior de edifícios, onde a concentração de poluentes e a humidade relativa do ar são elevadas, devido por vezes a uma deficiente ventilação, que pode provocar alergias ou até mesmo problemas crónicos.

A crescente preocupação em termos ambientais e económicos levou a um aumento da investigação para encontrar alternativas aos métodos tradicionais de manter o conforto no interior de edifícios. Surgiram entretanto novos materiais e produtos de construção civil com possível aplicação na construção nova, e na reabilitação de edifícios degradados, com a finalidade de substituir ou reduzir a dependência de fontes com elevada emissão de gases poluentes para a atmosfera. Uma vez que os combustíveis de origem fóssil estão com uma cotação elevada e a sua disponibilidade é cada vez menor, o preço da energia despendida para o controlo do conforto no interior de edifícios encarece. Todas as alternativas que consigam manter o conforto térmico, o ar interior descontaminado e que evitem o uso de aparelhos auxiliares, têm vindo a aumentar o seu interesse.

A investigação de alternativas aos materiais tradicionais levou ao desenvolvimento de novos materiais funcionais passivos, como argamassas funcionais.

Este trabalho dá continuidade a outros trabalhos práticos efetuados nesta mesma área e com a finalidade de desenvolver argamassas funcionais. Neste trabalho prático partiu-se de uma argamassa padrão de revestimento fornecida pela empresa *Saint-Gobain Weber Portugal – Argamassas Industriais, S.A.*, à qual foram adicionados vários aditivos: o poliacrilato de sódio, dióxido de titânio (TiO_2) e um material de mudança de fase (PCM). Com a adição de um ou mais aditivos na argamassa padrão, realizando as várias combinações, foram realizados ensaios de caracterização de propriedade, de produto endurecido, mecânicos (rotura à compressão e flexão), densidade aparente, permeabilidade, etc. Em função do tipo de aditivo funcional testaram-se novas propriedades: (i) capacidade de degradação de poluentes em meio gasoso (NO_x e COV) – no caso da adição de TiO_2 ; (ii) controlo de humidade relativa do ambiente interior – misturas com poliacrilato de sódio; (iii) condutividade térmica e modulação da temperatura ambiente interior, de formulações contendo PCM.

No final deste trabalho pretende-se avaliar a potencialidade das novas argamassas multifuncionais e sugerir de otimizar o seu desempenho global.

2. INTRODUÇÃO TEÓRICA

2.1. Argamassas

Uma argamassa é uma mistura artificial de pelo menos um ligante orgânico ou inorgânico, agregados, aditivos ou adjuvantes e água de acordo com a definição da EN 998-2. Os ligantes são componentes capazes de ligar entre si os vários constituintes da argamassa, podendo ser cimento, cal ou gesso. Este tipo de material confere consistência e resistência mecânica. Os agregados utilizados são preferencialmente areias siliciosas, dada a sua abundância, baixo custo e estabilidade química, podendo por vezes ser utilizado pó de pedra. Estes componentes têm como principal função a ocupação de espaços vazios e de dar corpo às argamassas. De entre os constituintes menores, designa-se por aditivo aquele que exista na argamassa em percentagem superior a 5% da massa do ligante, enquanto o adjuvante não supera aquela percentagem. Em geral, as argamassas industriais hoje preparadas são formulações complexas, que combinam distintos aditivos e/ou adjuvantes no sentido de otimizar algumas das propriedades.

As principais características das argamassas são, entre outras, a sua resistência à compressão, a aderência, a resistência ao impacto e ao desgaste mecânico, assim como, em algumas situações a resistência química.

2.2. Evolução histórica das argamassas

O aparecimento das primeiras argamassas data de 10000 anos de existência, na localidade da Galileia. Na tentativa de melhorar a qualidade de vida, o homem utilizava lama como meio de ligação entre pedras, gerando misturas naturalmente pouco estáveis. Mais tarde, há cerca de 6000 anos, na Babilónia, algumas civilizações desenvolveram uma massa plástica contendo cal, gesso, areia, pedras e fragmentos de tijolo, de maior estabilidade e durabilidade [1, 2]. O marco incontornável na evolução das argamassas corresponde à civilização Romana, que há cerca de 3000 anos desenvolveu misturas de cal e cinzas vulcânicas existentes na bacia de Nápoles, geradas pela erupção do vulcão Vesúvio. As cinzas de cor escura foram chamadas de pozolana natural, rica em sílica e alumina, que possui afinidade química para se combinar com a cal hidratada, garantindo razoável carácter hidráulico e elevada durabilidade. Além disso, há provas do uso de aditivos ou adjuvantes

para incrementar o desempenho das misturas no estado fresco e endurecido: sabão, resinas, gordura e sebo de boi. Na verdade, a utilização de adjuvantes foi incrementada durante a Idade Média [1, 3].

A cal começou por ser utilizada e aplicada no antigo Egito e no médio Oriente, resultando da calcinação de pedras calcárias. Também os gregos utilizaram este ligante, misturado com cinzas vulcânicas da ilha de Santorini [1, 3, 4].

Mais recentemente, as exigências de construção e a necessidade de desenvolver materiais hidráulicos com superior resistência mecânica aguçaram estudos que conduziram à elaboração do cimento moderno. Em 1824, Joseph Aspdin registou uma patente sobre o processo de fabrico de um ligante hidráulico à base de uma mistura de calcário e argila. O resultado da calcinação da mistura da pedra calcária com argila originava um produto com uma cor semelhante às pedras naturais das ilhas Portland, dando assim origem ao cimento Portland [1].

As argamassas à base de cal desenvolvidas atualmente apresentam características particularmente adaptadas tanto para a construção de novos edifícios como para o restauro e conservação de edifícios antigos, com ênfase nos aspetos energéticos e ambientais.

2.3. Tipos de argamassas

As argamassas podem ser classificadas consoante a sua aplicação, existindo argamassas para alvenaria, de revestimento, argamassas-cola, argamassas para juntas e argamassas de suporte para pavimentação. As argamassas que vão ser alvo de estudo neste trabalho prático, inserem-se no tipo de argamassas para revestimento [5].

2.3.1. Argamassa de revestimento

As argamassas de revestimento podem ser divididas em estuque e reboco, podendo ter aplicação tanto interior como no exterior de edifícios, como revestimento de paredes ou muros. As argamassas de reboco apresentam superfície plana, protetora e regular, podendo ser ou não sujeita a acabamentos, por exemplo decorativos. A maioria das argamassas de reboco é essencialmente de cimento, cal ou misturas de cimento e cal ou gesso e cal. Quando o principal ligante das argamassas é o gesso, estas são consideradas de estuque, tendo como principal função a proteção e decoração de interiores, apresentando uma resistência adequada

para este propósito. No entanto são menos resistentes e apresentam menor durabilidade em comparação com os rebocos [1, 6, 7].

A elevada variedade de argamassas de revestimento origina variabilidade significativa nos valores da resistência mecânica e de porosidade.

A utilização de argamassas de reboco tradicional requer que a aplicação seja repartida por três camadas, cada uma com propriedades específicas. A primeira camada tem como principal função garantir a aderência ao material de suporte e das camadas seguintes; sem esta primeira camada, chamada de chapisco, ilustrada Figura 1, as camadas seguintes poderiam não aderir e acabar por cair. As camadas seguintes têm como funcionalidade a proteção, acabamento e decoração; quanto maior o número de camadas melhor a proteção e a durabilidade.

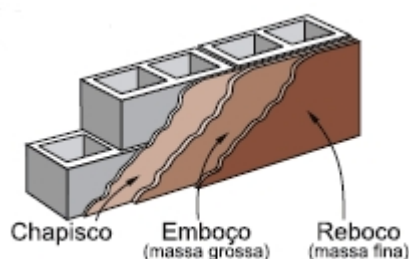


Figura 1: Diferentes camadas de argamassas de revestimento [8].

Nos dias de hoje é utilizado um reboco de monocamada, em vez da aplicação tradicional em camadas distintas, permitindo ganhos de tempo e de custos finais (mão de obra). A sua produção é industrializada, sendo apenas necessária a adição de água, ajustável consoante a trabalhabilidade desejada, do lado do aplicador. Podem também adicionar-se pigmentos, que evitam a decoração/pintura posterior. As maiores desvantagens deste produto são o elevado custo de aquisição e a exigência de mão-de-obra especializada para a sua correta aplicação [1, 7].

As argamassas de reboco mais utilizadas possuem capacidade para absorver e libertar vapor de água. No entanto, a retenção da água por parte da argamassa não deve ser muito elevada uma vez que pode danificar a estrutura e proporcionar o aparecimento de fungos.

2.3.2. Argamassas de Alvenaria

As argamassas de alvenaria são muito utilizadas na construção civil para a elevação de muros e de paredes, em tijolo ou de blocos de cimento. Estas argamassas são constituídas por

cimento e cal e devem desenvolver elevada resistência mecânica, possuir capacidade de acomodar possíveis movimentações causadas por tensões mecânicas, gradientes térmicos e de humidade, devendo também assegurar algum isolamento acústico [1, 4, 7, 9].

2.3.3. Argamassas para juntas

Como o nome sugere, estas argamassas destinam-se ao preenchimento dos espaços (juntas) existentes entre as peças cerâmicas de revestimento, utilizadas tanto para o chão como para paredes. As argamassas para juntas têm propriedades impermeabilizantes e capacidade de absorver tensões geradas entre as peças cerâmicas. As especificidades destas formulações variam consoante o ligante usado. Podem ainda ter funções decorativas, por exemplo com a adição de corantes [7, 10].

2.3.4. Argamassas-Cola

As argamassas-cola são argamassas específicas para a colagem de elementos cerâmicos diretamente na parede ou no chão de edifícios, de acordo com a norma EN 12004. Para se obter a trabalhabilidade necessária para a sua aplicação é misturada água em proporções criteriosas. São constituídas por uma mistura de ligantes hidráulicos, agregados e um ou mais aditivos/adjuvantes químicos com a finalidade de melhorar a retenção de água, plasticidade e aderência [4, 5, 11, 12].

2.3.5. Argamassas de suporte de pavimentos

Estas argamassas são utilizadas para nivelar e alisar superfícies horizontais, que posteriormente irão receber vários tipos de pavimentos, como por exemplo ladrilhos. A sua principal propriedade é a elevada resistência à compressão, e os ligantes usados são cimento e cal [4, 7, 13].

2.4. Constituintes das argamassas

Como anteriormente se referiu, e até já se foi exemplificando, as argamassas industriais são uma mistura de elementos ligantes, agregados e aditivos ou adjuvantes.

2.4.1. Agregados

Os agregados são geralmente os componentes maioritários (em massa ou volume) das argamassas, sendo normalmente utilizadas areias siliciosas provenientes de areiros e de rios. Podendo também ser utilizados fragmentos cerâmicos, britas, material extraído das pedreiras, cascalho e areias argilosas e calcárias. Os agregados devem possuir as seguintes propriedades: inércia química, baixo coeficiente de expansão térmica e estabilidade dimensional. Como parte estruturante das argamassas, qualquer variação da qualidade dos agregados influencia as propriedades finais do material. É particularmente crítica a presença de contaminantes (ex. sais) existentes nas zonas de extração [1, 7].

A forma e dimensão das partículas dos agregados influenciam o desempenho das argamassas. Os agregados naturais são constituídos geralmente por partículas esféricas e lisas, enquanto os materiais fragmentados englobam partículas angulosas, que melhoram o empacotamento devido ao amplo tamanho das mesmas e originam argamassas com menor porosidade e maior resistência mecânica [4, 7, 14, 15].

2.4.2. Ligantes

Os ligantes são materiais inorgânicos muito finos, que quando adicionados à água formam uma pasta. Esta pasta endurece devido a reações de hidratação ou de carbonatação, entre o pó e a água (e/ou o ar), tendo por isso como função a ligação dos grãos dos agregados, conferindo coesão e resistência.

Os materiais mais utilizados como ligantes são: o cimento Portland, o gesso e a cal, podendo esta ser aérea ou hidráulica. Os ligantes podem ser utilizados individualmente ou combinados, quando são compatíveis, de forma a aproveitar as características mais importantes de cada constituinte.

2.4.2.1. Ligantes de cimento Portland

O cimento Portland, é nos dias de hoje, o ligante mais utilizado nas argamassas, uma vez que se trata de um produto relativamente barato, que desenvolve elevada resistência mecânica e é um bom agente aglomerante. Trata-se de um elemento hidráulico, isto é, tem capacidade de ganhar presa e de endurecer tanto debaixo de água como ao ar [1, 4, 7, 16].

O cimento é produzido a partir de uma mistura devidamente proporcionada de matérias-primas inorgânicas de calcário e argilas (ou margas), com a seguinte composição de óxidos

maioritários: cálcio (60 – 68%), silício (17 – 25%), alumínio (2 – 9%), ferro (0,5 – 6%) e magnésio (0 – 2%). A mistura é cozida num forno rotativo e o processo de clinquerização inicia-se quando os componentes das argilas reagem com o óxido de cálcio, resultante do calcário e o forno atinge os 1450°C. Forma-se silicato tricálcico, $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (20 – 65%), silicato dicálcico $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (10 – 55%) e, em menores quantidade, aluminato tricálcico, $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (0 – 15%) e aluminoferrato tetracálcico, $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (5 – 15%) [1, 4, 7, 11, 16].

2.4.2.2. Ligantes de cal

Existem dois grupos de ligantes de cal de acordo com a forma de endurecimento: cal aérea, que endurece através de carbonatação ao ar livre; cal hidráulica, que endurece por hidratação quer em contacto com o ar quer na presença de água.

A cal aérea é constituída essencialmente por óxido ou hidróxido de cálcio. Resulta da calcinação de rocha calcária e pode ser dividida em dois grupos consoante o nível de impurezas: cal gorda e magra. As cals aéreas gordas derivam de calcários quase puros, com teores de carbonato de cálcio acima de 99% (< 1% de impurezas), tendo acentuada brancura. Já a cal aérea magra deriva de calcários com misturas de argilas e com teores de impurezas entre 1 – 5% em massa, apresentando cor acinzentada. Como o magnésio aparece muitas vezes associado ao cálcio, as rochas calcárias possuem diferentes teores de dolomite ($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$). Pode assim considerar-se a cal aérea como sendo cálcica, quando constituída essencialmente por óxido de cálcio, ou dolomítica [4, 11, 14-16].

O processo de obtenção de cal aérea pode ser dividido em duas fases: calcinação e hidratação ou extinção. A calcinação ocorre a cerca de 900°C, para decompor o carbonato de cálcio, e origina a designada cal viva. A hidratação da cal viva origina hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), conhecido como cal apagada ou hidratada. A cal apagada pode apresentar-se na forma de pasta ou em pó, dependendo da quantidade de água adicionada. A cal aérea endurece lentamente ao ar, por reação com o dióxido de carbono (CO_2), não endurecendo quando em contacto com a água - não possui propriedades hidráulicas [2, 4, 7, 11].

A cal hidráulica é obtida a partir de misturas de calcário e argila (entre 8 – 20% em massa). Endurece em contacto direto com a água e também com o ar. O tratamento térmico, efetuado entre 1000 e 1200°C, promove a reação entre a sílica (e a alumina), aportadas pela argila, com o óxido de cálcio (CaO), formando-se silicato ($\text{SiO}_2\cdot\text{CaO}$) e aluminato de cálcio ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaO}$). Estas fases, também presentes no cimento Portland, têm características

hidráulicas [4, 15, 17, 18]. Do processo de cozedura resulta também uma percentagem de cal viva (óxido de cálcio), entre 3 e 10% (em massa), que é depois convertida em hidróxido de cálcio por hidratação. A presa da cal hidráulica ocorre em duas fases: (i) aérea e (ii) hidráulica. A fase aérea corresponde à carbonatação do hidróxido de cálcio por associação ao dióxido de carbono atmosférico; a fase hidráulica corresponde à hidratação dos aluminatos e silicatos de cálcio com a água adicionada para a amassadura, originando aumento de consistência [4, 7, 15-18].

2.4.2.3. Ligantes de gesso

O gesso é utilizado como ligante, uma vez que a sua produção é económica, mas também porque se molda e se aplica com facilidade, endurecendo rapidamente. O gesso é constituído essencialmente por sulfato de cálcio, sendo extraído da natureza sobre a forma de sulfato de cálcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), podendo este apresentar impurezas como a sílica, alumina e óxido de ferro. A pedra de gesso é submetida a tratamento térmico entre 120 e 160°C, ocorrendo a evaporação parcial da água e formando-se gesso hemi-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), denominado “gesso de Paris” (Plaster of Paris). Com a adição de água o material recristaliza, dando origem ao gesso hidratado inicial. Enquanto o fenómeno de recristalização ocorre, a presa é rápida e forma-se uma estrutura rígida [1, 4, 7].

Se a calcinação do gesso ocorre entre 350 e 600°C, há evaporação total da água e forma-se anidrite (CaSO_4) insolúvel. Para se obter novamente gesso através da hidratação seria necessário a adição de um catalisador como o óxido de cálcio [1, 4, 7].

A elevada utilização aos longos dos anos de ligantes com gesso deve-se à sua abundância, facilidade de obtenção, presa rápida e boa trabalhabilidade, trazendo bons acabamentos. Contudo, o gesso apresenta algumas desvantagens como uma modesta resistência mecânica, dependente ainda da quantidade de água adicionada e do teor e natureza das impurezas. A solubilidade em água impede a sua utilização em espaços exteriores, sendo aconselhável o seu uso no interior de edifícios e em locais secos.

2.4.3. Adjuvantes e aditivos

O objetivo da utilização de adjuvantes e de aditivos é melhorar algumas das propriedades das argamassas, químicas, físicas ou mecânicas. A alteração das propriedades

tanto pode ocorrer no estado fresco (em pasta) como no estado endurecido, e ainda na transição de pasta para sólido [16].

2.4.3.1. Plastificantes

Os plastificantes são adjuvantes utilizados para aumentar a trabalhabilidade da argamassa, permitindo reduzir o teor de água necessário para misturar/amassar o material e para o espalhar depois. De facto, a preparação com o teor mínimo de água, se bem conseguida, gera depois um produto endurecido menos poroso e, conseqüentemente mais consolidado e resistente. Por isso, estes agentes são também designados por agentes redutores de água. A sua função baseia-se na adsorção de catiões por parte das partículas do ligante, que origina repulsão mútua entre as mesmas e causa a sua dispersão na fase aquosa. Os produtos mais utilizados como plastificantes são normalmente ácidos linhossulfonados e hidrocarboxílicos. Os superplastificantes são ainda mais eficazes [1, 2, 4, 16]. Como efeito adverso, regista-se retardamento da presa e desenvolvimento mais lento da resistência mecânica nos períodos iniciais.

2.4.3.2. Aceleradores e retardadores de presa

Como o nome sugere, os aceleradores de presa incrementam a velocidade de endurecimento da pasta e permitem aumentar a resistência mecânica nos períodos iniciais. Esta característica é importante em obras de carácter urgente e em climas frios e húmidos, onde o cimento endurece mais lentamente. Os adjuvantes mais utilizados para esta ação são o cloreto de cálcio ou de sódio, e aluminatos de sódio, que vão interferir na hidratação. A trabalhabilidade é diminuída e o tempo aberto reduz-se. As argamassas ficam mais frágeis à ação de ciclos de gelo-degelo [4, 7, 16, 19, 20].

Ao invés, os retardadores de presa atrasam o processo de endurecimento da pasta e prolongam o processo de hidratação. A trabalhabilidade aumenta e a viscosidade da pasta aumenta mais lentamente com o tempo. Os retardadores são particularmente necessários em climas quentes para promover uma hidratação mais homogénea e completa. Os produtos utilizados como retardadores são normalmente linhossulfonatos de cálcio, de sódio ou ácidos hidrocarboxílicos, ou seja, materiais com ação plastificante [1, 7, 16, 19, 20].

2.4.3.3. Introdutores de ar

Este tipo de adjuvante provoca na argamassa pequenas bolhas de ar, de forma normalmente esférica e com diâmetros entre os 0,02 e 1mm. O princípio de atuação destes adjuvantes baseia-se na formação de uma barreira insolúvel de iões em torno das bolhas, que

evita o seu crescimento exagerado e a sua dissolução [1, 19-21]. As bolhas de ar, relativamente compressíveis, cortam a rede de poros capilares formados no material e impedem o transporte de fluidos. Melhoram dessa forma a capacidade de impermeabilização e a capacidade de acomodação de oscilações dimensionais causadas por ciclos de gelo-degelo. Os agentes introdutores de ar aumentam a trabalhabilidade e homogeneidade das argamassas, permitindo diminuir a quantidade de água de amassadura. Dessa forma, aumenta a resistência à fissuração. Se adicionado em quantidade exagerada, a rede de poros criada origina abaixamento de resistência à compressão e à tração, e pode diminuir a aderência da argamassa aos suportes onde é aplicada. Para além do correto doseamento, o seu efeito depende do tempo e da velocidade de amassadura [1, 4, 16, 19, 21].

2.4.3.4. Hidrófugos

Este género de adjuvantes tem como função diminuir ou mesmo impedir a penetração e a circulação de água nos canais da argamassa, através da redução da tensão capilar dos poros. A redução da capilaridade melhora a capacidade de impermeabilização, aumenta a resistência ao gelo-degelo e minimiza ou retarda o aparecimento de fungos [20].

Os agentes impermeabilizantes ou hidrófugos são normalmente constituídos por partículas insolúveis muito finas que vão ocupar os espaços vazios. Os materiais mais utilizados são ácidos gordos (estearatos de cálcio) e óleo mineral [20].

2.4.3.5. Promotores de aderência

Os promotores de aderência são normalmente constituídos por polímeros sintéticos, sendo comuns o acetato de polivinilo, propionato de vinilo e ácido acrílico. À temperatura de desidratação, estes materiais formam um sólido polimérico, que quando combinado com ligantes hidráulicos aumenta a aderência da argamassa fresca a qualquer substrato. Incrementam também a resistência mecânica e a durabilidade do material, e reduzem a permeabilidade. Estes componentes são utilizados em argamassas de reboco, na aplicação de suporte para pavimentação e, principalmente, em argamassas-cola [1, 4, 11, 21].

2.4.3.6. Fungicidas

Os fungicidas têm como funcionalidade o impedimento da fixação e proliferação de micro-organismos (fungos e bolores) nas argamassas. Atualmente, usam-se compostos orgânicos com base em heterociclos azotados. Quando o reboco é pintado posteriormente, é mais comum adicionar estes adjuvantes à tinta [4, 7, 11, 16, 21].

2.4.3.7. Pigmentos

Os pigmentos são normalmente óxidos metálicos inertes, como o óxido de ferro, de crómio, de cobalto ou de manganês, que quando misturados com a argamassa têm a capacidade de conferir coloração. Em geral adiciona-se um teor de pigmentos inferior a 10% da massa de ligante [1, 4, 7, 16, 21], por questões económicas e para não afetar as propriedades relevantes do material.

2.4.3.8. Fibras

As fibras são utilizadas em argamassas de revestimento, e são normalmente de vidro, de propileno ou de celulose. Com a adição deste material, melhora-se a resistência à tração e compressão, a ductilidade e mesmo a resistência ao fendilhamento. Para exponenciar a ação das fibras é necessário assegurar uma distribuição homogénea das mesmas e evitar a criação de microfissuras na região de interface com a pasta. As fibras influenciam a hidratação e carbonatação do material. Melhoram a coesão e a resistência à penetração de água [1, 2, 4, 21].

2.4.3.9. Cargas leves

As cargas leves, de forma geralmente granular, são utilizadas com o objetivo de diminuir a massa volúmica das argamassas. As cargas leves mais frequentes são o poliestireno expandido, a vermiculite expandida, a perlite expandida e grânulos de argila ou vidro expandido [4, 21].

A vermiculite é um mineral constituído por inúmeras e sobrepostas finas lamelas hidratadas de silicatos de alumínio-magnésio-ferro, tendo a fórmula química $(\text{MgFeAl})_3(\text{Al,Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. A vermiculite, depois de extraída, é fragmentada e sujeita a um tratamento térmico a cerca de 1000°C, que gera expansão por abertura das lamelas causada pela libertação de água.

A vermiculite tem elevada capacidade de absorção de água, dada a sua natureza hidrofílica, elevado volume de vazios e área superficial específica. Pode absorver até cerca de 7 vezes o seu peso. Estas propriedades foram estudadas em trabalhos anteriores [4, 11]. A vermiculite apresenta elevada estabilidade química, baixa densidade (80 – 120 Kg/m³), proporciona bom isolamento acústico (redução de ruídos até cerca de 62%), isolamento térmico (entre 60 e 70% superior ao betão convencional). Para além da construção, aplica-se na indústria de refratários e petrolífera, na agricultura, e em tratamento ambiental (filtração/adsorção de óleos) [4, 22].

A introdução de cargas leves pode deteriorar as propriedades mecânicas da argamassa, se aumentarem a quantidade de água de amassadura. Incrementam a retração durante a presa e diminuem a resistência aos ciclos de gelo-degelo [4, 11, 21].

2.4.3.10. Agentes expansivos

O uso de agentes expansivos tem como finalidade diminuir a retração durante a presa e endurecimento da argamassa, melhorando a homogeneidade dimensional do material. Os pós de alumínio aumentam de volume gerando pequenas bolhas gasosas. Como é óbvio, requer-se controlo do teor a adicionar, porque a resistência mecânica do produto endurecido é enfraquecida, em simultâneo com a densidade [4, 7, 11, 16].

2.4.3.11. Poliacrilato de sódio

O poliacrilato de sódio apresenta como principal característica grande afinidade pela água, o que o faz pertencer à classe dos polímeros superabsorventes, tendo capacidade de absorver até cerca de 800 vezes o seu peso em água. A absorção de água por parte do poliacrilato de sódio ocorre por osmose, isto é, a água desloca-se da zona com menor concentração de iões de sódio (zona exterior do polímero) para a zona com maior concentração de iões (interior do polímero), através da pressão osmótica. O polímero em contacto com a água faz com que o sódio se dissocie do grupo carbonilo, criando dois iões, o carboxílico e o sódio. A repulsão dos grupos carboxilos deve-se à sua carga negativa, fazendo com que a cadeia se desenrole, permitindo assim a penetração da água, formando um gel (Figura 2 b)). A formação de gel ocorre até ao ponto de equilíbrio [4, 23-25].

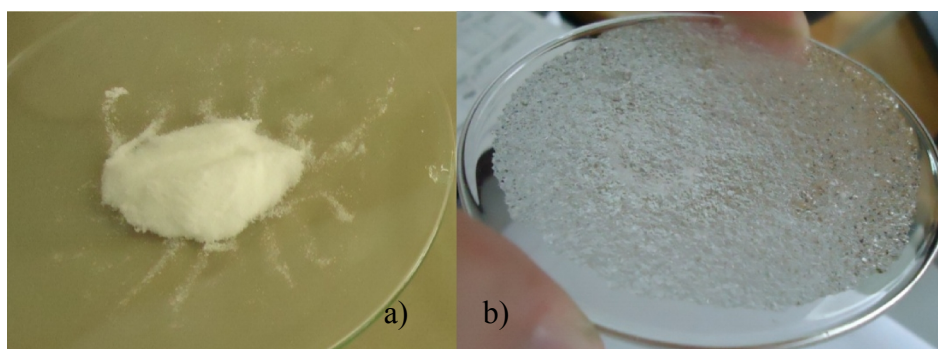


Figura 2: Poliacrilato de sódio em pó – a) e poliacrilato de sódio em gel – b).

Alguns autores comprovaram que, de acordo com o teste da NordTest, o poliacrilato de sódio teve classificação de “excelente”, sendo considerado um material aplicável em argamassas para o controlo de humidade em compartimentos fechados [4, 26].

2.5. Materiais Porosos

Os materiais normalmente utilizados na construção civil são porosos, estando grande parte desta porosidade interligada. Estas características permitem que possam fixar humidade existente no ar e também libertá-la. A humidade pode fixar-se nos materiais por adsorção na fase de vapor existente no ar, ou por capilaridade quando (i) em fase líquida ocorre contacto com o material sólido e (ii) quando ocorre condensação de vapor de água no interior dos materiais ao se atingir o ponto de saturação. A quantidade de água captada pelos materiais depende da natureza dos seus constituintes, volume, forma, organização e tamanho dos poros, condições termodinâmicas (pressão e temperatura) e da taxa de ventilação do edifício [4, 27, 28].

2.5.1. Humidade

A variação dos valores de humidade relativa existentes em locais fechados pode constituir um problema significativo para a saúde das pessoas e mesmo para a própria estrutura do edifício. O estudo deste tema ganhou impulso nos últimos anos, há medida que o ser humano estendeu a sua permanência em ambientes fechados, de maneira a diminuir o impacto das variações de humidade, principalmente durante a época de inverno em países do hemisfério norte, onde é mais frequente que o valor médio de humidade relativa passe dos 40% [4, 29].

Os valores elevados de humidade nas estruturas acarretam problemas, podendo diminuir a sua durabilidade e proporcionando o ambiente favorável ao surgimento de fungos e de bolores (ver Figura 3).



Figura 3: Humidade em excesso visível na parede.

Atualmente, em meios urbanos, as pessoas passam cerca de 90% do seu tempo em ambientes interiores, em casa, no trabalho, em creches ou em edifícios públicos. O excesso de humidade em ambiente estático pode causar problemas de saúde, de natureza respiratória (tosse, asma), irritação dos olhos e da pele e mesmo alergias definitivas [30-32].

Em alguns compartimentos ocorrem por vezes zonas onde o clima é um pouco diferente do resto do edifício, sendo consideradas microclimas. Estas zonas surgem com maior frequência junto às pontes térmicas, paredes mal isoladas e nas zonas adjacentes ao mobiliário, onde ocorre uma deficiente ventilação. Aí o valor de humidade tende a ser superior, particularmente na época de inverno [4, 30, 31].

O valor da humidade no interior de um edifício depende de vários fatores: do clima no exterior do edifício, da taxa de ventilação no compartimento, da temperatura, da capacidade que os materiais utilizados na construção possuem para controlar a humidade, da presença ou ausência de plantas e ocupantes, e dos materiais ou objetos expostos no interior. Materiais como a madeira, têxteis (tapetes, cortinados) e papel influenciam o valor da humidade do edifício/compartimento [4, 29, 31-33].

Dada a presença de vários fatores (Figura 4) a taxa de ventilação torna-se essencial para controlar o valor de humidade, evitando excessos prolongados.

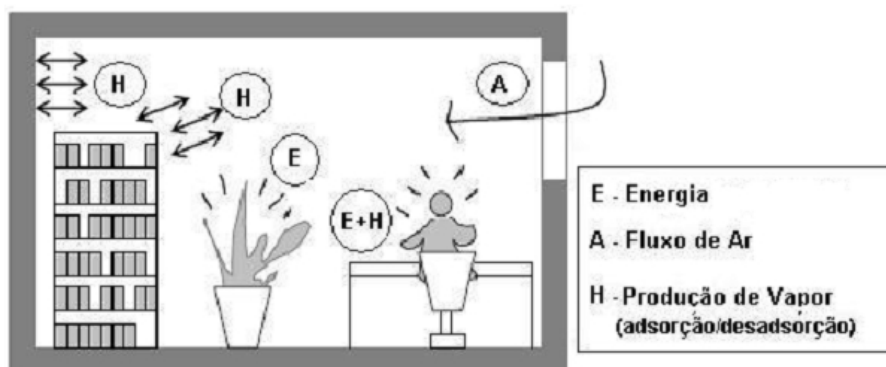


Figura 4: Balanço da humidade num compartimento [34].

2.5.2. Higroscopicidade dos materiais porosos

A higroscopicidade é a capacidade que os materiais têm em captar as moléculas de água, por adsorção, e depois restituí-las ao meio envolvente, quando o valor da humidade ambiente diminui. O fenómeno de higroscopicidade deve-se às forças intermoleculares ou de

Van der Waals que atuam sobre as moléculas do vapor de água ao nível da interface sólido-fluído no interior dos poros [4, 27, 28, 34].

Os materiais de construção podem apresentar distintos graus de higroscopicidade. Há materiais não-higroscópicos, isto é, que não sofrem variação de massa perante alterações da humidade ambiente. Mas existem materiais higroscópicos ou mesmo super-higroscópicos, isto é, têm afinidade para a fixação/libertação de quantidade significativa de água (Figura 5).

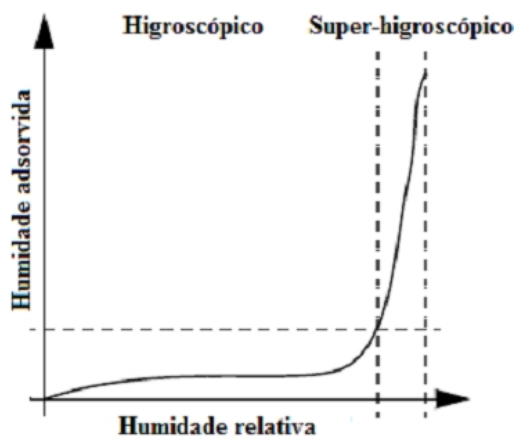


Figura 5: Humidade adsorvida por materiais porosos higroscópicos [4].

Os materiais higroscópicos respondem numa vasta gama de valores de humidade relativa, entre 0% a 95%, ocorrendo transporte de vapor de água. Só se observam condições de equilíbrio após manutenção (prolongada) em condições estáveis de temperatura, pressão e humidade relativa do meio. Os materiais super-higroscópicos são sensíveis também em ambientes com humidade relativa superior a 95%, sendo privilegiado o transporte em fase líquida através da condensação capilar [4, 27, 28, 34, 35].

2.5.3. Adsorção e desadsorção de humidade

Como antes se disse, os materiais higroscópicos adsorvem moléculas de água. Em materiais porosos podem-se diferenciar três fases durante o processo de fixação de água: (i) adsorção monomolecular, (ii) adsorção plurimolecular e (iii) condensação capilar. A adsorção monomolecular (Figura 6 a)) consiste na fixação de uma camada de moléculas de água sobre a superfície dos poros. No caso da adsorção plurimolecular estão envolvidas várias camadas de moléculas de água, associadas à primeira camada (Figura 6 b)). A condensação capilar ocorre quando o diâmetro do poro é pequeno ($2E^{-9}$ a $20E^{-9}$ m) e o ponto de saturação está

próximo, o que leva à formação de menisco, isto é, ocorre junção das camadas plurimoleculares [4, 11, 27, 28].

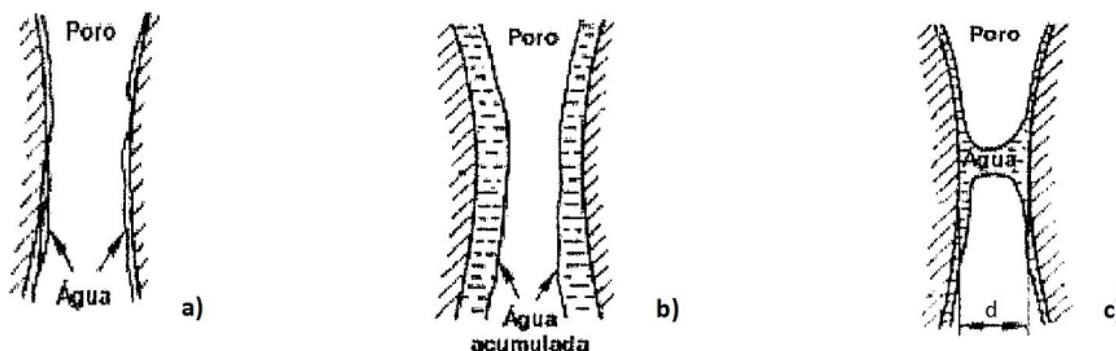


Figura 6: Etapas do processo de adsorção de moléculas de água, onde: a) - adsorção monomolecular, b) - adsorção plurimolecular e c) - condensação capilar [11].

Na Figura 7 é possível observar toda a zona higroscópica até ao início da condensação capilar. A quantidade de humidade no corpo poroso pode ir de zero, quando se encontra em ambientes onde a humidade relativa é quase nula, até ao ponto máximo de absorção de humidade. Este ponto ocorre quando os materiais estão sujeitos a humidades relativas muito elevadas, superiores a 95%, e todos os espaços vazios estão saturados de água. Havendo porosidade fechada que não é preenchida com água, não se atinge o valor máximo de saturação, uma vez existem espaços vazios que ficam por preencher [4, 11, 27, 28].

O processo de eliminação de humidade num material poroso saturado exposto a uma atmosfera cuja humidade relativa é inferior (secagem) ocorre por desadsorção em duas fases distintas: na primeira, a água é transportada por capilaridade até à superfície, através dos poros de maior dimensão, onde vai ser evaporada para o meio ambiente; na segunda fase, ocorre a remoção das moléculas de água por difusão superficial através dos poros de menor dimensão. A libertação de água decorre até que se atinja o equilíbrio com a atmosfera envolvente [4, 11, 34].

Os materiais higroscópicos normalmente utilizados na construção civil têm um comportamento característico de não coincidência das curvas higroscópicas nas fases de adsorção (humidificação) e desadsorção (libertação de humidade) de vapor de água. Este fenómeno é designado de *histerese* (Figura 8), mas para caracterizar a capacidade de retenção de humidade é normalmente apenas considerada a fase de adsorção.

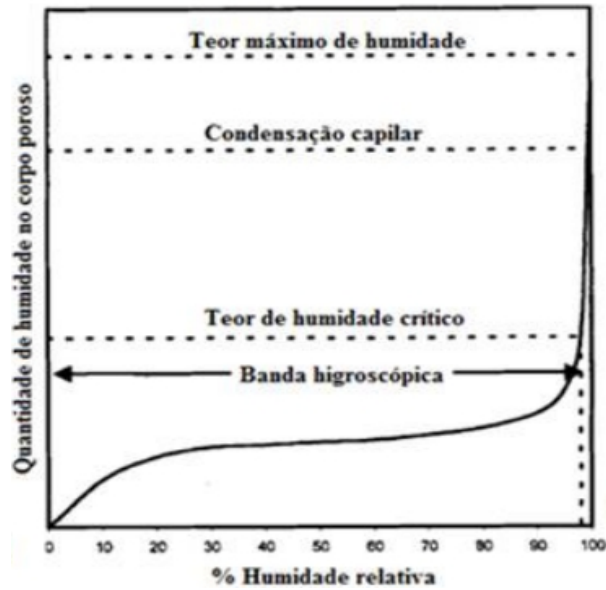


Figura 7: Curva de adsorção isotérmica, temperatura constante em função da variação da humidade relativa [4].

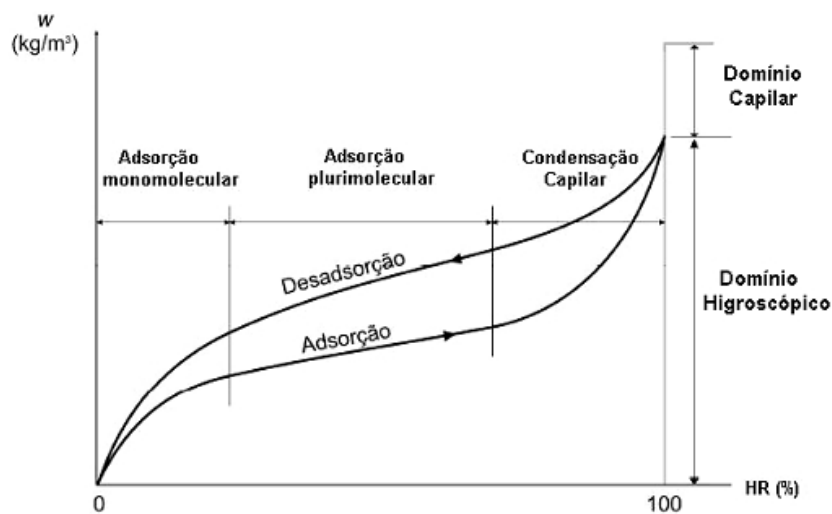


Figura 8: Comportamento higroscópico de materiais porosos, expresso pela quantidade de humidade por unidade de volume em função da humidade relativa [34].

Ainda não é possível afirmar com certeza a razão da ocorrência do fenómeno de *histerese*. No entanto, são referenciadas duas hipóteses de interpretação. A primeira considera a diferença entre os ângulos de contacto da água com os poros na fase de condensação capilar. Esta diferença corresponde ao “avanço” do menisco na fase em adsorção, distinto do “recuo” na fase de desadsorção, uma vez que nesta fase o ângulo entre o poro e o menisco é menor ao observado na fase de adsorção. Isto porque a superfície do poro quando humedece dificulta a libertação do vapor de água na fase de condensação capilar. A segunda hipótese considera o

designado “efeito do frasco de tinta”, uma vez que na fase de adsorção a velocidade de saturação é controlada pelos poros de maior dimensão, enquanto na desadsorção, são os poros pequenos que controlam a velocidade de libertação, sendo esta naturalmente menor (declive inferior) [4, 11, 27, 28, 34, 35]. Importa ainda indicar que a temperatura faz variar as curvas higroscópicas [28].

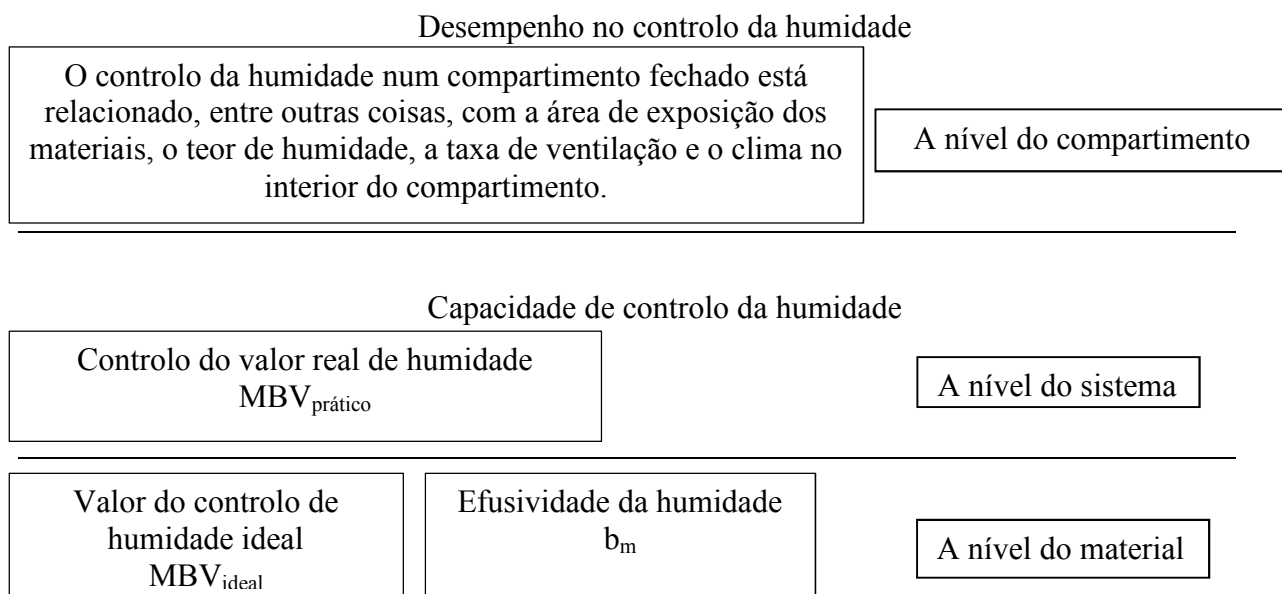
2.6. Avaliação da capacidade de controlo de humidade em argamassas

Tem vindo a ser estudada, já há algum tempo, a capacidade dos materiais de construção, normalmente utilizados no interior de edifícios, em controlar passivamente as variações de humidade sazonais ou diárias. Entretanto, surgiram dois métodos de avaliação da adsorção e desadsorção da humidade: o Japonês (JIS A 1470–1) em 2002 e o método NordTest, em 2003, na Dinamarca. A maioria dos investigadores nesta área tem utilizado o método NordTest, pelo que neste trabalho também será adotado. O ensaio NordTest quantifica a massa de água que é transportada para o interior ou removida para o exterior da superfície de um material, durante um período de tempo, quando sujeito a variações do valor da humidade relativa do meio envolvente, sendo expressa em $[(Kg/(m^2 \cdot \%HR))]$ [4, 26, 36, 37].

É um teste, tal como o japonês, isotérmico, ou seja, a amostra é colocada numa câmara climática e é sujeita a variações cíclicas de humidade relativa, registando-se a variação de massa. Os dois métodos divergem no tempo de exposição aos ciclos de humidade, na espessura da amostra e na forma de interpretação dos resultados. No método NordTest, as amostras são sujeitas a um ciclo diário de 8 horas com humidade relativa de 75% e 16 horas com humidade mais baixa, de 33%. Procura-se assim simular o tempo de exposição de uma pessoa num compartimento fechado. No método, a medida de classificação designa-se MBV (Moisture Buffer Value) [4, 26, 36, 37].

2.6.1. Diferentes níveis de controlo de humidade

Num compartimento fechado, o controlo das variações diárias de humidade relativa pelos materiais porosos pode ser dividido em três níveis: a nível do compartimento, do sistema e do material utilizado, como se pode verificar na figura seguinte.



Análise da capacidade de controlo segundo as propriedades dos materiais em condições estacionárias (densidade, porosidade, etc).

Figura 9: Descrição do controlo de humidade em compartimentos fechados [29, 38].

2.6.2. Efusividade da humidade

A forma teórica de expressar a taxa de humidade absorvida pelo material, quando este é sujeito a um aumento do valor de humidade relativa do meio envolvente, é a efusividade, expressa em $[\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{1/2}]$. A equação para o cálculo do valor da efusividade da humidade (b_m) é dada por:

$$b_m = \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \rho_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial \varphi}}{p_s}} \quad (1)$$

onde δ_p é a permeabilidade ao vapor de água, em $[\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$, ρ_0 é a densidade do material seco, em $[\text{kg}/\text{m}^3]$, u é o teor de humidade, em $[\text{kg}/\text{kg}]$, φ é a humidade relativa, adimensional, e p_s é a pressão de vapor de saturação, expressa em $[\text{Pa}]$. O valor da pressão de vapor de saturação é dependente do ensaio, já os outros parâmetros da equação são propriedades do material utilizado. A determinação do valor de efusividade ocorre em condições de equilíbrio, de pressão de vapor de saturação, taxa de ventilação e temperatura [4, 11, 36-38].

2.6.3. MBV ideal

O cálculo do valor de MBV_{ideal} , expresso em $[Kg/(m^2.\%HR)]$, permite avaliar a quantidade de água absorvida ou libertada por um material poroso, quando este é sujeito a variações do valor de humidade relativa. Através da equação seguinte é possível determinar o MBV_{ideal} :

$$MBV_{ideal} = 0,00568 \cdot p_s \cdot b_m \cdot \sqrt{t_p} \quad (2)$$

onde p_s é a pressão de vapor de saturação, em [Pa], b_m é o valor da efusividade de humidade, em $[kg/m^2.Pa.s^{1/2}]$, e t_p corresponde ao período, em segundos, em que ocorre libertação/absorção de humidade. O valor de MBV_{ideal} é utilizado muitas vezes para estimar o comportamento teórico do material, sendo este valor dependente do valor da efusividade da humidade, o que permite obter um valor aproximado do $MBV_{prático}$ [4, 11, 36, 37].

2.6.4. MBV prático

O valor de $MBV_{prático}$ é obtido de modo experimental e indica a quantidade de água transportada para o material por unidade de área exposta ao ambiente circundante, durante um período de tempo em que se induzem variações da humidade relativa. O valor de $MBV_{prático}$ é expresso em $[kg/(m^2.\%HR)]$. Neste método a amplitude de variação da humidade relativa é de 42% e segue o padrão mostrado na Figura 10 [4, 11, 26, 36, 38, 39].

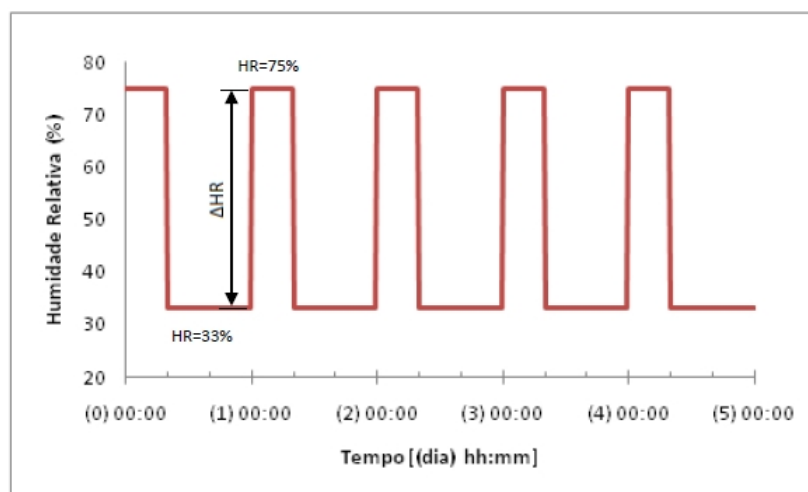


Figura 10: Ciclo experimental de variação de humidade relativa no NordTest, para medição do valor de $MBV_{prático}$ [4].

O valor de $MBV_{prático}$ depende da espessura da amostra, da transferência de massa na superfície e da existência de revestimento superficial [4, 36].

2.6.5. Classificação dos materiais pelo método NordTest

O método NordTest classifica os materiais de acordo com o valor de $MBV_{prático}$ (ver Tabela 1) em intervalos que servem de partida para comparação entre várias formulações de argamassas e de diferentes materiais.

Tabela 1: Intervalos das classificações de $MBV_{prático}$ [36].

Classe do $MBV_{prático}$	$MBV_{prático}$ mínimo	$MBV_{prático}$ máximo
	[(g/(m ² .%HR)) @ 8/16h]	
Insignificante	0	0,2
Limitado	0,2	0,5
Moderado	0,5	1,0
Bom	1,0	2,0
Excelente	2,0	...

Os valores de $MBV_{prático}$ de distintos materiais de construção civil podem ser observados na Tabela 2.

Neste trabalho procura-se obter argamassas com comportamento considerado no mínimo como BOM.

Tabela 2: Valor de $MBV_{prático}$ de vários materiais [36].

Material	$MBV_{prático}$ [g/(m ² .%HR)]
Contraplacado	1,16
Betão	0,38
Gesso	0,64
Tijolo	0,47
Betão celular	1,04
Madeira revestida com verniz	0,46

Para além da função de controlo passivo de humidade, procura-se hoje adicionar novas funcionalidades às argamassas, bem como a outros materiais/produtos de uso comum. A seguir descreve-se, de forma relativamente resumida, o efeito de despoluição por fotocatalise e a ação de modulação térmica passiva. Estão disponíveis no mercado distintos materiais que podem responder aos desafios, sendo a sua incorporação em argamassas objeto de estudo e

otimização de formulações que compatibilizem as novas funções com as desejáveis propriedades a que o material tem de continuar a responder (ex. resistência mecânica), sem esquecer a manutenção da trabalhabilidade do material.

3. ARGAMASSAS COM PROPRIEDADES FOTOCATALÍTICAS

Foi acerca de 80 anos que se descobriu o fenómeno de fotocatalise, mas só nos finais dos anos 50 do século passado se começaram a processar nanomateriais, com propriedades exponenciadas pela elevada área superficial. São semicondutores os materiais com potencial para fotocatalise: óxidos (TiO_2 , ZnO , WO_3 , Ag_2O) e sulfuretos (ZnS , CdS). O TiO_2 é o material mais investigado e utilizado [40, 41].

Um fotocatalisador deve apresentar elevada atividade fotocatalítica, baixo custo, não ser tóxico, ser estável química e biologicamente, não sofrer corrosão e apresentar capacidade de absorção de radiação visível e próximo da ultravioleta para aplicações em ambiente real – radiação com comprimento de onda até 387 nm [42].

O uso industrial de TiO_2 iniciou-se pelas tintas, como agente que minimiza a deterioração ou desgaste da cor. Depressa se estendeu a outros sectores e produtos: indústria automóvel (autolimpeza de espelhos), agricultura (eliminação de pesticidas), medicina (auto-esterilização, tratamento de cancro), energia solar, purificação e tratamento da água, construção civil, mais propriamente em tintas, telhas cerâmicas e em argamassas, para purificação do ar através da degradação de poluentes (COV e NO_x)[43, 44].

Nos últimos 20 anos tem vindo a aumentar a preocupação com a qualidade do ar no interior dos edifícios, tanto mais que tem aumentado a duração das pessoas em espaços confinados (escritórios, habitações). Por isso, o desenvolvimento de argamassas ou tintas com funções de autolimpeza e de degradação de poluentes gasosos ganhou relevância [41, 45, 46]. No presente trabalho, o agente ativo é suportado no material/argamassa, ao invés de ser usado na forma de pó em suspensão – aproximação clássica e mais testada.

3.1.1. Descrição do processo fotocatalítico

O fotocatalisador mais utilizado é o *Aeroxide*[®] *P25* (nome comercial), fabricado originalmente pela Degussa, sendo aqui também escolhido. Para além do comportamento fotocatalítico, é relativamente barato, atóxico e estável/durável [47-49].

O processo fotocatalítico tem início quando as partículas de um semicondutor, por exemplo TiO_2 , são irradiadas por fotões com comprimento de onda suficiente para excitar os eletrões do nível da banda de valência para a banda de condução, gerando assim buracos na

banda de valência (Figura 11). Os buracos apresentam forte poder oxidante e os eletrões forte potencial reductor [50, 51].

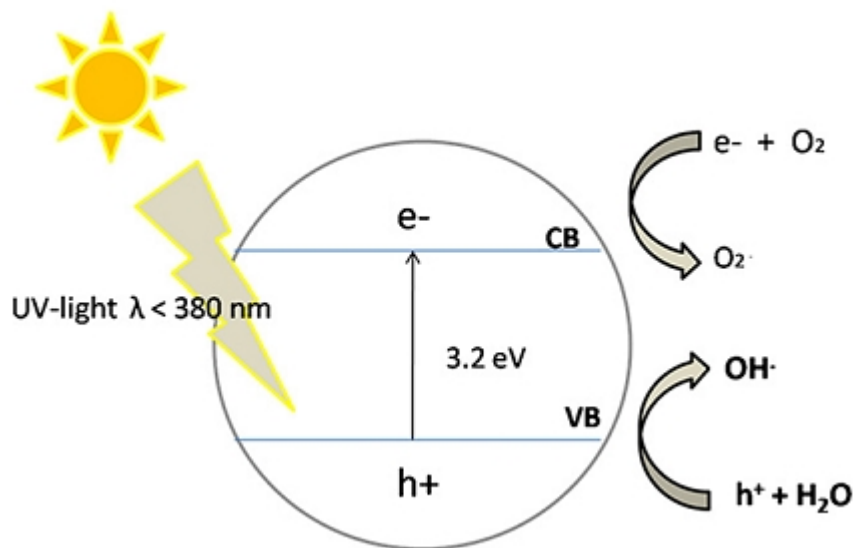
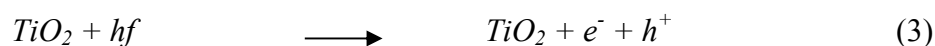


Figura 11: Esquema ilustrativo do processo de fotocatalise por partículas de TiO_2 , onde VB é a banda de valência e CB a banda de condução [52].

Os buracos reagem com as moléculas de água que circundam as partículas de titânia, criando radicais hidroxila. Os eletrões da banda de condução reagem com o oxigénio e originam radicais de superóxido (O_2^-). As equações seguintes representam as reações existentes após irradiação.



onde hf é a energia necessária para que haja transferência do eletrão da banda de valência para a banda de condução, e^- é o eletrão da banda de condução e h^+ é a lacuna existente na banda de valência [50, 53-55].

Os radicais livres resultantes da reação fotocatalítica vão entrar em contacto com os poluentes presentes no ar e reagir, transformando-os em produtos inofensivos para o ambiente. Os produtos resultantes das reações ficam depositados na superfície e são removidos pela circulação de ar existente no interior dos edifícios [47].

3.1.2. Deterioração de poluentes do ar interior

Os compostos orgânicos voláteis (COV) são os poluentes mais utilizados para aferir a capacidade de degradação de um determinado fotocatalisador, dada a sua prevalência em situações comuns e relativa perigosidade. Se a reação de degradação se completar resultam produtos neutros, tais como CO_2 e H_2O . No caso específico das argamassas, o CO_2 produzido pode incrementar o processo de carbonatação, o que requer análise cuidada [40, 47, 56].

A oxidação de NO_x é outra reação estimulada por fotocatalise. O contato e reação com radicais OH^\cdot e O_2^\cdot originam NO_2 e HNO_3 , de acordo com as seguintes equações:



Os compostos orgânicos voláteis COV, ao reagirem com os radicais OH^\cdot e O_2^\cdot , vão originar CO_2 e H_2O [57]. Como demonstra a equação o seguinte:



A Figura 12 ilustra o processo fotocatalítico na degradação de NO_x e de COV's.

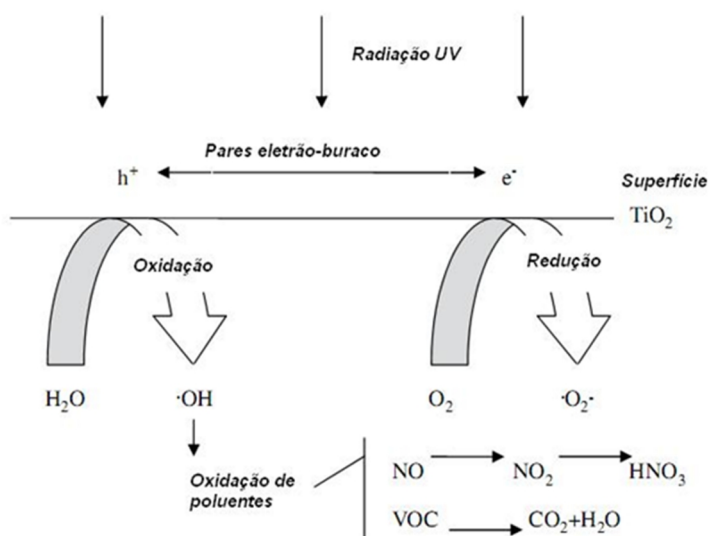


Figura 12: Ilustração do mecanismo fotocatalítico na remoção de poluentes gasosos [58].

A eficiência (η) do processo de degradação pode ser expressa pela equação:

$$\eta = 1 - \frac{C_{final}}{C_{inicial}} \times 100 \quad (10)$$

Onde C_{final} é a concentração final e $C_{inicial}$ é a concentração inicial de poluente em [$\mu\text{g.m}^{-3}$] [41, 50, 54, 55, 58, 59].

3.1.3. Fatores que influenciam a degradação de poluentes.

A eficácia da degradação de poluentes em meios interiores pelo processo fotocatalítico depende das condições operativas concretas. São importantes parâmetros como a intensidade da radiação e condições de iluminação, podendo esta ser natural ou artificial desde que o comprimento de onda não ultrapasse 385nm [53, 58]. A gama de temperaturas que garante melhor eficiência compreende 20 a 80°C [60-63], a humidade relativa não deve ultrapassar 50% [60, 61, 64]. A concentração do(s) agente(s) poluente(s) não deve ser elevada para que os produtos resultantes da degradação não dificultem o contato entre os locais ativos da titânia e o(s) poluente(s) [60, 65, 66]. Se a quantidade de catalisador ou a sua área de exposição for muito elevada ocorre a recombinação dos eletrões-buraco, com diminuição da eficiência do processo. O mesmo acontece se o tamanho das partículas do catalisador for inferior a 10 μm [41, 45, 66].

4. ARGAMASSAS PARA CONTROLO TÉRMICO

Uma das preocupações ancestrais na construção de edifícios foi a proteção contra agentes atmosféricos, em particular a chuva e a temperatura extrema (calor ou frio). Os materiais e a estrutura tinham que assegurar todo o conforto possível, uma vez que não era comum o uso de formas ativas de aquecer e, sobretudo, arrefecer, o ar ambiente interior. Hoje é comum o uso de equipamentos de climatização, ainda que se questionem os custos, económicos e ambientais, do uso de combustíveis, particularmente os de origem fóssil. Procura-se agora desenvolver soluções mais equilibradas, sob a designação de construção sustentável, que minimizem o recurso aos meios ativos de climatização [67, 68]. Estes princípios voltam a valorizar o papel das estruturas e materiais usados na construção. Para além do acréscimo de isolamento térmico, em geral conseguido com o acréscimo de porosidade ou aumento de espessura (esta solução penalizadora em termos de gastos de material e de minimização de espaço), procuram-se materiais com capacidade de armazenar/libertar calor em função da temperatura ambiente.

4.1. Armazenamento de energia térmica

A temperatura sentida no interior dos edifícios tem grande influência no padrão de conforto. A temperatura interior depende de vários fatores como a temperatura exterior, humidade relativa, velocidade do ar no interior dos edifícios, incidência do sol e isolamento do edifício. A escolha dos materiais e o dimensionamento da estrutura são fatores importantes para uma melhor eficiência energética.

O armazenamento de energia térmica depende da temperatura ambiente e da capacidade dos materiais em absorver o calor. Os materiais de armazenamento de calor podem ter uma participação do tipo passiva ou ativa. Um edifício é uma fonte de calor do tipo passivo (calor sensível), uma vez que depende da energia solar para absorver calor durante o período em que há radiação solar. A energia solar armazenada é posteriormente libertada durante a noite, fazendo com que a temperatura do interior diminua tardiamente, retardando a utilização de sistemas auxiliares. Os materiais com armazenamento do tipo ativo (calor latente), têm na sua constituição materiais de mudança de fase (PCM). De fato, é a mudança de fase o processo responsável pela absorção e libertação de calor, que permitem diminuir as oscilações

térmicas. Desta forma, aumenta-se a quantidade de calor armazenada por unidade de massa, obviando a necessidade de aumentar a espessura da estrutura [68, 69].

Na Tabela 3 compara-se o armazenamento de calor sensível da pedra e da água com o armazenamento de calor latente de PCM's, de natureza orgânica e inorgânica. Resulta óbvio o aumento de calor armazenado de forma latente [70]. Verifica-se também que é necessário maior quantidade de massa de água e de rocha do que de PCM, para uma certa quantidade de calor.

Tabela 3: Capacidade de armazenamento de calor de diferentes materiais [70].

Propriedade	Água	Rocha	PCM _{orgânico}	PCM _{inorgânico}
Densidade (kg/m ³)	1000	2240	800	1600
Calor latente (kJ/m ³)	-	-	152	368
Armazenamento relativo em massa	6	15	1,25	1
Armazenamento relativo em volume	4	11	2,5	1

O uso de PCM's nos espaços vazios da estrutura, dos blocos ou tijolos usados na construção, em sistemas de aquecimento solar e em pisos radiantes aquecidos têm vindo naturalmente a aumentar. Há também estudos de incorporação em argamassas [68, 69, 71].

4.2. Materiais de mudança de fase (PCM)

Os materiais de mudança de fase têm como principal propriedade o armazenamento de energia sob a forma de calor latente. Absorvem (reação endotérmica) e libertam (reação exotérmica) calor quando sofrem mudança de estado, respetivamente de sólido para líquido e líquido-sólido [69, 71].

Os estudos iniciais de armazenamento de calor incidiram sobre a hidratação e desidratação de sais hidratados, constituindo os PCM's inorgânicos. O uso de materiais orgânicos, como parafinas e ceras, revelou-se mais eficaz sobretudo para aplicações em condições próximas das ambientais, atuando entre -5°C e 190°C [68, 69, 72]. Naturalmente, na climatização de edifícios ou de artigos têxteis devem usar-se materiais que mudam de fase entre 18 e 65°C.

4.2.1. Requisitos técnicos

Os materiais de mudança de fase devem responder a vários requisitos técnicos tais como:

- i. Propriedades termodinâmicas
 - A temperatura de fusão deve ser a mais apropriada para o tipo de aplicação desejada, de modo a que haja troca de calor no intervalo de temperatura pretendida.
 - Elevado calor latente de fusão por unidade de volume.
 - Alta condutividade térmica, em ambas as fases sólida e líquida, para facilitar a transferência de calor com o meio.
 - Baixa variação do volume e da pressão durante as mudanças de fases, mantendo assim a estabilidade em termos de resistência mecânica e diminuição dos problemas em termos de contenção.
 - Fusão congruente, para manter constante a capacidade de armazenamento de calor nos ciclos de fusão e solidificação.

- ii. Propriedades Cinéticas
 - Densidade reduzida e pouco variável.
 - Sobrearrefecimento reduzido ou nulo durante a solidificação.

- iii. Propriedades Químicas
 - Estabilidade química.
 - Reversibilidade completa depois de cada ciclo.
 - Ausência de decomposição química ao fim de elevado número de ciclos de aquecimento/arrefecimento.
 - Não ser corrosivo para com os outros materiais de construção.
 - O material não deve ser inflamável, tóxico (nem para a saúde nem para o ambiente) ou explosivo.

- iv. Fatores Económicos
 - Baixo custo.
 - Elevada disponibilidade.

- Reciclável, se possível.

A produção de PCM deve cumprir os requisitos técnicos acima descritos [68].

4.2.2. Problemas associados aos PCM's

Sobrarrefecimento

O sobrarrefecimento do PCM ocorre quando não há uma solidificação homogénea logo abaixo da temperatura de transição de estado líquido para sólido. O processo de solidificação de alguns constituintes não ocorre a uma temperatura precisa, mas numa gama abaixo do ponto de fusão. Este atraso pode fazer com que os materiais nunca cheguem a libertar todo o calor que possuem. Este fenómeno é mais comum nos sais hidratados, PCM's inorgânicos, uma vez que os orgânicos utilizam por norma parafinas que solidificam mais rapidamente [70, 73].

Resistência ao fogo

Os PCM's orgânicos são naturalmente mais suscetíveis ao risco de inflamabilidade. De facto, as ceras de parafina entram facilmente em combustão, podendo restringir a sua utilização em certas aplicações. O adequado encapsulamento da parafina num invólucro inorgânico é uma forma eficaz de minimizar/resolver esta limitação.

Separação de fases

A separação de fases faz com que a elevada densidade de armazenamento de calor inicial seja difícil de manter depois de vários ciclos. Este fenómeno ocorre uma vez que o PCM é constituído por diferentes materiais (água e sal ou dois tipos de sais) e a temperatura de solidificação de cada material pode ser distinta. A diminuição da eficiência ocorre porque a matriz do PCM não consegue solidificar homogeneamente e voltar a ter as mesmas características iniciais, gerando irreversibilidade parcial do processo e o fenómeno de sobrarrefecimento antes descrito. Esta desvantagem pode ser contrariada pelo aumento da viscosidade, que dificulta a separação de fases. Este fenómeno é mais frequente em PCM's inorgânicos [70].

Custo

Atualmente, os PCM's desenvolvidos apresentam elevado custo relativo, que eventualmente pode diminuir se o seu uso se generalizar.

4.3. Tipos de PCM

Como se depreende do que foi dito antes, os materiais de mudança de fase podem ser divididos em duas categorias, consoante a sua composição: orgânicos e inorgânicos.

4.3.1. PCM orgânicos

Os materiais de mudança de fase orgânicos são por norma quimicamente estáveis, não são corrosivos, não são tóxicos mas podem ser inflamáveis. Os PCM's à base de parafina comercial têm um custo relativamente acessível, são produzidos em larga escala e apresentam uma vasta gama de temperaturas de fusão, de 20°C até cerca de 70°C. Não sofrem sobrearrefecimento e são quimicamente inertes. São compatíveis com materiais de construção, não sofrem segregação de fases, têm fusão congruente e podem mesmo ser reciclados. A sua composição química não representa qualquer risco ambiental e nem de saúde. No entanto apresentam como grande limitação uma menor condutividade térmica.

Para além das parafinas, usam-se ácidos gordos, ésteres e álcoois. Os ácidos gordos, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$, são os mais comuns de entre aqueles, ainda que sejam mais caros que as parafinas. Fundem a temperaturas inferiores e de forma congruente (não sofrem sobrearrefecimento) e são biodegradáveis. No entanto, as mudanças de fase provocam pequenas variações de volume [71, 74-76].

4.3.2. PCM inorgânicos

Os PCM's inorgânicos mais comuns são sais hidratados, sendo mais conhecido o sal de Glauber ou $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Têm elevada condutividade térmica, elevado calor de fusão, elevada capacidade volúmica de armazenamento de calor, não são inflamáveis e podem ser adquiridos a preços relativamente baixos. Sofrem, no entanto, segregação de fases, dada a sua composição multicomponente e, em consequência, ocorre sobrearrefecimento. Podem ter efeito corrosivo perante a maioria dos metais comuns e sofrem elevada variação de volume

durante a mudança de fases, que podem comprometer a estabilidade das estruturas na qual estão inseridos [70, 71, 74, 76, 77].

4.3.3. Eutéticos

Os materiais designados eutéticos são uma mistura sólida de dois ou mais componentes, que normalmente apresentam fusão e cristalização congruente. Os eutéticos podem ser divididos em três grupos: orgânico – orgânico, inorgânico – inorgânico e inorgânico – orgânico. Alterando a quantidade relativa dos constituintes consegue alterar-se o ponto de fusão. Este grupo de PCM's apresenta elevado calor latente, boa estabilidade química, não são corrosivos nem tóxicos, têm elevada condutividade térmica, baixo custo relativo e têm pontos de fusão num intervalo de 18 a 51°C. O seu uso é ainda muito restrito, uma vez que estão em fase de estudo e desenvolvimento [68, 71, 78].

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A elaboração do trabalho experimental dividiu-se em três fases: preparação das argamassas, caracterização da argamassa em estado fresco e endurecido e, por último, caracterização das propriedades funcionais das amostras.

5.1. Argamassa padrão e argamassas técnicas

A argamassa padrão (P) utilizada foi fornecida pela empresa Saint Gobain Weber Portugal, Argamassas Industriais, S.A. (ver Tabela 4), à qual se adicionaram novos elementos para exponenciar as funções desejadas.

Tabela 4: Composição da argamassa padrão.

Materiais constituintes	Argamassa padrão
Cal área hidratada	8%
Cimento (Tipo 1)	8%
Areia de sílica (160 a 630 μm) Carbonato de cálcio (630 a 1500 μm)	Proporção 1:1
Hidrófugo de massa	0,1%
Introdutores de ar	0,025%
Retentores de água e plastificante (éter de celulose)	0,08%
Fibras	0,1%
Cargas leves	1%
Características em pó ou em pasta	
Traços ponderais (cimento:cal:areia)	1:1:5
Teor de partículas finas	30%

As novas formulações estão indicadas na Tabela 5, e a sua elaboração teve em linha de conta informações prévias obtidas por Gonçalves [4] e Lucas [66].

Tabela 5: Composição das novas formulações.

Nomenclatura	Composição da argamassa
P	Padrão
1T	Padrão + 1% de TiO ₂
20PCM	Padrão + 20% de PCM
1PA	Padrão + 1% de Poliacrilato de sódio
1,5PA	Padrão + 1,5% de Poliacrilato de sódio
1T20PCM	Padrão + 1% de TiO ₂ + 20% de PCM
1T1PA	Padrão + 1% de TiO ₂ + 1% de Poliacrilato de sódio
1PA20PCM	Padrão + 1% de Poliacrilato de sódio + 20% de PCM
1PA1T20PCM	Padrão + 1% de Poliacrilato de sódio + 1% de TiO ₂ + 20% de PCM
1PA Pintada	Padrão + 1% de Poliacrilato de sódio + Acabamento superficial

5.2.Preparação da argamassa

A preparação da argamassa começa por contemplar a determinação da percentagem de água necessária para garantir trabalhabilidade. É pesada a quantidade correta de cada material até perfazer 200 gramas, sendo adicionada água para ajustar a trabalhabilidade. Esta operação é realizada por um técnico especializado da Weber, onde grande parte deste trabalho foi realizado, sendo o valor de espalhamento usado para a sua quantificação.

Faz-se depois o ajuste para 2 kg de produto em pó. A mistura é homogeneizada manualmente com a ajuda de uma espátula, para facilitar a posterior amassadura automática, realizada numa amassadora Controls, modelo 65 – L0005 (Figura 13), durante 15 segundos, seguidos de 1 minuto de nova homogeneização manual e, por último, nova homogeneização automática durante 1 minuto e 15 segundos.



Figura 13: Equipamento de amassadura.

Finalizada a amassadura, caracterizam-se as propriedades em pasta, ou seja, no estado fresco. A seguir, processa-se a moldagem de provetes e a sua cura em condições controladas. Os provetes são assim colocados numa sala à temperatura de 22°C e com uma humidade relativa de 50%.

5.3. Caracterização das argamassas

Os testes realizados estão listados na Tabela 6, sendo descritos com mais detalhe a seguir.

Tabela 6: Ensaio realizados às argamassas preparadas.

Estado do produto	Ensaio	Tempo de cura	Normas
Produto em pasta	% de água	-	-
	Espalhamento	-	EN 1015-3
	Reologia	-	-
	Densidade	-	NP EN 1015-10
	% de ar incluído	-	ASTM C231-49 T
Produto endurecido	Variações de massa	1d, 7d, 28d	Cahiers du CSTB (2669-4) – A3.3
	Variações dimensionais	1d, 7d, 28d	Cahiers du CSTB (2669-4) – A3.3
	Massa volúmica aparente	1d, 7d, 28d	NP EN 1015-10
	Módulo de elasticidade	7d, 28d	Cahiers du CSTB (2669-4) UNE 83-308-86
	Resistência à flexão	28d	NP EN 1015-11
	Resistência à compressão	28d	NP EN 1015-11
	Coeficiente de absorção de água por capilaridade	28d	NP EN 1015-18
	Saturação e libertação de água	28d	-
	Ensaio de controlo de humidade (MBV)	28d	-
	Condutividade térmica	28d	-
	Avaliação do desempenho térmico	28d	-
	Avaliação da capacidade fotocatalítica	28d	-

5.3.1. Ensaios em estado fresco

Massa volúmica aparente em fresco

A massa volúmica aparente da argamassa é calculada com recurso a um copo de volume conhecido, sendo este pesado vazio e depois preenchido com argamassa. O valor é expresso em g/cm^3 :

$$\text{Massa volúmica aparente} = \frac{m_1 - m_0}{v_c} \quad (11)$$

m_1 e m_0 são, respetivamente, os valores da massa do copo cheio e vazio e v_c corresponde ao volume do copo.

Percentagem de ar incluído

A percentagem de ar incluído é aferida através de equipamento de medição apropriado, da marca Controls, modelo C171, como demonstra a Figura 14.



Figura 14: Equipamento utilizado para a medição da percentagem de ar.

O processo de medição consiste em colocar o amassado no interior do aparelho (Figura 15), de seguida é injetada água por uma das torneiras laterais até que a mesma saia pela torneira do lado contrário, com o objetivo de retirar o ar existente. São fechadas as torneiras

para não entrar ar e depois é bombeado ar para o amassado. A quantidade de ar injetado é lida no manómetro do equipamento, correspondendo à percentagem de ar incluído.



Figura 15: Equipamento para medição da percentagem de ar sem e com argamassa respetivamente.

Ensaio de reologia

O estudo da reologia da argamassa começa por verificar a trabalhabilidade da mesma com a utilização de uma mesa de espalhamento. A análise inicia-se com o enchimento até meio um copo cónico com argamassa, seguida de uma pequena compactação e sendo preenchido o restante espaço do copo, sendo novamente compactado. O copo cónico é retirado e são efetuadas 15 voltas, que correspondem a 15 batimentos da mesa de espalhamento, segundo a norma EN 1015-3. O diâmetro final da argamassa após os batimentos indica o valor de espalhamento da argamassa.

Para uma melhor caracterização reológica das argamassas foi utilizado também um reómetro da marca Viskomat NT (Figura 16). O comportamento reológico pode ser descrito pelo modelo de Bingham através da equação seguinte:

$$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma} \quad (12)$$

Onde τ é a tensão de corte em [Pa], τ_0 é a tensão limite de escoamento em [Pa], η é a viscosidade plástica em [Pa.s] e $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação em [s^{-1}].

O que este reómetro verdadeiramente mede é o valor de torque [T] em função da velocidade de rotação (N) do copo do reómetro. O valor do torque em [N.mm] pode ser relacionado com N através da seguinte equação de tipo binghamiano:

$$T = g + hN \quad (13)$$

onde g é um coeficiente proporcional à tensão de cedência ou de escoamento em [N.mm], h um coeficiente proporcional à viscosidade plástica em [N.mm.min]. O valor de N neste ensaio foi mantido a 80 rpm mas de 5 em 5 minutos era diminuído até 0 rpm e depois aumentado de novo para 80 rpm. Esta variação na velocidade de rotação de 0 para 80 rpm é que permitiu determinar as curvas de fluxo (T em função de N) e, com base na equação (13), retirar de 5 em 5 minutos os valores de g e h para as diferentes argamassas.



Figura 16: Reómetro utilizado no ensaio de reologia das argamassas.

5.3.2. Caracterização da argamassa endurecida

Para a caracterização da argamassa endurecida foi necessário processar seis tipos de provetes. Para determinar a variação de massa, dimensional, de densidade, a resistência mecânica (à flexão e à compressão) e o coeficiente de absorção de água por capilaridade, foram obtidos provetes com as dimensões de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$. Outros três provetes prismáticos de dimensões $25 \times 25 \times 285 \text{ mm}^3$, foram processados para determinar o módulo de elasticidade e a porosidade. Uma amostra de dimensões $275 \times 275 \times 18 \text{ mm}^3$ foi obtida para determinar a condutividade térmica e processaram-se três provetes, de forma cilíndrica com as dimensões de 120 mm de diâmetro e 20mm de altura, para os testes de saturação/libertação de vapor de água, coeficiente de resistência à difusão de vapor e controlo da humidade. Foram ainda processadas amostras com dimensões de $100 \times 100 \times 3 \text{ mm}^3$ para os testes de descontaminação gasosa de NO_x (material com TiO_2), e outras com $140 \times 140 \times 3 \text{ mm}$ para avaliar o desempenho no ajuste térmico (argamassas contendo PCM's).

Variação de massa

A variação da massa (expressa em %) dos provetes é registada ao fim do 1º, 7º e 28º dia de cura, após a desmoldagem. A variação de massa é expressa em percentagem, sendo calculada através da seguinte equação:

$$\text{Variação de massa (\%)} = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100 \quad (14)$$

Onde m_i é a massa inicial (após a desmoldagem) e m_f é a massa final.

Variação dimensional

A variação das dimensões dos provetes é medida após 1, 7 e 28 dias de cura, sendo as medições efetuadas com um micrómetro, da marca Mitutoyo - modelo ID C112B (Figura 17). A variação dimensional é calculada pela seguinte equação:

$$\text{Variação dimensional} = \frac{l_f - l_i}{0,16} \times 100 \quad (15)$$

Em que l_i e l_f correspondem, respetivamente, às dimensões iniciais e finais, 0,16 corresponde a tamanho inicial do provete, em metros. A variação dimensional é expressa em mm/m.



Figura 17: Micrómetro utilizado para medir as variações dimensionais.

Massa volúmica aparente

A densidade aparente das argamassas é calculada a partir da massa e do volume dos provetes endurecidos. A densidade é calculada após 1, 7 e 28 dias de cura, através da equação 16:

$$\text{Massa volúmica aparente } (\rho) = \frac{m}{v} \quad (16)$$

onde m é a massa do provete e v o seu volume geométrico, sendo expressa em g/cm^3 .

Módulo de elasticidade dinâmico

Para a determinação do módulo de elasticidade é necessário registar a massa dos provetes ao fim de 1, 7 e 28 dias de cura, e medir a frequência de ressonância nas mesmas datas. Para tal foi utilizado um equipamento LDS PA25E Power Amplifier, visualizado na Figura 18. O processo de medição consiste em fixar o provete ao aparelho e depois induzir impulsos eletromecânicos que vão gerar uma frequência característica, que vai ser lida pelo aparelho. A equação seguinte permite obter o módulo de elasticidade (E):

$$E = \frac{4.F^2.l.m}{g.v} \quad (17)$$

Onde F é a frequência de ressonância, l é o comprimento do provete, m a sua massa, v o volume e g a aceleração gravítica.

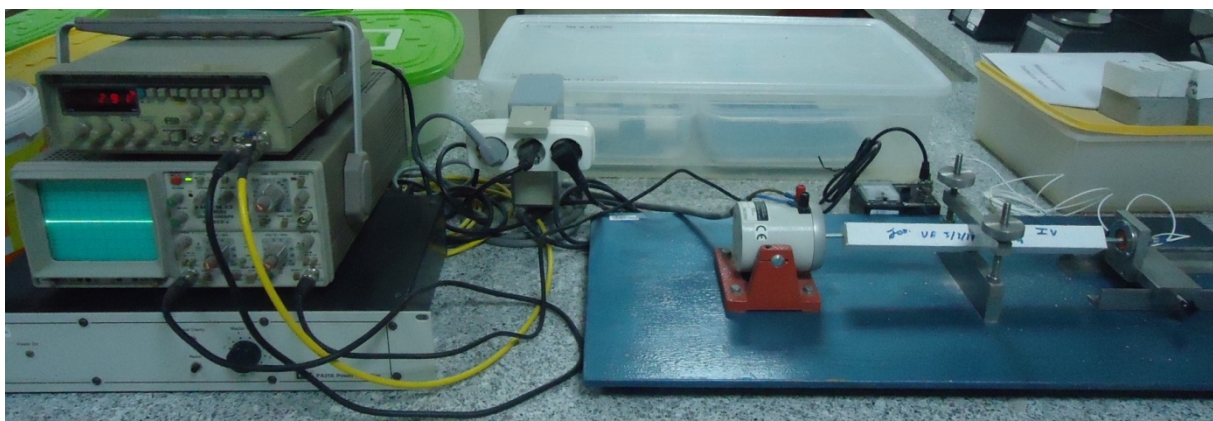


Figura 18: Equipamento utilizado para medir a frequência de ressonância das amostras.

Resistência à flexão

Para a determinação da resistência à flexão foram utilizados provetes com 28 dias de cura e o equipamento da marca Controls, modelo 65 – L1142, mostrado na Figura 19. O ensaio consiste em aplicar uma carga que vai aumentando ao longo do tempo, registando-se o valor da força máxima que gera a rutura da amostra. O valor da resistência à flexão (R_f), em [MPa], é calculado através da seguinte equação:

$$R_f = \frac{1,5.F_f.l}{b.d^2} \quad (18)$$

onde l é a distância entre apoios [mm], F_f é a carga máxima suportada pelo provete [N], b e d são as dimensões da aresta do provete[mm].



Figura 19: Equipamento para a realização de ensaios de resistência à flexão e compressão.

Resistência à compressão

Para o cálculo da resistência à compressão foi utilizado o mesmo equipamento (Figura 19) e usam-se os meios provetes resultante do ensaio de flexão. É medida a resistência à compressão (R_c), em [MPa], através da seguinte equação:

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (19)$$

onde F_c é a carga máxima suportada pelo provete, em [N], e A corresponde à área da superfície sobre a qual é aplicada a carga, em [mm²].

Condutividade térmica

A condutividade térmica é medida num instrumento da marca Deltalab, modelo ET-100 (Figura 20). O provete é colocado sobre uma superfície horizontal que vai aquecer uniformemente uma das superfícies da amostra. O valor da condutividade térmica é determinado pela equação seguinte:

$$\lambda = \frac{P \cdot x}{A \cdot \Delta T} \quad (20)$$

onde λ é a condutividade térmica, expressa [W/mK], P é a potência de aquecimento [W], Δx é a espessura da amostra em [m], A a sua área exposta [m²] e ΔT é a diferença de temperatura entre os dois lados da amostra [°C]. A potência e a diferença de temperatura são registadas pelo aparelho.



Figura 20: Aparelho utilizado para a medição da condutividade térmica das placas.

Coefficiente de absorção de água por capilaridade

Para a medição do valor do coeficiente de absorção de água por capilaridade são utilizadas as metades restantes dos provetes ensaiados à flexão. Após pesagem, os provetes são colocados sobre uma esponja humedecida e dentro de um recipiente, com a parte contrária

àquela onde ocorreu a fratura em contacto com a esponja, como se mostra na Figura 21. O ensaio decorre dentro de uma caixa isolada que contém uma solução de sulfato de zinco saturada, com a finalidade de manter o valor de humidade relativa em 95%. As pesagens são realizadas ao fim de 10 e de 90 minutos. A temperatura de ensaio $23 \pm 1^\circ\text{C}$. Neste ensaio pretende-se avaliar a resistência das argamassas à absorção de água.

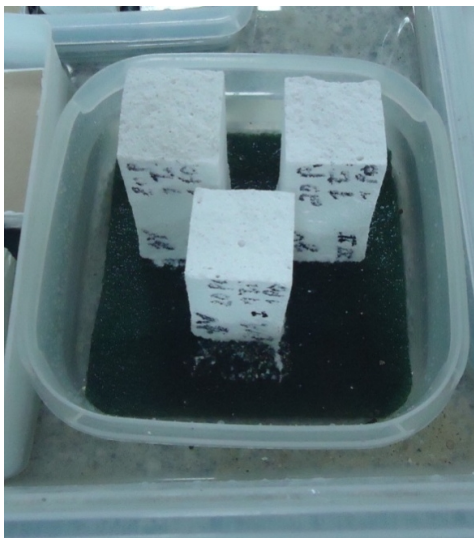


Figura 21: Método de determinação do valor do coeficiente de absorção de água por capilaridade.

O valor do coeficiente de absorção de água por capilaridade, C [$\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$], é avaliado pela diferença de massa entre os dois tempos (10 e 90 minutos).

Saturação e libertação de água

Para a avaliação do comportamento das várias formulações no processo de saturação e de libertação de humidade são utilizadas amostras cilíndricas, vedadas lateralmente e numa das superfícies circulares (com parafina). As amostras são colocadas num recipiente com água, como foi descrito no procedimento para a determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade. Registam-se os valores da massa de cada amostra ao fim de 10 e 90 minutos, e depois ao fim de cada dia seguinte até se observar estabilização da massa. Registos equivalentes são feitos na fase de libertação de humidade das amostras, efetuada ao ar livre, com uma temperatura de 24°C e a uma humidade relativa de 77.5%.



Figura 22: Provetes no processo de saturação.

Controlo de humidade (MBV_{prático})

As amostras com forma semelhante às do ensaio anterior e vedadas também da mesma maneira são colocadas numa câmara climática (Aralab, modelo Fitoclima 300 EDTU - Figura 23), onde é colocada uma balança de precisão que regista as variações de massa ao longo do tempo e perante variações de humidade relativa ambiente antes indicadas: 33% e 75% durante 16 e 8 horas, respetivamente. Os ensaios completam-se ao fim de cinco ciclos (5 dias), sendo a temperatura mantida constante (a 23°C). Todos os registos são efetuados com o recurso a um computador.

As amostras que foram sujeitas à variação de humidade relativa foram: a amostra padrão e as amostras que tinham na sua constituição poliacrilato de sódio (*Produkt T 5066 G* – nome comercial), fornecido pela empresa *Evonik*.



Figura 23: Câmara climática usada para medir o MBV_{prático}.

Na Figura 24 seguinte pode-se verificar o esquema de todo o processo de avaliação do controlo da humidade.

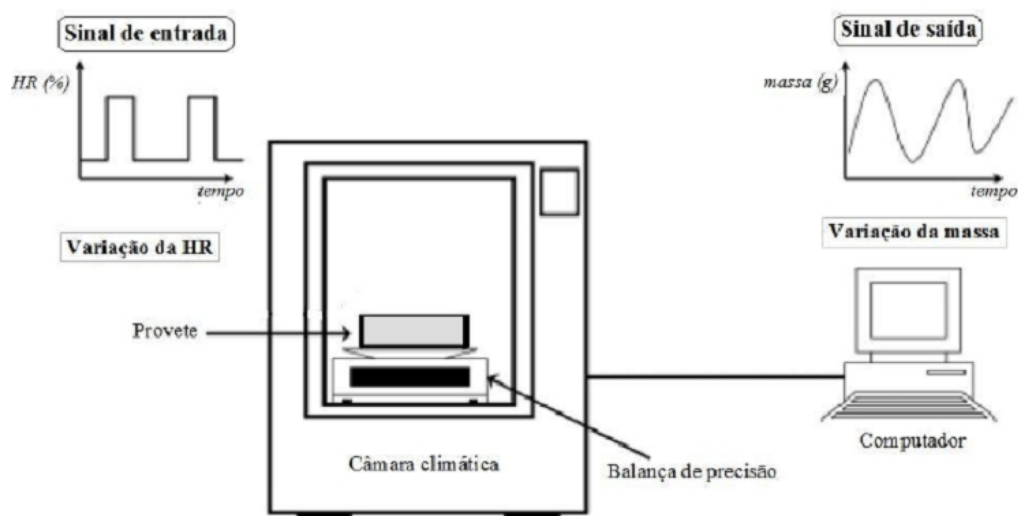


Figura 24: Esquema de todo o processo de determinação de $MBV_{prático}$ [4].

Usa-se a equação seguinte para determinar o valor $MBV_{prático}$:

$$MBV_{prático} = \frac{\Delta m}{A \cdot \Delta \%HR} \quad (21)$$

onde Δm traduz a variação de massa ao longo do tempo, A é a área exposta das amostras e $\Delta \%HR$ corresponde à variação de humidade relativa (de 42%).

Um dos provetes com 1% de poliacrilato de sódio foi pintado com weber.prim regulador (pintura acrílica), material fornecido pela empresa, com o objetivo de verificar o valor de $MBV_{prático}$ do material com uma camada de tinta acrílica de base aquosa, simulando um possível acabamento.

Modulação térmica do ambiente

Para a avaliação do desempenho das argamassas contendo PCM's na modulação da temperatura ambiente, foram realizados testes que simulam as condições reais no interior de um edifício. Para tal, foram utilizadas placas isolantes de poliestireno expandido, de dimensões de 200x200 mm, para construir um cubo. As paredes interiores foram depois revestidas com uma camada de argamassa, com dimensões de 140x140x3 mm, como se vê na Figura 25.

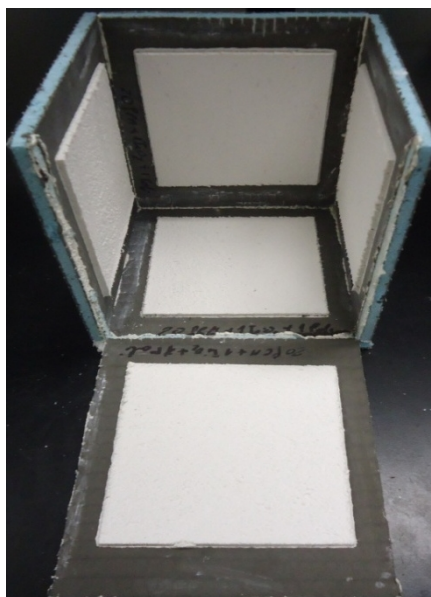


Figura 25: Cubo de teste utilizado no cálculo do desempenho do PCM.

O material foi então curado durante 28 dias. Nesta avaliação foram usadas amostras com PCM orgânico à base de parafina (*Micronal DS 5008 X* – nome comercial), fornecido pela empresa *Basf*, e também a argamassa padrão. Depois de isoladas as caixas, foi colocado um termopar no interior das mesmas (centro do cubo), e outro ficou posicionado na vizinhança dos cubos para medir a temperatura ambiente dentro da câmara climática.

Os ensaios climáticos envolveram oscilações térmicas na câmara climática, entre 10 e 40°C, com patamares de 10 minutos. Os PCM's utilizados sofrem mudança de fase entre 23 e 25°C, esperando-se avaliar o efeito do calor latente da alteração de estado na modulação da temperatura.



Figura 26: Câmara climática equipada com Datalog para o registo da temperatura ao longo do ensaio.

Avaliação do desempenho fotocatalítico

A avaliação fotocatalítica consiste em testar a capacidade das argamassas aditivadas com TiO_2 (*Aeroxide*[®] P25) para degradar poluentes existentes no ar, como NO_x .

O ensaio foi realizado com uma mistura de 1ppm de NO_x com ar puro (ar K), sendo possível observar na Figura 27 uma representação esquemática do equipamento experimental utilizado.

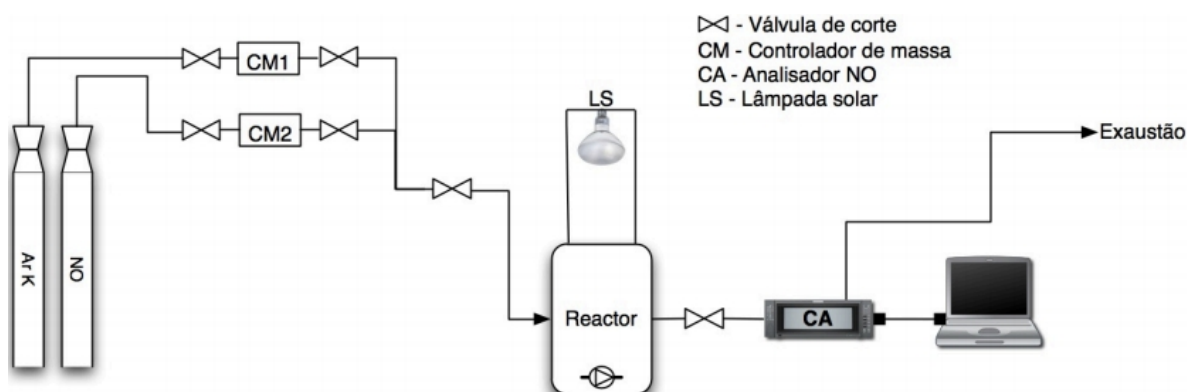


Figura 27: Esquema do equipamento experimental utilizado na avaliação fotocatalítica [66].

O reator fotocatalítico (Figura 27) tem uma capacidade de 35 litros, tendo na parte superior uma tampa isolante com uma janela de vidro, por onde é direcionado um feixe de luz de uma lâmpada solar (OSRAM UltraVitalux), que se encontra a cerca de 1 metro de

distância da amostra. Os ensaios realizam-se a uma temperatura média de 23°C e com humidade relativa de 34% no interior do reator.

O ensaio inicia-se com a colocação da amostra no interior do reator. É introduzida a mistura de gás e eleva-se a concentração da mistura até 1 ppm, tendo esta que estabilizar neste valor ou muito próximo. O tempo de estabilização é importante para assegurar que não há absorção de gás nos poros da amostra, sendo a degradação exclusivamente causada por ação fotocatalítica. Após a estabilização a lâmpada é ligada, ficando a placa de 100x100x3mm (Figura 28) iluminada.



Figura 28: Placa colocada no interior do reator para o ensaio fotocatalítico.

O ensaio decorre até se atingir o valor mínimo de concentração de NO_x , correspondendo à situação de exaustão da capacidade de degradação por parte do material. Esta situação de estabilização atinge-se, nas condições de ensaio, ao fim de 45 e 50 minutos. A leitura da concentração de NO_x é feita num medidor de quimiluminescência da marca Environement S.A (modelo AC 31M), a cada 5 minutos após a estabilização a 1ppm e até à concentração mínima.

A Figura 29 mostra a fotografia dos equipamentos de ensaio.



Figura 29: Reator fotocatalítico utilizado nos ensaios de descontaminação gasosa instalado no departamento de Engenharia Civil.

6. DISCUSSÃO E RESULTADOS

6.1. Propriedades das argamassas em estado fresco

6.1.1. Percentagem de água, de ar incluído e massa volúmica aparente

Na Figura 30 está representada a relação entre a % de água adicionada até se obter a trabalhabilidade pretendida e a % de ar incluído. Na Figura 31 observa-se a massa volúmica aparente dos amassados em fresco.

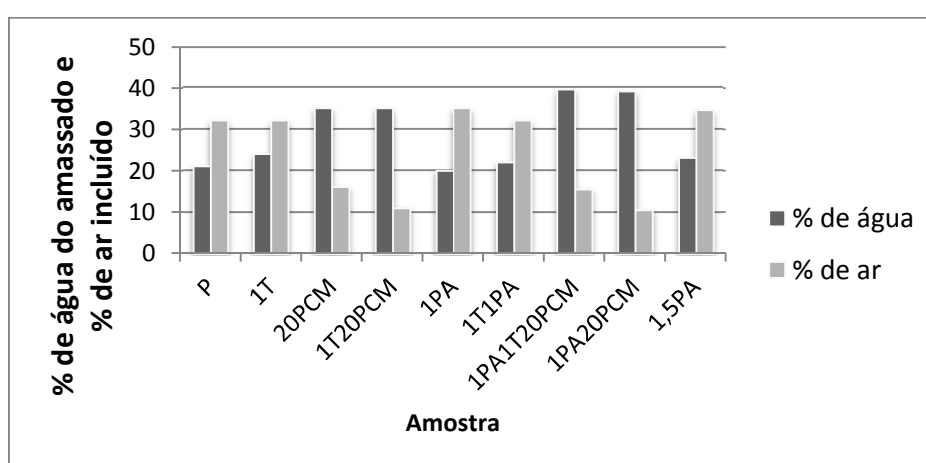


Figura 30: Teor de água e de ar nas argamassas.

O tipo e a quantidade de adjuvante que é adicionado à argamassa padrão influenciam o teor de água adicionada, o teor de ar incluído e a própria densidade em fresco da argamassa. De uma forma geral a % de água adicionada às formulações é superior à % de água da amostra (P). A exceção é a amostra que contém 1PA, uma vez que se verificou que com uma % de água inicial (22%) não era possível trabalhar o amassado, porque se apresentava muito fluido após amassadura (1m15s). Neste caso, a quantidade de água a adicionar é de 20%, ainda que seja depois difícil moldar as amostras de forma homogênea. A presença de poliacrilato de sódio reduz o tempo aberto de trabalho das misturas, dada a sua forte ação absorvente e exsicante. Verifica-se que com 1PA e 1,5PA o valor de % de ar incluído é maior do que nas outras formulações. No entanto, as diferenças atenuam-se quando o PA está associado a outros adjuvantes, particularmente quando se usam PCM.

As argamassas que contêm PCM requerem maior % de água para adquirirem ótima trabalhabilidade, mas originam amassados com menor teor de ar incluído.

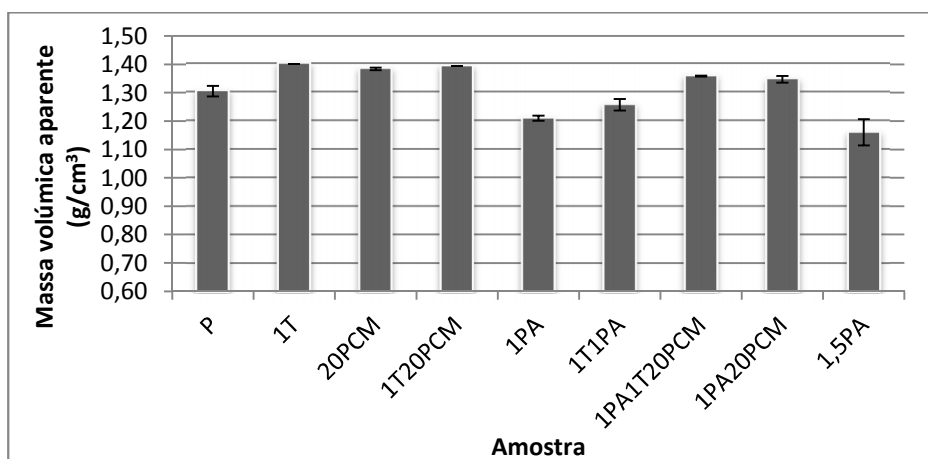


Figura 31: Massa volúmica aparente dos amassados.

Da análise da Figura 31 verifica-se que a introdução de 1% de TiO_2 gera misturas de densidade superior enquanto a introdução de PA conduz a uma ligeira diminuição de densidade. Na verdade, de uma forma geral, as argamassas com maior massa volúmica aparente em fresco são as que contêm PCM, uma vez que há redução do teor de ar no amassado.

6.1.2. Comportamento reológico

A realização dos ensaios de reologia teve por finalidade avaliar os parâmetros (tensão de escoamento e viscosidade plástica) do material logo após a mistura mecânica e ao longo do tempo. O uso combinado da mesa de espalhamento (Figura 32), segundo a norma EN 1015, e do reómetro permitiu fazer uma caracterização mais completa da trabalhabilidade do material no estado fresco. No caso do ensaio de espalhamento, trabalhou-se no sentido de se obter valores aproximados de 140 mm, por ajuste de água adicionado.



Figura 32: Mesa de espalhamento da amostra 1PA20PCM.

Em alguns casos foi necessário fazer um ajuste na quantidade de água em relação à definida originalmente (Tabela 7) para se conseguir avaliar os parâmetros g e h no reômetro. As argamassas com baixa trabalhabilidade são difíceis de ajustar de acordo com o modelo Bingham, uma vez que ocorre uma rápida redução da água livre na mistura e um aumento significativo do torque.

Tabela 7: Diferença de % de H₂O do amassado e do preparado para reologia.

Amostra	P	1T	20PCM	1T20PCM	1PA	1T1PA	1PA1T20PCM	1PA20PCM	1,5PA
% de H ₂ O	21	24	35	35	20	22	39.5	39	23
% de H ₂ O para reologia	21	24	36	36	22	24	39.5	39	27

Verifica-se na Figura 33 que em geral, as amostras apresentaram diferentes valores de tensão de escoamento e viscosidade plástica e exibiram significativa dependência em relação ao teor e tipo de adição usado. As misturas com PCM e PA foram as que apresentaram maior impacto em comparação com os outros adjuvantes.

A adição de elevada quantidade de PCM pretende assegurar o efeito térmico desejado, mas reduz significativamente o teor de água disponível na mistura. O formato esférico das partículas de PCM tende a diminuir o efeito do atrito das partículas, favorecendo assim a manutenção da fluidez da mistura ao longo do tempo.

Observou-se também que o impacto da titânia foi menor comparado com o do PCM, uma vez que a quantidade utilizada ou volume ocupado na mistura não foi suficiente para causar uma influência significativa sobre o comportamento reológico. Por esta razão, os valores de tensão de escoamento e da viscosidade plástica ficaram muito próximos dos valores da amostra P. Em ambos os casos, os valores mantiveram-se constantes ao longo do tempo. A amostra 1T apresenta um ligeiro aumento da tensão de escoamento, o que pode indicar a existência da aglomeração das partículas mais finas.

Já em relação ao PA, verificou-se um comportamento bastante diferente dos outros adjuvantes estudados. Os parâmetros reológicos alteram-se durante a realização do ensaio, uma vez que há absorção de água por parte do PA, absorção que não ocorre durante o período da mistura mecânica. A absorção reduz a quantidade de água disponível na mistura, provocando um maior atrito interno entre as superfícies das partículas sólidas. Este fenómeno levou a que o ensaio de reologia da amostra 1PA e 1,5PA terminasse ao fim de 15 e 10 minutos respetivamente, devido aos elevados valores da tensão de escoamento (Figura 33(a)).

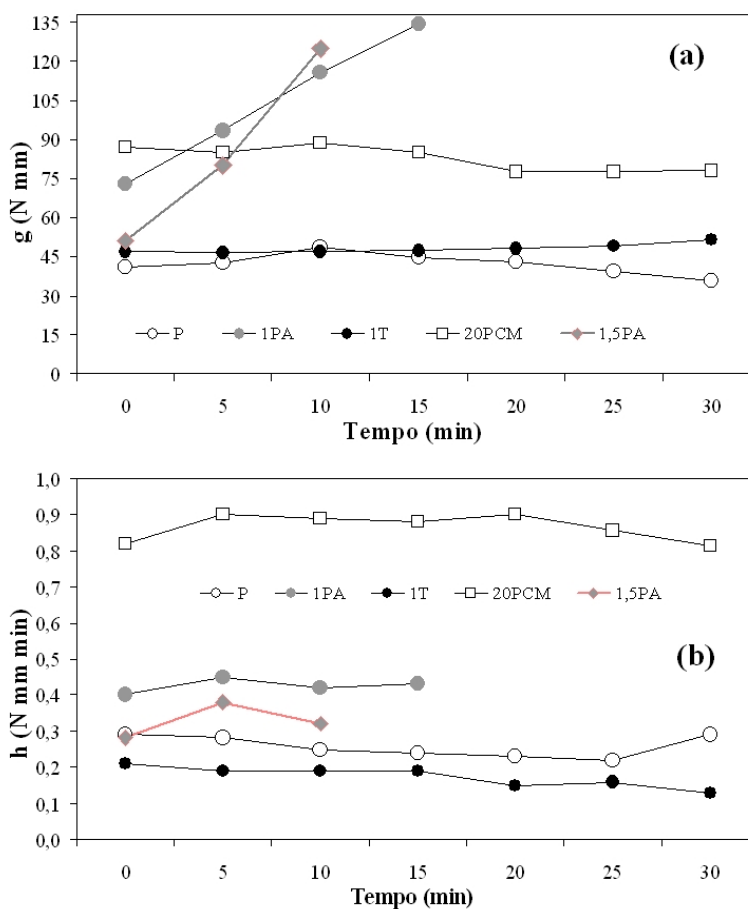


Figura 33: (a) é a evolução da tensão de escoamento e (b) é a evolução da viscosidade plástica.

Na Figura 34(a) é possível observar uma ligeira atenuação do valor de tensão de escoamento da amostra 1T1PA em comparação com a amostra 1PA. Esta atenuação deve-se à presença de titânia, uma vez que a amostra 1T tem um valor de tensão de escoamento mais baixo. A taxa de aumento do valor de tensão de escoamento é menor em 1T1PA do que na amostra 1PA, embora se atinjam valores elevados. Na amostra 1T1PA ocorre absorção de água livre por parte do PA, provocando uma secagem da mistura e dificultando a continuação do ensaio de reologia.

Na Figura 34(b) observa-se que as amostras 1T20PCM e 1PA20PCM têm o valor inicial mais elevado de viscosidade plástica, estando este valor muito próximo do valor da amostra 20PCM. Pode-se verificar que o PCM tem grande influência nas propriedades reológicas. As amostras com PCM, apesar de conterem teor de água superior relativamente às demais, têm um elevada viscosidade plástica.

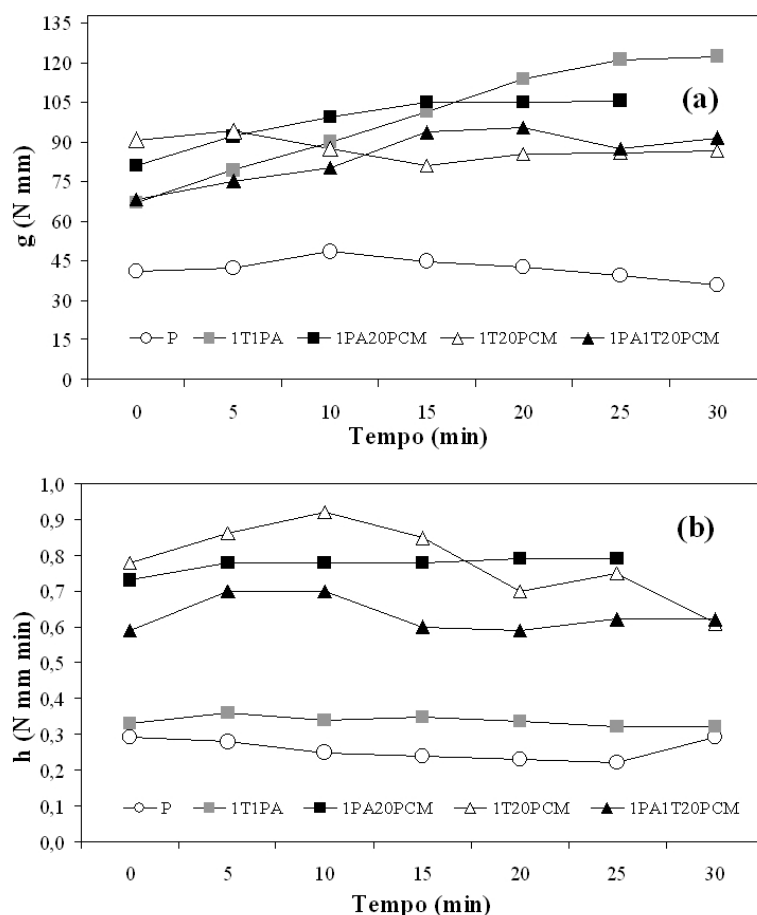


Figura 34: (a) - evolução da tensão de escoamento e (b) - evolução da viscosidade plástica das formulações com funções duplas e triplas.

6.2. Propriedades das argamassas endurecidas

6.2.1. Variação de massa

Os valores de perda de massa das argamassas curadas durante 7 e 28 dias estão indicados na Figura 35. A variação de massa relaciona-se diretamente com o teor de água nos amassados e com a capacidade de absorção/retenção da humidade. Por isso, as amostras com PCM sofrem maior variação ao fim de 28 dias de cura.

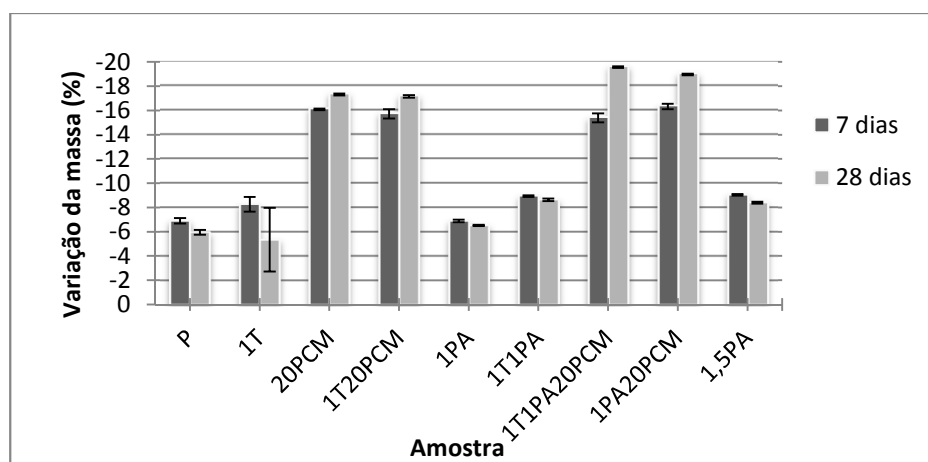


Figura 35: Variação de massa das misturas ao fim de 7 e 28 dias de cura.

Com exceção das amostras que contêm PCM, a variação de massa ao fim de 28 dias tende a diminuir relativamente ao valor medido ao fim de 7 dias de cura, porque a secagem é mais intensa nos primeiros dias. O ganho de massa observado entre os 7 e 28 dias resulta da absorção de humidade por parte das amostras, no entanto, seria expectável que as amostras com PA tivessem maior diferença. O teor de água maior usado na preparação das misturas com PCM “atrasa” o processo de cura, pelo que a libertação de água se estende até aos 28 dias.

6.2.2. Variação dimensional

Na Figura 36 é possível verificar que a variação dimensional é maior ao fim de 28 dias de cura do que ao fim de 7 dias, em todas as amostras representadas. Esta grande variação ocorre, sobretudo, devido à perda de água e à criação de porosidade por parte da argamassa ao

longo do processo de cura, mas é também determinada pela hidratação dos ligantes que também se desenrola ao mesmo tempo.

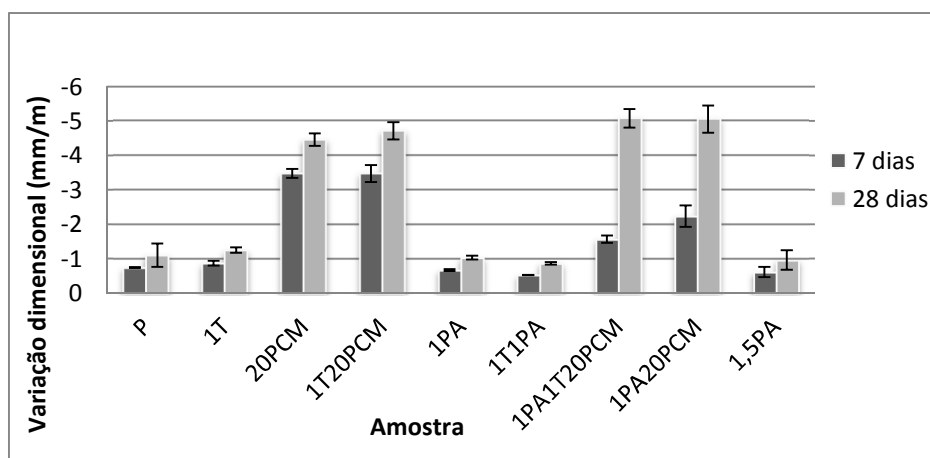


Figura 36: Variação dimensional das amostras ao fim de 7 e 28 dias de cura.

As amostras que têm PCM's na sua constituição são as que sofrem maior retração, o que se relaciona com o teor de água maior usado na amassadura. As restantes amostras têm um comportamento idêntico à amostra P. As amostras 1PA1T20PCM e 1PA20PCM são as que sofrem maior retração, porque além do PCM a presença de PA pode ter aumentado a sua capacidade de absorção de água. Por outro lado, o PA sofre variações dimensionais significativas quando absorve e depois liberta a água retida. Este comportamento pode exigir controlo apertado da variação dimensional para evitar fissuração.

6.2.3. Massa volúmica aparente

Na Figura 37 é possível observar a massa volúmica aparente das amostras curadas 1, 7 e 28 dias. A diminuição da densidade é mais acentuada até aos 7 dias de cura, em sintonia com a superior perda de água registada nesta fase. Entre 7 e 28 dias as diferenças atenuam-se.

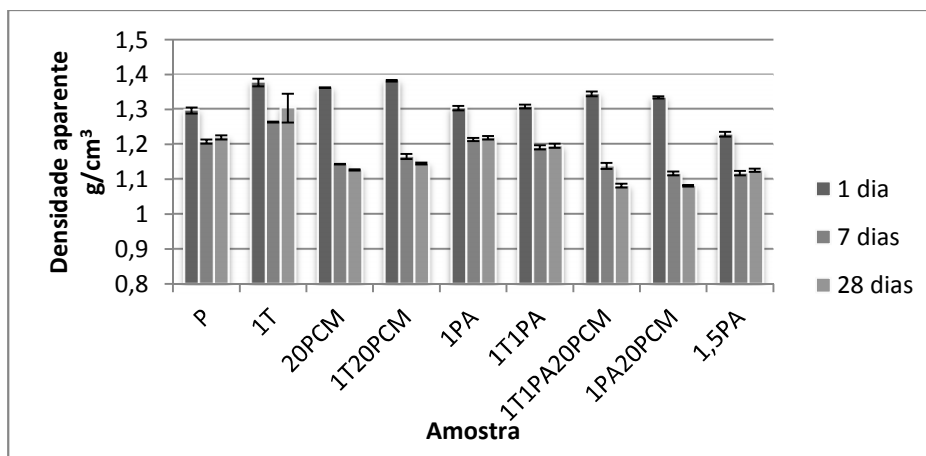


Figura 37: Massa volúmica aparente das argamassas após 1, 7 e 28 dias de cura.

É de notar que os valores menores de massa volúmica aparente observam-se nas amostras 20PCM, 1T20PCM, 1T1PA20PCM e 1PA20PCM, às quais se adicionou maior quantidade de água. Ora a posterior remoção de água, durante a secagem das amostras, origina porosidade, ou seja, diminui a densidade.

É ainda de salientar que algumas amostras (P, 1T, 1PA, 1T1PA e 1,5PA) apresentam, após 28 dias de cura, maior valor de densidade do que ao fim de 7 dias, como consequência do ganho de massa por absorção de humidade.

6.2.4. Módulo de elasticidade dinâmico

A Figura 38 mostra os valores do módulo de elasticidade dinâmico das amostras, após cura de 7 e 28 dias. A rigidez das amostras é, em geral, diretamente proporcional ao grau de compactação ou densidade. Por isso, com o progresso do processo de secagem é de prever diminuição do módulo de elasticidade, embora o progresso do processo de hidratação possa, pelo contrário, determinar ganho de solidez da matriz endurecida.

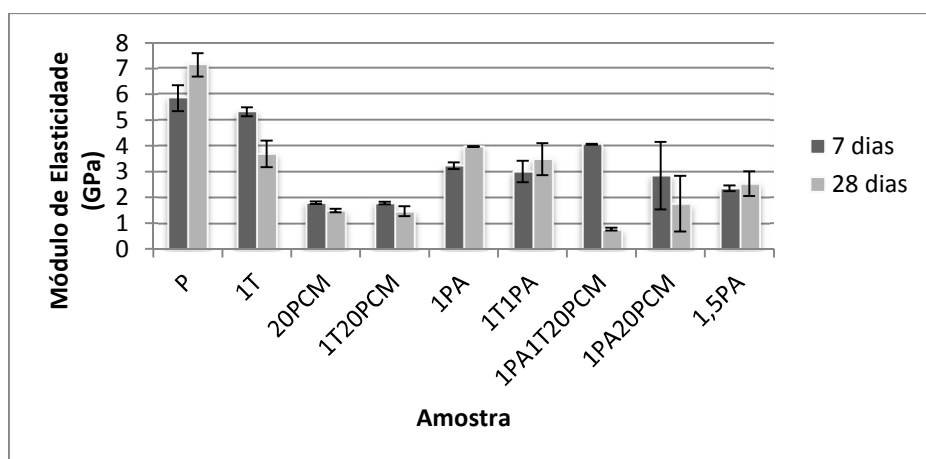


Figura 38: Módulo de elasticidade das amostras após 7 e 28 dias de cura.

Todas as formulações aditivadas apresentam valores de módulo de elasticidade inferiores aos da amostra P. Nesta, verifica-se aumento com o tempo de cura (de 7 para 28 dias), em consequência do contínuo progresso do processo de hidratação. O mesmo efeito é observado nas amostras 1PA, 1T1PA, 1,5PA, ainda que todas elas desenvolvam valores razoavelmente inferiores aos de P. A introdução de aditivos porogêneos, ou que criam descontinuidades microestruturais, diminui a rigidez do material. Só no caso da adição de materiais de extrema finura ou com características hidráulicas ou pozolânicas se pode conseguir aumento de compacidade. Nenhum dos aditivos analisados apresenta essas capacidades, mas a superior finura das partículas de TiO_2 pode justificar o menor decréscimo relativo registado com a incorporação deste componente. As cápsulas “inertes” de PCM, de reduzida massa específica, induzem maior decréscimo de densidade, resultando menor o módulo de elasticidade.

6.2.5. Resistência Mecânica

As Figura 39 e a Figura 40 mostram os valores do módulo de rutura à compressão e à flexão, respetivamente. A resistência mecânica é condicionada pela densidade aparente das amostras, sendo esta por sua vez determinada pela natureza dos componentes na formulação e pelo teor de água de amassadura. Considerando também os valores do módulo de elasticidade antes discutidos, seria de prever que todas as amostras aditivadas apresentassem menor resistência do que a amostra padrão, o que se observou no caso da rutura à flexão. Curiosamente, as amostras contendo PCM desenvolvem maior resistência à compressão. Só com o uso de poliácrlato se verifica valores mais baixos, tanto de flexão como à compressão.

A superior quantidade de poros criada, bem como a sua esperada maior dimensão podem facilitar a rutura. Além disso, a superior instabilidade dimensional associada à absorção/libertação de humidade por parte do PA, é outro fator determinante para a diminuição dos valores de resistência mecânica. Em todo o caso, os valores de resistência são reduzidos mas cumprem com os requisitos normativos (EN 998-1) para argamassas de reboco (0,4 – 7,5MPa) [6].

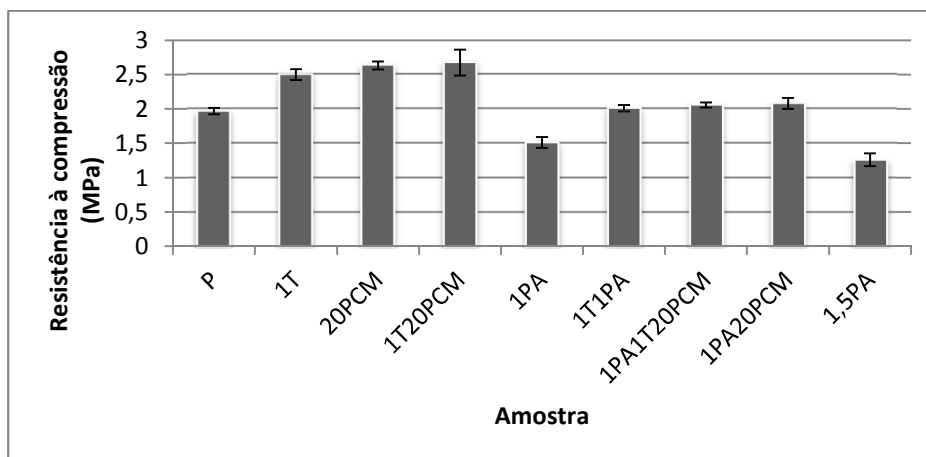


Figura 39: Resistência à compressão das argamassas após 28 dias de cura.

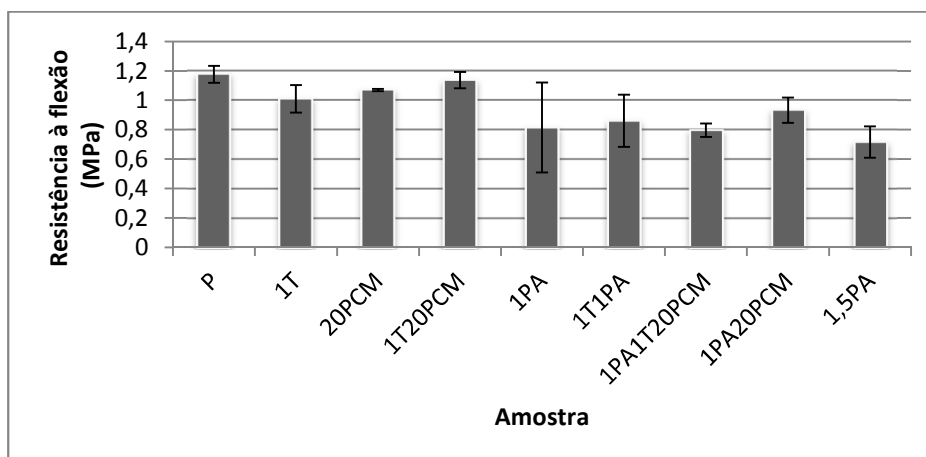


Figura 40: Resistência à flexão das argamassas após 28 dias de cura.

6.2.6. Condutividade térmica

A Tabela 8 mostra valores da condutividade térmica das argamassas com 28 dias de cura medidos a 30°C. Em geral, observa-se uma relação direta entre a massa volúmica aparente do material e a condutividade. Por isso, a amostra P é a mais condutora, enquanto

amostras com PCM são mais isolantes. Para além do carácter polimérico do material de mudança de fase encapsulado (de menor massa específica), as misturas contendo este aditivo necessitaram de maior teor de água de amassadura. Após cura, a água removida deixou maior volume de poros, minimizando a transferência térmica. Finalmente, o agente ativo deste aditivo é acumulador térmico.

Com o uso de TiO_2 a diminuição de condutividade relativamente a P não é tão acentuada e o uso de PA pode mesmo gerar uma argamassa mais condutora. Este efeito pode resultar da rápida absorção de humidade induzida pelo material superabsorvente, entre a retirada das amostras da sala controlada e o ensaio das mesmas. A presença de humidade nos canais porosos do material contribui para o aumento da condutividade térmica.

Tabela 8: Condutividade térmica das argamassas [W/mK] medida à temperatura de 30°C.

Amostras	30°C	Massa volúmica aparente
P	0.6781	1.22
1T	0.4992	1.3
20PCM	0.3783	1.13
1T20PCM	0.3765	1.14
1PA	0.8061	1.22
1T1PA	0.5439	1.2
1PA1T20PCM	0.3846	1.08
1PA20PCM	0.3611	1.08
1,5PA	0.6780	1.13

6.2.7. Coeficiente de capilaridade

Os valores do coeficiente de absorção de água por capilaridade de amostras curadas durante 28 dias estão representados na Figura 41. Em princípio, esperava-se uma relação direta entre porosidade e capilaridade, pelo que a amostra padrão (mais densa) é a que possui menor coeficiente de capilaridade. Esta característica é também determinada, para além do volume total de poros, pelo carácter comunicante ou de interligação dos mesmos, por sua vez condicionado pelo tamanho e forma. As amostras 1PA1T20PCM, 1PA20PCM e 1,5PA são as que apresentam valores superiores.

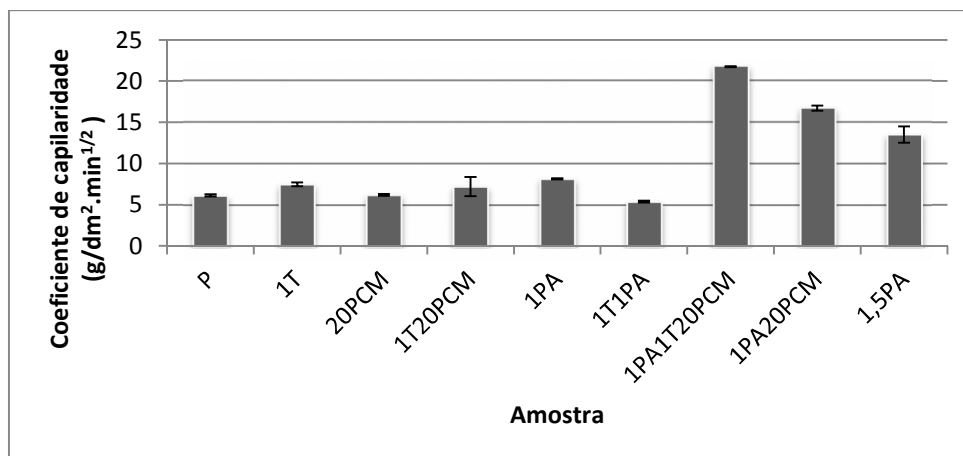


Figura 41: Coeficiente de absorção de água por capilaridade de amostras curadas durante 28 dias.

A amostra 1T1PA revela a presença de pequenas gotículas de aspeto gelatinoso, mais notória na parte exterior (Figura 42), sendo possível ver a mais pormenor na Figura 43. No entanto, as mesmas tendem a desaparecer após secagem.



Figura 42: Imagens de provetes de 1T1PA após o ensaio de capilaridade.



Figura 43: Superfície do provete 1T1PA que contactou com a água, observada numa Lupa Leica do modelo: EZ 4 HD.

Também a amostra 1PA1T20PCM revela um acentuado inchamento em contato com a água (Figura 44), com persistência de zonas irregulares e floculantes à superfície após secagem (Figura 45).



Figura 44: Imagem de amostras de 1PA1T20PCM após o ensaio de capilaridade.



Figura 45: Imagem do provete de 1T1PA20PCM, seco após ser ensaiado à capilaridade.

O uso combinado de PA com PCM gera o inchamento lateral de amostras ensaiadas à capilaridade, tal como se ilustra na Figura 46. Após secagem (Figura 47), a parte exterior das amostras continua a revelar sérias heterogeneidades/deformações que podem comprometer a sua integridade futura e são esteticamente penalizadoras.



Figura 46: Imagem da amostra de 1PA20PCM ensaiada à capilaridade e revelando inchamento superficial.



Figura 47: Imagens de provetes de 1PA20PCM, secos após o ensaio de capilaridade.

6.2.8. Saturação e libertação de água

A Figura 48 mostra o ganho de água em massa das amostras quando são colocadas em água até ocorrer saturação. Nos instantes iniciais, as amostras apresentam elevada absorção, como denota o acentuado declive. A amostra 20PCM é a que primeiro atinge a saturação, enquanto a amostra P tem uma progressão mais lenta.

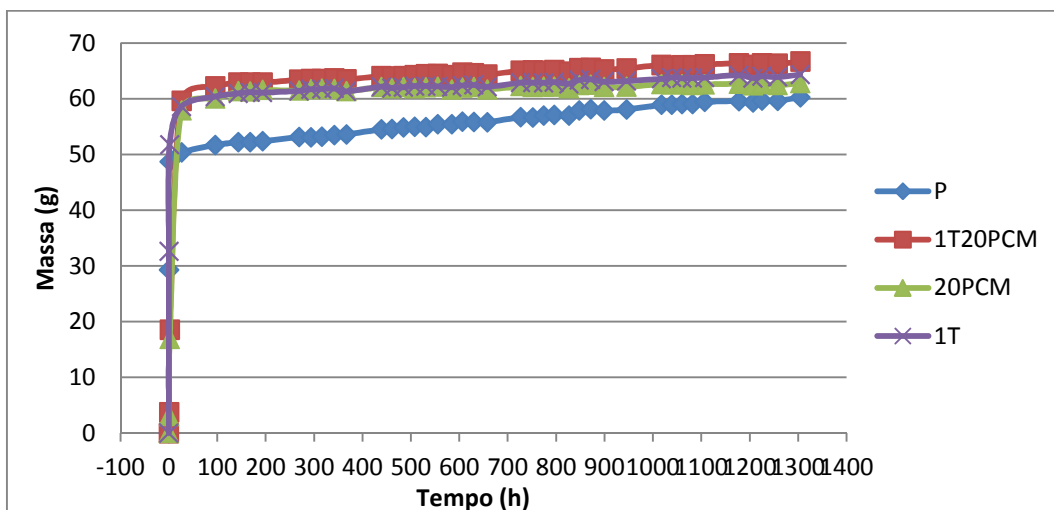


Figura 48: Resultados dos testes de saturação com água das amostras P, 1T20PCM, 20PCM e 1T.

Na Figura 49 observa-se que as amostras com PCM têm maior capacidade de libertação da água nos momentos iniciais, mas a estabilização de massa ocorre num maior período de tempo.

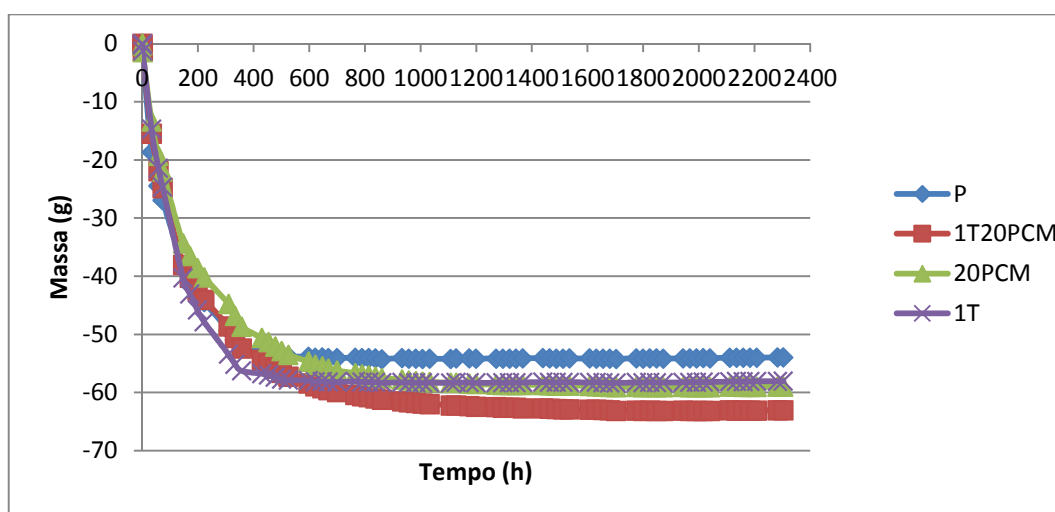


Figura 49: Resultados dos testes de libertação de água das amostras P, 1T20PCM, 20PCM e 1T.

Na Figura 50 observa-se que as amostras 1PA e 1T1PA têm maior capacidade higroscópica, uma vez que nos momentos iniciais em contacto com a água absorvem maior quantidade de água. O ganho de massa das amostras 1PA1T20PCM e 1PA20PCM tende a estabilizar, enquanto as amostras 1PA e 1T1PA revelam maior progressão temporal e maior amplitude, ou seja, têm maior capacidade de absorção.

Durante o processo de saturação, as amostras 1PA1T20PCM e 1PA20PCM apresentam o mesmo comportamento descrito em 6.2.7, de inchamento superficial e perda de consistência. Ao observar a Figura 50 e Figura 51 constata-se que as amostras 1PA e 1T1PA têm um comportamento muito semelhante, e o mesmo acontece com as amostras com PCM. Sendo as amostras com PCM a libertar maior quantidade de água nos momentos iniciais.

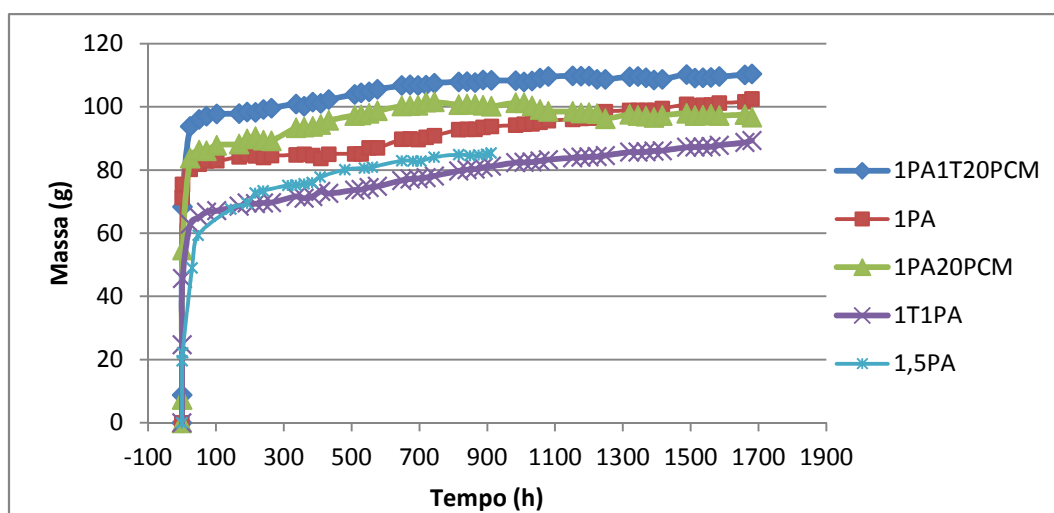


Figura 50: Resultados do teste de saturação com água das amostras com PA na sua constituição.

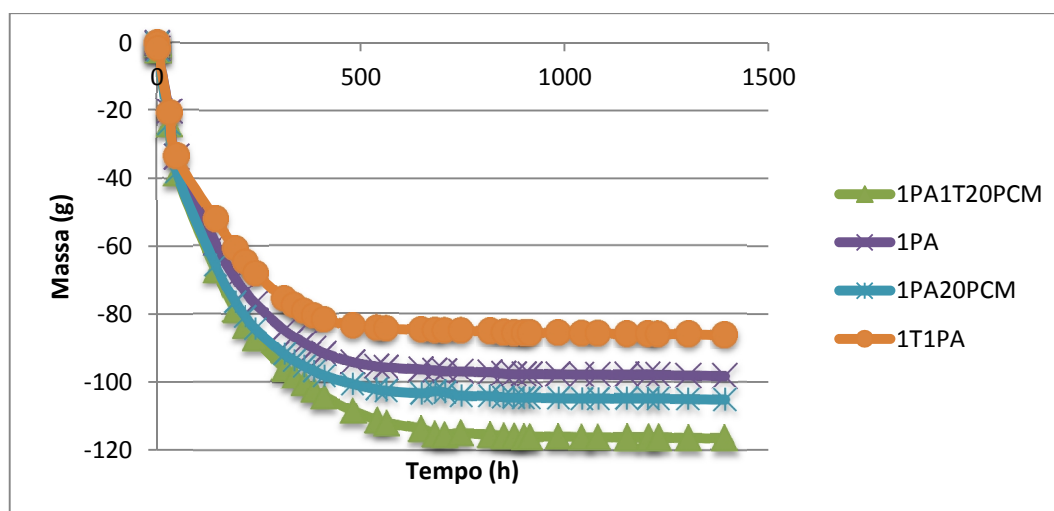


Figura 51: Resultados do teste de liberação de água das amostras com PA na sua constituição.

6.2.9. MBVprático

Os valores de $MBV_{prático}$ foram calculados após cinco ciclos/dias de ensaios numa câmara climática, onde se fez variar a humidade relativa entre 33 e 75% com patamares de 16 e 8 horas respetivamente. As variações de massa das amostras ao longo dos ciclos de humidade relativa estão ilustradas da Figura 52 à Figura 55. O cálculo do valor de $MBV_{prático}$ foi feito com recurso aos últimos quatro ciclos, com objetivo de se obter resultados mais corretos.

Ao longo dos ensaios foram mantidos as condições de ventilação da câmara e temperatura. Os provetes apresentavam a mesma espessura e acabamento superficial igual, exceção é referente a 1PA Pintada, à qual foi revestida a superfície para simular um acabamento final, mas com pouca expressão.

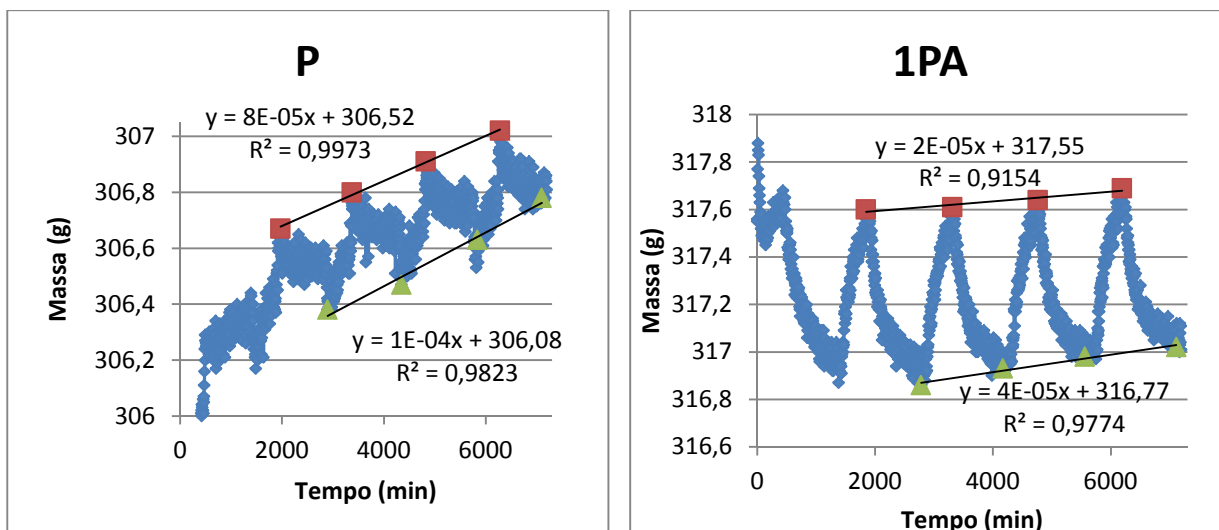


Figura 52: Variação mássica das amostras perante variações cíclicas de humidade; amostra P ($MBV_{prático}=0,94$) e amostra 1PA ($MBV_{prático}=1,4$).

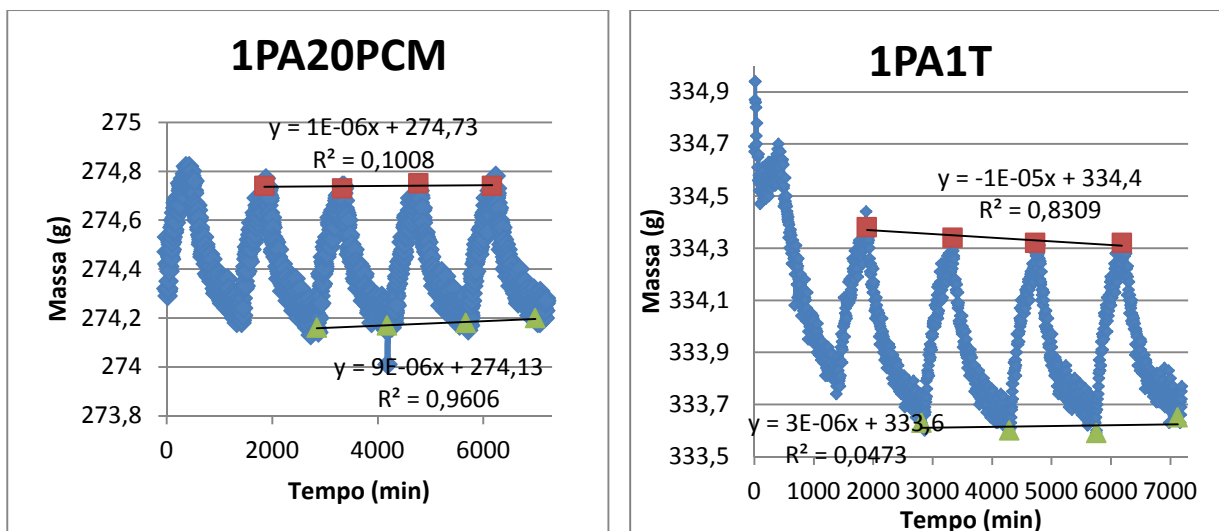


Figura 53: Variação mássica das amostras perante variações cíclicas de humidade; amostra 1PA20PCM ($MBV_{prático}=1,22$) e amostra 1PA1T ($MBV_{prático}=1,51$).

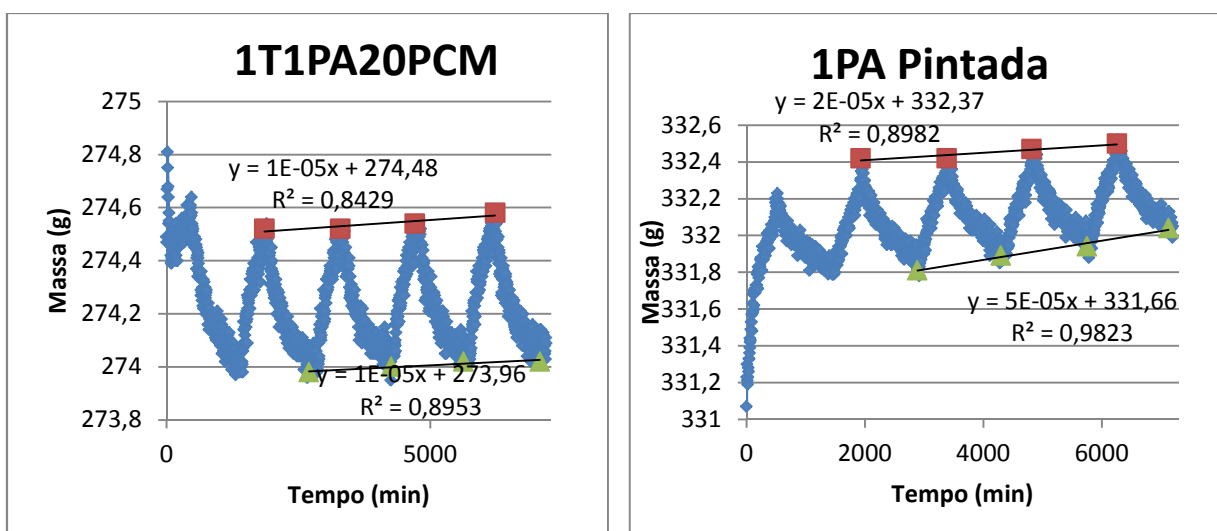


Figura 54: Variação mássica das amostras perante variações cíclicas de humidade; amostra 1T1PA20PCM ($MBV_{prático}=1,13$) e amostra 1PA Pintada ($MBV_{prático}=1,11$).

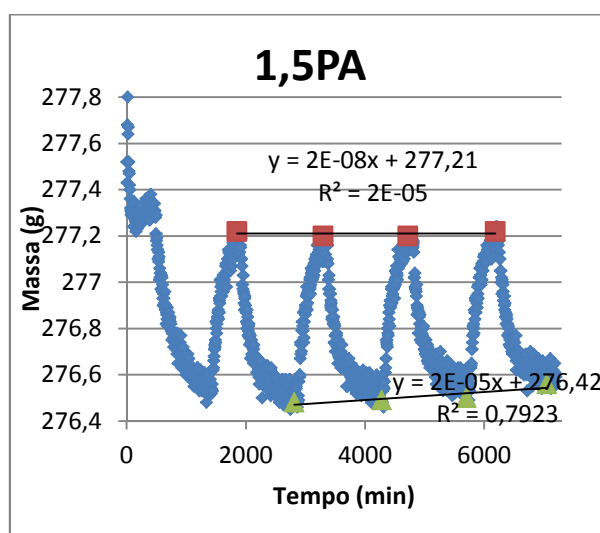


Figura 55: Variação mássica da amostra perante variações cíclicas de humidade; amostra 1,5PA ($MBV_{prático}=1,46$).

Ao analisar todos os gráficos de $MBV_{prático}$ observa-se que as amostras P, 1PA, 1PA1T20PCM e 1PA Pintada apresentam um comportamento de aumento da massa a cada novo ciclo, isto é, a libertação da humidade acumulada durante a adsorção não ocorre totalmente, ou precisa de mais tempo para a libertar. Podendo estar a ocorrer nestas amostras o fenómeno de *histerese*, em que a velocidade de desadsorção é menor que a velocidade de adsorção.

Já as amostras 1PA20PCM e 1,5PA apresentam um comportamento em termos de adsorção muito semelhante ao longo dos vários ciclos, isto é, há uma ligeira variação no ganho de massa. Mas na amostra 1,5PA esta variação de ganho de massa ainda é menor durante a adsorção, o que significa que estas amostras conseguem libertar a maioria da humidade durante o processo de libertação da mesma.

Na amostra 1T1PA observa-se um declive negativo da variação da massa quando a humidade relativa atinge os 75%, quer dizer que ao longo dos ciclos existe uma diminuição da massa. Esta diminuição pode dever-se ao provete já ter incorporado humidade quando foi colocada na câmara climática, e está a estabilizar a sua massa ao longo do ensaio.

A Figura 56 mostra os valores de $MBV_{prático}$ resultantes dos ensaios acima discutidos. A amostra P tem classificação de Moderado em termos de absorção de humidade relativa do ambiente, enquanto todas as outras são classificadas com Bom, de acordo com o método NordTest. As amostras 1T1PA, 1,5PA e 1PA são as que apresentam melhor desempenho. Também a amostra que sofreu acabamento de pintura com tinta plástica (1PA Pintada), pertence à classe de Bom, não sendo o seu comportamento muito diferente da amostra 1PA1T20PCM. Apesar da adição de mais 0,5% de poliacrilato de sódio na amostra 1,5PA, relativamente a 1PA (aumento de 50%), o valor de $MBV_{prático}$ aumenta apenas ligeiramente (de 1,40 para 1,46).

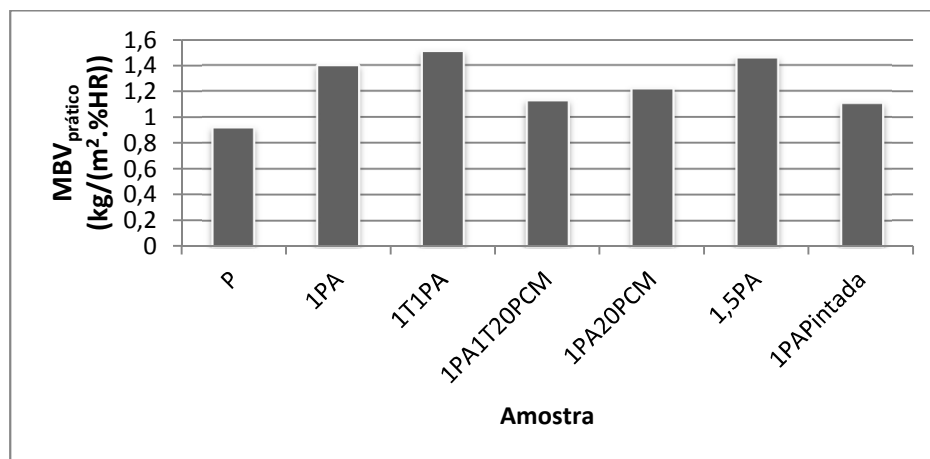


Figura 56: Valores de $MBV_{prático}$ das argamassas.

Na Figura 57 é possível observar que, regra geral, todas as amostras apresentam um valor de $MBV_{prático}$ superior durante o processo de adsorção, sendo a exceção a amostra 1T1PA, onde o valor de $MBV_{prático}$ é superior durante o processo de libertação de humidade. Isto confirma a superior capacidade das amostras na fase de absorção de humidade

relativamente ao processo de libertação, indiciando tendência para saturação ao fim de alguns ciclos. Ainda assim, o uso de aditivos parece minorar esta diferença. Sugere-se em trabalhos futuros a realização de ensaios cíclicos mais prolongados com a mesma amostra.

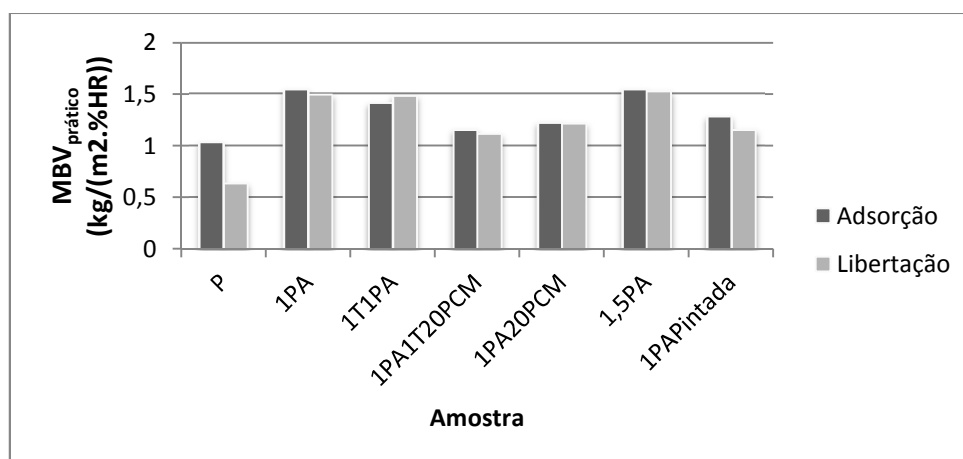


Figura 57: Valores de MBV das argamassas, estimados nas etapas de adsorção e de libertação de humidade.

6.2.10. Desempenho térmico das argamassas com PCM

A Figura 58 mostra a variação da temperatura na câmara climática, medida sem e com exposição a diferentes argamassas. Nas amostras com PCM verifica-se a capacidade de armazenamento de calor latente, uma vez que há atraso na resposta relativamente à evolução da temperatura ambiente, tanto no aquecimento como no arrefecimento. No entanto a amostra P apresenta um comportamento semelhante às amostras com PCM na fase de aquecimento. O corte de temperatura relativamente ao valor ambiente é também constante e reduzido (cerca de 1°C). Já na curva descendente as diferenças acentuam-se: agora o mínimo atingido é menor (cerca de 2 - 3°C) com o uso de PCM, sendo o atraso também superior (maior inércia térmica). O reduzido ganho na modulação térmica associado ao uso de PCM resulta do seu limitado teor, mas o aumento de concentração causaria prejuízos sérios nas outras características da argamassa (ex. resistência mecânica).

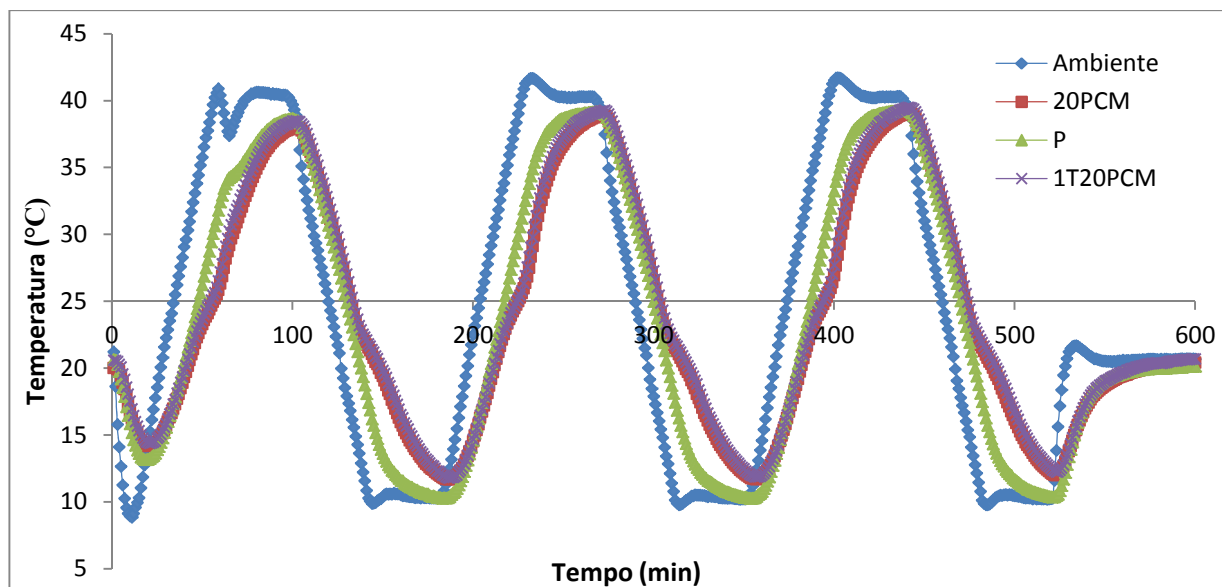


Figura 58: Variação de temperatura na câmara climática, sob a ação de diferentes argamassas (padrão, com PCM e com TiO_2 + PCM).

Na Figura 59 observa-se que a amostra 1PA20PCM apresenta melhores resultados em termos de arrefecimento, uma vez que não se atingem temperaturas tão baixas e a velocidade de arrefecimento é também inferior. Durante o primeiro ciclo de aquecimento, a amostra 1PA1T20PCM tem melhor desempenho, mas nos ciclos seguintes acompanha as outras amostras com PCM.

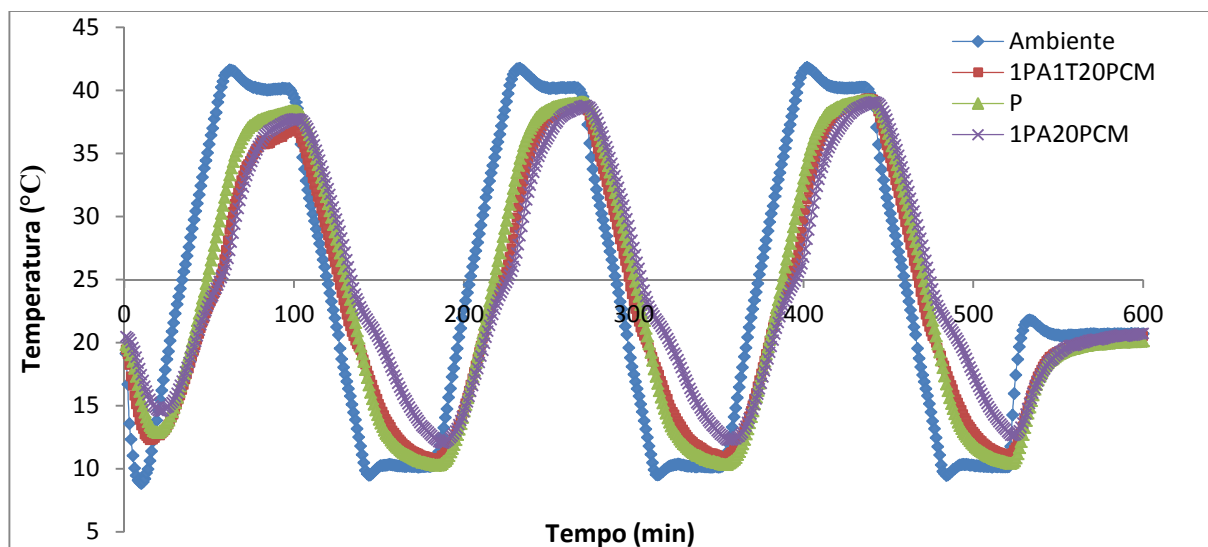


Figura 59: Variação de temperatura na câmara climática, sob ação de amostras contendo PCM e poliacrilato de sódio. Mostra-se também a curva registada com a amostra padrão.

6.2.11. Avaliação da capacidade fotocatalítica

A Figura 60 apresenta a taxa global de degradação de NO_x por amostras contendo 1% de titânia e também pela argamassa padrão.

Observa-se uma maior percentagem de degradação de NO_x com o uso das amostras 1T e 1T1PA, sendo reduzido o desempenho da argamassa P, cerca de 1%. As amostras com PCM na sua constituição apresentam valores de degradação mais baixos que as outras amostras com titânia. Estes valores baixos podem dever-se à não ativação da titânia, em consequência da perda de eficiência na irradiação das amostras ou menor exposição de partículas ativas. As amostras com PCM são menos densas, pelo que o material fotocatalítico, mais fino, pode ocupar maior volume relativo de espaços vazios internos, distribuindo-se em profundidade. Como a penetração da luz é bastante reduzida, espera-se que só a titânia que prevalece à superfície ou perto da mesma exerça funções fotocatalíticas. A adição simultânea de PCM e PA origina um desempenho intermédio.

A Figura 61 mostra a evolução temporal do processo de degradação de NO_x . Em sintonia com as conclusões anteriores, a degradação do poluente pelas amostras 1T20PCM e 1PA1T20PCM é muito menor e decorre a taxa muito inferior do que com as amostras 1T e 1T1PA. Estas duas amostras foram usadas num segundo ensaio de degradação, verificando-se repetibilidade de desempenho e até algum ganho. Isto indicia que a solução é durável, nas condições normais de utilização.

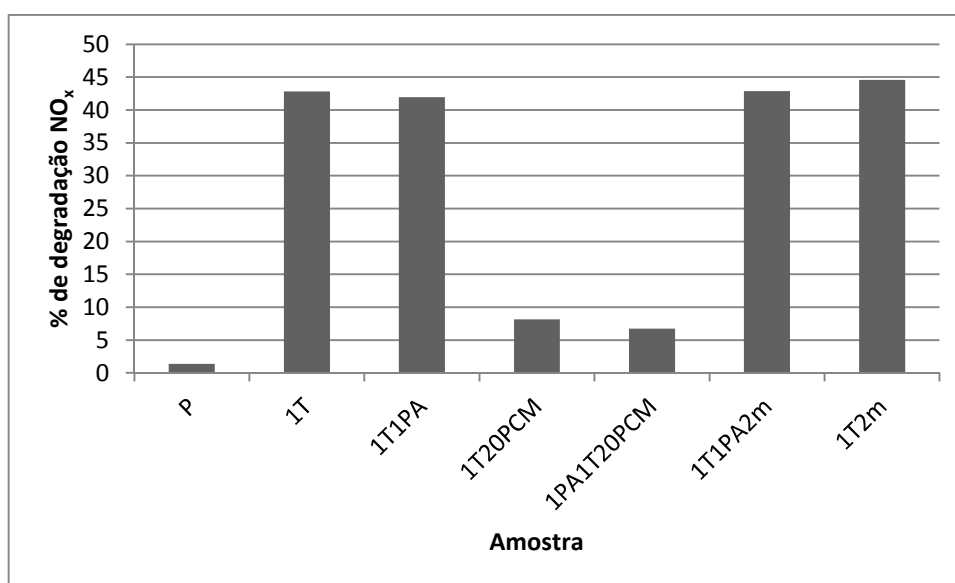


Figura 60: Valores de degradação de NO_x .

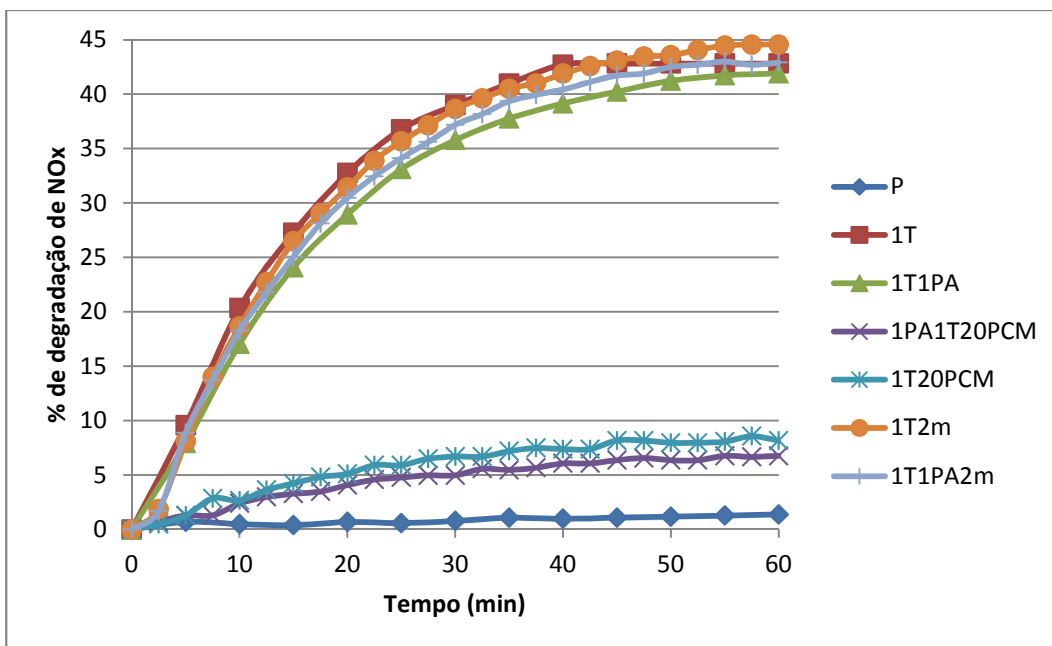


Figura 61: Evolução da % de degradação de NO_x ao longo do ensaio fotocatalítico.

7. CONCLUSÃO

Neste trabalho prático estudou-se o efeito da adição de vários adjuvantes a uma argamassa padrão, de cal e cimento, com o intuito de lhe conferir novas funções. Foi avaliada a adição de materiais de mudança de fase (PCM), poliacrilato de sódio (PA) e nanopartículas de dióxido de titânio (TiO_2), na procura de efeitos de modulação térmica, higroscópica e fotocatalítica, respetivamente. Foram ensaiadas distintas formulações, combinando os três adjuvantes e usando distintas percentagens de PA.

No estado fresco, a adição dos adjuvantes requer, em geral, um acréscimo de água de amassadura para se obter a trabalhabilidade desejada. Este efeito é mais notório com a introdução de PCM. No entanto, a amostra 1PA tem tendência oposta, e a percentagem de água diminui relativamente à argamassa P. A moldagem das amostras 1PA e 1,5PA é mais difícil, uma vez que o PA tende a absorver a água disponível na mistura e diminui o tempo aberto de conformação.

As argamassas com PCM apresentam valores de viscosidade plástica e de tensão de escoamento mais elevados que as restantes misturas, apesar da superior quantidade de água de amassadura. A redução do tempo aberto nas amostras 1PA e 1,5PA traduz-se num ganho significativo de tensão de escoamento, que impede o prolongamento do ensaio reológico.

Apesar da baixa percentagem de água usada na amassadura destas formulações, é superior a porosidade desenvolvida após cura. Este facto resulta da expansão sofrida pelas partículas de PA quando absorvem água, que gera vazios na estrutura da argamassa curada. Já nas misturas contendo PCM é óbvia e direta a relação entre a quantidade de água de amassadura e o volume de poros gerados (diminuição de densidade).

A mencionada expansão e criação de vazios com PA fragiliza a coesão entre as partículas. Em consequência, diminui a resistência mecânica das amostras com este aditivo, tanto na avaliação à compressão como nas medidas de flexão.

O valor do coeficiente de capilaridade é influenciado pela quantidade e tamanho dos poros e o seu grau de interligação. As amostras preparadas com a mistura de PA com PCM apresentam valores elevados de capilaridade. No entanto, estas amostras apresentam inchamento superficial quando contactam com a água, podendo estas alterações trazer problemas estruturais e estéticos após cura. Esta ocorrência é provocada pela expansão tardia do PA, quando o volume disponível de vazios é já reduzido. O elevado volume de PCM e o seu grau de finura agravam a situação.

Este fenómeno de inchamento também foi observado durante o ensaio de saturação das amostras em água, acabando por trazer problemas de consistência nas paredes laterais, mesmo estando estas revestidas com parafina. Na amostra 1T1PA era visível a formação de gotículas junto das partículas de PA à superfície, que assumia aspeto gelatinoso quando na presença de água. No entanto, após secagem esta alteração deixa de ser notória.

Na avaliação da capacidade das argamassas para moderar a variação de humidade ambiente, seguiu-se o método NordTest e a sua classificação. O maior valor de $MBV_{prático}$ foi observado com a amostra 1T1PA (1,51), embora as amostras 1PA e 1,5PA apresentassem valores próximos deste. Apesar do acréscimo de 0,5% de PA o valor de $MBV_{prático}$ não se alterou significativamente: 1,4 na amostra 1PA e 1,46 na argamassa 1,5PA. De salientar que a amostra 1PA Pintada originou um valor de $MBV_{prático}$ de 1,11, apesar do acabamento superficial (aplicação de tinta de água) diminuir o volume de porosidade aberta.

Segundo o método NordTest, todas as amostras com PA apresentam um desempenho considerado Bom, uma vez que têm um valor de MBV no intervalo de 1 e 2 $g/(m^2 \cdot \%HR)$. A exceção é a amostra P que apresenta um valor de 0,92, compatível com a classificação de Moderado. Apesar dos bons resultados obtidos é de salientar que há amostras que não têm capacidade de libertar toda a humidade (histerese comportamental nos ciclos de adsorção-desadsorção), nomeadamente as amostras P, 1PA, 1PA1T20PCM e 1PA Pintada. Estas amostras com o acumular dos ciclos de variação de humidade relativa tendem a ganhar massa, sendo necessário verificar se este ganho não conduz a saturação.

Ao realizar os ensaios na câmara climática e fazendo variar a temperatura ambiente (entre 10 e 40°C) foi possível avaliar a capacidade dos PCM para atenuar a amplitude da oscilação térmica. Com as amostras 20PCM, 1T20PCM e 1PA20PCM o valor de temperatura mínima é inferior em cerca de 2-3°C à registada com a amostra P, verificando-se também um atraso na resposta e a redução do tempo de residência à temperatura mínima. Por sua vez a amostra 1PA1T20PCM tem um comportamento muito semelhante à argamassa padrão. O corte na temperatura máxima é semelhante com todas as argamassas, quer a amostra P e quer a amostra com PCM, ainda que seja menor o tempo de residência nesse patamar. Estes resultados sugerem ser necessário o ajuste ativo da temperatura ambiente, por exemplo com aparelhos de ar condicionado. Por outro lado, o aumento do teor de PCM nas argamassas revela-se difícil de concretizar atendendo aos efeitos adversos induzidos nas propriedades do material (no estado fresco e endurecido).

No ensaio fotocatalítico verificou-se que as amostras com PCM na sua constituição têm menor capacidade de degradação de poluentes atmosféricos, nomeadamente NO_x . Esta menor

eficiência pode ter ocorrido devido à diminuição do número de locais ativos perto da superfície do material. As amostras 1T e 1T1PA apresentam valores globais de degradação de NO_x de cerca de 42% e um segundo teste realizado com as mesmas amostras originou desempenho semelhante (até ligeiramente superior).

Como conclusão final pode dizer-se que o balanço ponderado de diferentes aditivos permite obter argamassas que apresentam novas (múltiplas) funções, mas por vezes foi comprometido o seu processamento (mistura e aplicação) e propriedades básicas (ex. mecânicas) essencialmente, de degradação superficial.

7.1. Trabalhos futuros

Sendo esta tese a primeira tentativa de combinar numa argamassa convencional a exploração de novas funções, exploradas individualmente em trabalhos anteriores, ainda ficam por esclarecer uma série de questões e alguns outros aspetos que carecem otimização. Entre eles sugere-se para estudo futuro:

- (i) Otimização das misturas contendo PCM com PA, com objetivo de minorar a expansão superficial observada. Uma das possibilidades seria diminuir a percentagem de PCM adicionada, embora fosse também reduzida (e já não é elevada atualmente) a função de modelação térmica. Outra envolve o aumento do teor de TiO₂, para exacerbar o efeito fotocatalítico. Dada a rápida diminuição da trabalhabilidade das argamassas com PA, seria bom estudar forma de a minorar. Uma solução pode envolver a adição de maior quantidade de água na mistura e depois aguardar um curto período de tempo após mistura mecânica e antes da sua aplicação, de modo observar a quantidade de água efetivamente absorvida pela amostra.
- (ii) Aferir a durabilidade das amostras e a repetibilidade das novas funções do material. Por exemplo verificar se há perda de eficiência fotocatalítica em ensaios consecutivos ou por mero envelhecimento.
- (iii) Avaliar a capacidade de auto-limpeza das argamassas com titânia, com a realização do teste de degradação do corante Rodamina B.
- (iv) Aferir se há tendência para ocorrer saturação de vapor de água em amostras com PA, pelo aumento do número de ciclos de adsorção-desadsorção, uma vez

verificada histerese comportamental que corresponde a ganho de massa no fim de cada ensaio.

- (v) Testar diferentes acabamentos superficiais (tintas ou materiais cerâmicos) em algumas amostras e observar o efeito das diferentes funções, particularmente na capacidade de absorção de água.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Marques, S.M.F.: ‘Estudo de Argamassas de Reabilitação de Edifícios Antigos’. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2005
- 2 Santos, S.R.d.S.: ‘Argamassas pré-doseadas para rebocos de edifícios recentes’. Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, 2009
- 3 Moropoulou, A., Bakolas, A., and Anagnostopoulou, S.: ‘Composite materials in ancient structures’, *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27, (2), pp. 295-300
- 4 Gonçalves, B.J.S.: ‘Formulações de argamassas controladoras de humidade ambiente’. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2011
- 5 <http://www.weber.com.pt/argamassas-tecnicas/apoio-ao-projecto/conceitos-e-definicoes-gerais/materiais.html>, accessed 6-03-2012
- 6 ‘EN 998-1: Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar’, 2010
- 7 Paulo, R.S.V.M.N.: ‘Caracterização de Argamassas Industriais’. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2006
- 8 http://www.fazfacil.com.br/materiais/argamassas_revestimento.html Acedido a 10-02-2012
- 9 ‘EN 998-2 - Specification for mortar for masonry - Part 2: Masonry mortar’, 2010
- 10 ‘EN 12808: Grouts for tiles - Part 1: Determination of chemical resistance of reaction resin mortars.’, 2008
- 11 Gonçalves, H.I.N.: ‘Revestimento de parede como componente passivo para controlo interno de humidade ambiente.’. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2010
- 12 João Martins, J.A.: ‘Argamassas e Rebocos’, 2010
- 13 ‘EN 13813: Screed material and floor screeds - Screed material - Properties and requirements.’, 2002
- 14 Agostinho, C.S.A.: ‘Estudo da evolução do desempenho no tempo de argamassas de cal aérea.’. Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, 2008
- 15 Pena, F.E.: ‘Argamassas de Cal Hidráulica para Revestimento de Paredes.’. Tese de Mestrado, Universidade de Lisboa, 2008
- 16 Coutinho, A.D.S.: ‘Fabrico e propriedades do betão.’ (1997, 3º edição edn. 1997)
- 17 Mendonça, B.d.V.: ‘Estudo do desempenho das argamassas hidráulicas.’. Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, 2007
- 18 Rodrigues, D.A.: ‘Influência dos métodos de ensaios nas características de argamassas de cal aérea e cal hidráulica.’. Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2010
- 19 J. M. Illston, P.D.: ‘Construction Materials: Their Nature and Behaviour - 3º Edition.’ (2001, 3º edição edn. 2001)
- 20 John Bensted, R.G.B.: ‘Lea's chemistry of cement and concrete.’ (Butterworth Heineman, 1998, 4 edn. 1998)
- 21 Veiga, M.d.R.d.S.: ‘Comportamento de argamassas de revestimento de paredes - Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação’. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1998
- 22 <http://www.refratil.com.br/main.php?exec=swpage.php&id=25> acedido a 1-4-2012
- 23 http://www.watercampws.uiuc.edu/waterclear/labs/lessons/polymers_teacher_guide.pdf, accessed 25 de Junho de 2012
- 24 <http://centros5.pntic.mec.es/ies.victoria.kent/Rincon-C/Curiosid/Rc-39/RC-39.htm>, accessed 25 de Junho de 2012

- 25 T.G. Nunes, G.G., J.M. Bordado: 'Low-, stray-field imaging and spectroscopic studies of the sodium polyacrylate water uptake.', *Polymer*, 2000, 41, pp. 4643–4649
- 26 Cerolini, S., D'Orazio, M., Di Perna, C., Stazi, A.: 'Moisture buffering capacity of highly absorbing materials', *Energy and Buildings*, 2009, 41, (2), pp. 164-168
- 27 Freitas, V.: 'Transferência de humidade em paredes de edifícios.'. Tese de Doutheramento, Universidade do Porto, 1992
- 28 Ramos, N.: 'Modelação da variação da humidade relativa no interior dos edifícios'. Tese de Mestrado, Universidade do Porto, 2000
- 29 Svennberg, K.: 'Moisture Buffering in the Indoor Environment'. Doctoral Thesis, University of Lund, 2006
- 30 Hyvärinen, A.: 'Characterizing Moisture Damaged Buildings - Environmental and Biological Monitoring'. Doctoral Thesis, University of Kuopio, 2002
- 31 Mortensen, L.H.: 'Hygrothermal Microclimate on Interior Surfaces of the Building Envelope'. Doctoral Thesis, Technical University of Denmark, 2007
- 32 Svennberg, K.: 'Determination of Moisture Properties for Materials Exposed to the Indoor Air'. Licentiate thesis, Lund University, 2003
- 33 Steskens, P.: 'Modelling of hygrothermal interactions between the indoor air and the building envelope'. Doctoral Thesis, Technical University of Denmark, 2009
- 34 Moura, I.: 'A importância dos revestimentos interiores no controlo da humidade relativa interior.'. Tese de Mestrado, Universidade do Porto, 2009
- 35 Scheffler, G.A.: 'Validation of hygrothermal material modelling under consideration of the hysteresis of moisture storage.'. Doctoral Thesis, Dresden University of Technology, 2008
- 36 Carsten Rode, R.P., Berit Time, Arild Gustavsen, Tuomo Ojanen: 'Moisture Buffering of Building Materials', Technical University of Denmark, 2005
- 37 Staf Roels, H.J.: 'A comparison of the NordTest and Japanese test methods for the moisture buffering performance of building materials', *Journal of Building Physics*, 30, 137-161, 2006
- 38 Marc Olivier Abadie, K.t.C.M.: 'Moisture performance of building materials: From material characterization to building simulation using the Moisture Buffer Value concept', *Building and Environment* 44 (2009) 388– 401
- 39 H. Yoshino, T.M., K. Hasegawa: 'Moisture buffering and effect of ventilation rate and volume rate of hygrothermal materials in a single room under steady state exterior conditions.', *Building and Environment* 44 (2009) 1418–1425
- 40 P. Venkata Laxma Reddy, K.-H.K., Yong-Hyun Kim: 'A Review of Photocatalytic Treatment for Various Air Pollutants.', *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 2011, 5-3, pp. 181-188
- 41 D. Beydoun, R.A., G.Low, S. McEvoy: 'Role of nanoparticles in photocatalysis', *Journal of Nanoparticle Research*, 1999, 1, pp. 439–458
- 42 Maria Vittoria Diamanti, M.O., MariaPia Pedferri: 'Characterization of photocatalytic and superhydrophilic properties of mortars containing titanium dioxide.', *Cement and Concrete Research*, 2008, 38, pp. 1349–1353
- 43 Sang Bum Kim, H.T.H., Sung Chang Hong: 'Photocatalytic degradation of volatile organic compounds at the gas–solid interface of a TiO₂ photocatalyst.', *Chemosphere*, 2002, 48, pp. 437–444
- 44 Wolfram Maier, C.-G.N., Michael Holzer, Jan Lind, Kim Rosenbom: 'Photocatalytic plaster for indoor air purification'.

- 45 Yannick Chapuis, D.K., Christophe Guy, Jitka Kirchnerova: 'Photocatalytic Oxidation of Volatile Organic Compounds Using Fluorescent Visible Light.', Air & Waste Management Association, 2002, 52, pp. 845-854
- 46 Hyvärinen, A.: 'Characterizing moisture damaged buildings - environmental and biological monitoring.', University of Kuopio, 2002
- 47 Ioannis Karatasios, M.S.K., Vlassis Likodimos, Athanasios I. Kontos, Georgios Papavassiliou, Polycarpos Falaras, Vassilis Kilikoglou: 'Photo-induced carbonation of lime-TiO₂ mortars.', Elsevier, 2010, Environmental 95 (2010) 78–86
- 48 Maurizio Addamo, M.B., Agatino Di Paola and Leonardo Palmisano: 'Preparation and photoactivity of nanostructured anatase, rutile and brookite TiO₂ thin films.', 2006
- 49 Snejana Bakardjieva, V.S., Lorant Szatmary, Jan Subrt, Jozef Lukac, Nataliya Murafa, Daniel Niznansky, Karel Cizek, Jaromir Jirkovskyc, Nadia Petrovad: 'Transformation of brookite-type TiO₂ nanocrystals to rutile: correlation between microstructure and photoactivity.', Journal of Materials Chemistry, 2006
- 50 Bertrand Ruot, A.P., François Olive, Laurent Guillot, Laurent Bonafous 'TiO₂-containing cement pastes and mortars: Measurements of the photocatalytic efficiency using a rhodamine B-based colourimetric test.', Solar Energy, 2009, 83, pp. 1794–1801
- 51 J.S. Dalton, P.A.J., N.G. Jones, J.A. Nicholson, K.R. Hallam, G.C. Allen: 'Photocatalytic oxidation of NO_x gases using TiO₂: a surface spectroscopic approach.', Elsevier, 2011, Environmental Pollution 120 (2002) 415–422
- 52 Ana Josina Fonseca, F.P., Maria Filomena Macedo, Nuno Leal, Anna Romanowska-Deskins, Leonila Laiz, Antonio Gómez-Bolea, Cesareo Saiz-Jimenez: 'Anatase as an alternative application for preventing biodeterioration of mortars: Evaluation and comparison with other biocides.', International Biodeterioration & Biodegradation, 2010, 64, pp. 388 - 396
- 53 Akira Fujishima, T.N.R., Donald A. Tryk: 'Titanium dioxide photocatalysis.', Photochemistry and Photobiology, 2000, 1, pp. 1 - 21
- 54 Boris Shelimov, N.T., Galina Baeva, Alexander Stakheev, Vladimir Kazansky: 'Photocatalytic purification of indoor air from nitrogen oxide contaminants on modified TiO₂-based catalysts.', Catalysis Today 2011, 176, pp. 3 - 6
- 55 João V. Staub de Melo, G.T.: 'Evaluation of the influence of environmental conditions on the efficiency of photocatalytic coatings in the degradation of nitrogen oxides (NO_x).', Building and Environment, 2012, 49, pp. 117 - 123
- 56 M. Arandigoyen, B.B.-S., J.I. Alvarez, D.A. Lange: 'Variation of microstructure with carbonation in lime and blended pastes.', Applied Surface Science, 2006, 252, pp. 7562–7571
- 57 Jinhua Mo, Y.Z., Qiujian Xu, Jennifer Joaquin Lamson, Rongyi Zhao: 'Photocatalytic purification of volatile organic compounds in indoor air: A literature review.', Atmospheric Environment, 2009, 43, pp. 2229–2246
- 58 Jun Chen, C.-S.P.: 'Photocatalytic construction and building materials: From fundamentals to applications.', Building and Environment, 2009, 44, pp. 1899–1906
- 59 C.H.Ao, S.C.L.: 'Indoor air purification by photocatalyst TiO₂ immobilized on an activated carbon filter installed in an air cleaner.', Elsevier, 2004
- 60 O. Carp, C.L.H., A. Reller 'Photoinduced reactivity of titanium dioxide.', Progress in Solid State Chemistry 2004, 32, pp. 33–177
- 61 Otmar Geiss, C.C., Josefa Barrero-Moreno, Dimitrios Kotzias: 'Photocatalytic degradation of organic paint constituents-formation of carbonyls.', Building and Environment, 2012, 48, pp. 107e112
- 62 Herrmann, J.-M.: 'Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants.', Catalysis Today, 1999, 53, pp. 115–129
- 63 Marye Anne Fox, M.T.D.: 'Heterogeneous Photocatalysis', 1993, 93, pp. 341357

- 64 Sid Devahasdin, C.F., Jr., Kuyen Li, Daniel H. Chen: 'TiO₂ photocatalytic oxidation of nitric oxide: transient behavior and reaction kinetics.', *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 2003, 156, pp. 161–170
- 65 G. Husken, M.H., H.J.H. Brouwers: 'Experimental study of photocatalytic concrete products for air purification', *Building and Environment*, 2009, 44, pp. 2463–2474
- 66 Lucas, S.M.S.d.O.: 'Argamssas funcionais para uma construção sustentável.'. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 2011
- 67 A. Felix Regin, S.C.S., J.S. Saini: 'Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review.', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12, pp. 2438–2458
- 68 Vineet Veer Tyagi, D.B.: 'PCM thermal storage in buildings: A state of art.', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11, pp. 1146–1166
- 69 Nihal Sarier, E.O.: 'Organic phase change materials and their textile applications: An overview', *Thermochimica Acta*, 2012, 540, pp. 7–60
- 70 Mohammed M. Farid, A.M.K., Siddique Ali K. Razack, Said Al-Hallaj: 'A review on phase change energy storage: materials and applications', *Energy Conversion and Management*, 2004, 45, pp. 1597–1615
- 71 Ruben Baetens, B.P.J., Arild Gustavsen: 'Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review.', *Energy and Buildings*, 2010, 42, pp. 1361–1368
- 72 Belén Zalba, J.M., Luisa F. Cabeza, Harald Mehling: 'Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications', *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23, pp. 251–283
- 73 L.F. Cabeza, A.C., C. Barreneche, A. de Gracia, A.I. Fernández: 'Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 5, pp. 1675–1695
- 74 A. Pasupathya, R.V., R.V. Seeniraj: 'Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments.', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12, pp. 39–64
- 75 D. Feldman, D.B., D. Hawes 'Low chain esters of stearic acid as phase change materials for thermal energy storage in buildings. ', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1995, 36, pp. 311 - 322
- 76 Frédéric Kuznik, D.D., Kevyn Johannes, Jean-Jacques Roux: 'A review on phase change materials integrated in building walls.', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15, pp. 379–391
- 77 Amar M. Khudhair, M.M.F.: 'A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials.', *Energy Conversion and Management*, 2004, 45, pp. 263–275
- 78 Gonçalves, M.M.: 'Estudo de novos materiais de mudança de fase '. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2009