

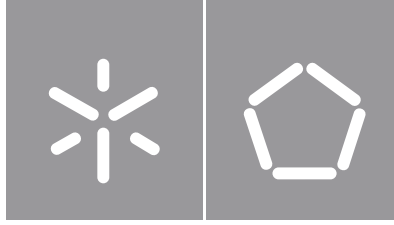


Ingried de Aguiar

Desenvolvimento de placas à base de cimento com incorporação de materiais de mudança de fase (PCM) para revestimento interior

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Ingried de Aguiar

Desenvolvimento de placas à base de cimento com incorporação de materias de mudança de fase (PCM) para revestimento interior

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis

Trabalho efetuado sob a orientação do(a)
Professor Doutor José Luís Barroso de Aguiar
Doutora Sandra Raquel Leite da Cunha

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação só foi possível pelo apoio de diversas pessoas. Foram tempos difíceis, porém houve muitos momentos de felicidade e conquista. Esta sem dúvida é uma delas. Desta forma quero agradecer:

Ao meu orientador, Professor Doutor José Luís Barroso de Aguiar, por todo seu conhecimento e experiência transmitida, e pela ajuda nas correções. Agradeço também por aceitar conduzir este trabalho de dissertação.

À minha orientadora, Doutora Sandra Raquel Leite da Cunha, por estar sempre à disposição, pelas correções e ensinamentos, pela paciência e por sempre indicar a direção correta que o trabalho deveria seguir. Sem a sua ajuda este trabalho não seria possível.

Aos funcionários da Universidade do Minho e ao Carlos por toda a ajuda e orientação no laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil.

À minha família por todo o apoio e por me darem forças para continuar nesta caminhada. Obrigada por compreenderem a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho. Agradeço também ao esforço deles pela minha educação.

Aos meus amigos pelos momentos de confraternização e pelas risadas compartilhadas nessa jornada. Obrigada por tornarem esta caminhada mais leve. Agradeço também à paciência por todos os convites recusados e por não desistirem de mim.

Aos colegas de curso com quem convivi nestes últimos anos e que permitiram uma troca de experiência valiosa e companheirismo.

A todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

RESUMO

Atualmente, a aceleração do ritmo de crescimento das áreas urbanas e o aumento da procura por conforto térmico tem provocado um acréscimo no consumo energético. Visto que grande parte do consumo de energia elétrica no setor residencial está associado ao aquecimento e arrefecimento é importante procurar por soluções que visem aumentar a eficiência energética dos edifícios.

A utilização de materiais de mudança de fase (PCM) em produtos de construção é uma solução para a melhoria da eficiência energética dos edifícios devido à sua boa capacidade de diminuir e deslocalizar os consumos energéticos, demonstrando benefícios sociais, económicos e ambientais, contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável.

Como contribuição para esta problemática foram desenvolvidas placas à base de cimento com incorporação direta de PCM não encapsulado. Os principais resultados obtidos com este trabalho foram informações sobre a geometria e avaliação do comportamento físico e mecânico das placas.

Através de pesquisa de mercado, estudo de normas e disponibilidade de moldes definiu-se como ideal a produção de placas com formato prismático e dimensões de 200x100x20mm³. Foram produzidas placas de referência (0% PCM) e placas com 5%, 10% e 20% de teor de incorporação de PCM. Foi realizado o estudo das propriedades físicas e mecânicas das placas dividido em duas partes, sendo parte do estudo referente aos ensaios de argamassa e parte do estudo em escala real, referente às placas desenvolvidas.

A realização deste trabalho permitiu concluir que é possível desenvolver placas à base de cimento com incorporação de PCM para revestimento interior. A incorporação de PCM alterou os comportamentos físicos e mecânicos das mesmas, mas não impedindo a sua aplicação prática.

Palavras-chave: eficiência energética, sustentabilidade, material de mudança de fase, placas à base de cimento.

ABSTRACT

Nowadays, the growth rate's acceleration of urban areas and the rise in demand for thermal comfort has caused an increase in energy consumption. Since the electricity consumption in the residential sector is associated with heating and cooling, it is important to look for solutions that aim to increase the energy efficiency of buildings.

The use of phase change materials (PCM) in construction products is a solution for improving the energy efficiency of buildings due to its good ability to reduce and relocate energy consumption, it also demonstrates social, economic, and environmental benefits, thus contributing to sustainable development.

As a contribution to this problem, cement boards were developed with direct incorporation of non-encapsulated PCM. The main results obtained with this work were information about the geometry and evaluation of the physical and mechanical behavior of the boards.

Through market research, the study of standards, and the availability of molds, the production of rectangular-shaped boards with dimensions of 200x100x20mm³ was defined as ideal. It was produced reference boards (0% PCM) and boards with 5%, 10%, and 20% of incorporation of PCM. The study of the physical and mechanical properties of the boards was carried out, divided into two parts, part of the study referring to the mortar's tests and part of the study in real scale, referring to the developed boards.

The fulfillment of this work allowed us to conclude that it is possible to develop cement boards with the incorporation of PCM for interior coating. The incorporation of PCM modified the physical and mechanical behavior of the boards but did not prevent their practical application.

Keywords: energy efficiency, sustainability, phase change material, cement boards.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Enquadramento	12
1.2	Motivação e objetivos	14
1.3	Metodologia	15
1.4	Organização e descrição do conteúdo.....	16
2.	ESTADO DO CONHECIMENTO.....	19
2.1	Construção sustentável e a sustentabilidade nos materiais de construção	19
2.2	Eficiência energética	21
2.3	Argamassas e placas à base de cimento.....	24
2.4	Materiais de mudança de fase.....	26
2.4.1	Armazenamento térmico	27
2.4.2	Classificação dos PCM	30
2.4.2.1	Orgânicos	31
2.4.2.2	Inorgânicos	32
2.4.2.3	Eutéticos	33
2.4.2.4	Comparação entre os tipos de PCM.....	33
2.4.3	Propriedades dos PCM	33
2.4.4	Métodos de incorporação de PCM	36
2.4.4.1	Incorporação direta	36
2.4.4.2	Encapsulamento	36
2.4.4.3	Imersão	38
2.4.4.4	Estabilização	38
2.4.5	Aplicação do PCM na construção.....	39
2.4.5.1	PCM em paredes	40

2.4.5.2	PCM em tetos e coberturas	41
2.4.5.3	PCM em pavimentos	42
2.4.5.4	PCM em janelas.....	43
3.	MATERIAIS, COMPOSIÇÕES E DIMENSÃO DAS PLACAS	45
3.1	Materiais utilizados.....	45
3.1.1	Cimento Portland	45
3.1.2	Cinzas volantes	45
3.1.3	Agregados.....	46
3.1.4	Material de mudança de fase (PCM)	47
3.1.5	Água	48
3.2	Composições	49
3.3	Dimensão das placas à base de cimento com PCM	50
4.	PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS.....	55
4.1	Argamassa com incorporação de materiais de mudança de fase.....	55
4.1.1	Propriedades físicas da argamassa.....	55
4.1.1.1	Trabalhabilidade	55
4.1.2	Propriedades mecânicas da argamassa.....	57
4.1.2.1	Resistência à flexão	57
4.1.2.2	Resistência à compressão.....	59
4.2	Placas à base de cimento com incorporação de materiais de mudança de fase.....	60
4.2.1	Propriedades físicas das placas.....	61
4.2.1.1	Massa volúmica real e aparente e porosidade total e aberta	61
4.2.1.2	Absorção de água à pressão atmosférica	64
4.2.1.3	Absorção de água por capilaridade.....	66
4.2.2	Propriedades mecânicas das placas	69

4.2.2.1	Resistência à flexão sob carga centrada	69
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
5.1	Argamassa com incorporação de materiais de mudança de fase.....	72
5.1.1	Trabalhabilidade	72
5.1.2	Resistência à flexão.....	74
5.1.3	Resistência à compressão	75
5.2	Placas à base de cimento com incorporação de materiais de mudança de fase.....	77
5.2.1	Massa volúmica real e aparente e porosidade total e aberta.....	77
5.2.2	Absorção de água à pressão atmosférica	81
5.2.3	Absorção de água por capilaridade.....	82
5.2.4	Resistência à flexão sob carga centrada.....	85
6.	CONCLUSÃO	87
6.1	Considerações finais	87
6.2	Trabalhos futuros	89
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Metodologia de Investigação.	16
Figura 2 - Construção Sustentável [3].	19
Figura 3 - Fornecimento de energia primária, adaptado de IEA [16].	21
Figura 4 - Consumo de energia por setor, adaptado de IEA [17].	22
Figura 5 - Top 10 de emissões de CO ₂ em usos finais, adaptado de IEA [19].	22
Figura 6 - Consumo de energia residencial, adaptado de IEA [19].	23
Figura 7 - Exemplos de projetos [24 - 26].	25
Figura 8 - Processo de mudança de fase do PCM, adaptado de Magendran <i>et al.</i> [27].	26
Figura 9 - Perfil de mudança de fase dos PCMs, adaptado de Gil <i>et al.</i> [30].	29
Figura 10 - Classificação dos PCMs, adaptado de Sharma <i>et al.</i> [29].	31
Figura 11 - Morfologia das microcápsulas, adaptado de Jamekhorshid <i>et al.</i> [50].	37
Figura 12 - Geometrias comuns para macroencapsulamento, adaptado de Salunkhe e Shembekar [47].	38
Figura 13 - Curva Granulométrica da Areia A e Areia B [67].	47
Figura 14 - Entalpia do PCM não encapsulado [7].	48
Figura 15 - Modelo de placa de cimento com PCM.	51
Figura 16 - Exemplo de equipamento utilizado no ensaio, adaptado de EN 1015-3 [69].	56
Figura 17 - Exemplo de argamassa testada no ensaio.	57
Figura 18 - Configuração do ensaio, adaptado de EN 1015-11 [70].	58
Figura 19 - Exemplo de ensaio de resistência à flexão.	59
Figura 20 - Exemplo de ensaio de resistência à compressão.	60
Figura 21 - Recipiente utilizado para o ensaio.	62
Figura 22 - Método Volunómetro de Le Chatelier.	64
Figura 23 - Ensaio de absorção de água à pressão atmosférica.	66
Figura 24 - Ensaio de absorção de água por capilaridade.	67
Figura 25 - Configuração do ensaio, adaptado de NP EN 12372 [75].	70
Figura 26 - Ensaio de resistência à flexão sob carga centrada.	70
Figura 27 - Relação da temperatura da água e o diâmetro de espalhamento.	72
Figura 28 - Relação Água/Ligante das Argamassas.	73

Figura 29 - Relação Líquido/Ligante das Argamassas.	74
Figura 30 - Resistência à flexão.	75
Figura 31 - Resistência à compressão.	76
Figura 32 - Volume de poros abertos.	77
Figura 33 - Volume Aparente.	78
Figura 34 - Massa volúmica aparente.	79
Figura 35 - Porosidade Aberta.	79
Figura 36 - Massa volúmica real.	80
Figura 37 - Porosidade total.	81
Figura 38 - Variação da absorção de água à pressão atmosférica.	82
Figura 39 - Exemplo de gráfico de absorção capilar.	83
Figura 40 - Coeficiente de absorção capilar.	84
Figura 41 - Absorção capilar.	84
Figura 42 - Resistência à flexão das placas.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre os diferentes tipos de PCM, adaptado de Akeiber <i>et al.</i> [44].	34
Tabela 2 - Toxicidade, riscos para saúde e impacto ambiental, adaptado de Chandel e Agarwal [43]. ...	35
Tabela 3 - Propriedades dos PCMs, adaptado de Magendran <i>et al.</i> , Akeiber <i>et al.</i> e Regin <i>et al.</i> [27,44,45].	35
Tabela 4 - Características do Cimento Portland CEM II B - L 32.5N.	46
Tabela 5 - Propriedades do PCM não encapsulado.	48
Tabela 6 - Densidade dos materiais.	49
Tabela 7 - Teor de PCM e relação água/ligante das argamassas.	50
Tabela 8 - Formulação das argamassas (kg/m ³).	50
Tabela 9 - Pesquisa de placas para revestimento.	52
Tabela 10 - Plano do ensaio de absorção de água por capilaridade.	68
Tabela 11 - Classificação das argamassas [21].	76
Tabela 12 - Classificação das argamassas em relação à resistência à compressão pela NP EN 998-1.	76

Capítulo 1

Introdução

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

“A humanidade tem a capacidade de criar o desenvolvimento sustentável para garantir que atenda às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades”. Esta foi a definição de Desenvolvimento Sustentável apresentada no Relatório de Brundtland em 1987 que tinha como objetivos, entre eles, propor estratégias de meio ambiente para atingir o desenvolvimento sustentável até o ano de 2000 e além [1].

As preocupações com o desenvolvimento sustentável não começaram apenas com o relatório de Brundtland, mas sim antes deste acontecimento. Desde os anos 60, com a publicação do livro Primavera Silenciosa, alertava-se para os efeitos da utilização de pesticidas e posteriormente em 1972, com a realização de uma conferência da Organização das Nações Unidas - ONU sobre o ambiente humano em Estocolmo, originou-se o seu programa para o meio ambiente [2].

A temática do desenvolvimento sustentável começou a aparecer no final dos anos 60 e início dos anos 70, onde passou a considerar-se essencial a convivência em harmonia com a natureza para o bem-estar e a sobrevivência humana. Na década de 70 devido à crise do petróleo houve a constatação que os recursos provenientes da terra não eram infinitos, assim a discussão sobre a poupança de energia começou, tendo-se iniciado uma consciência social acerca da fragilidade do planeta e a palavra ecologia começou a ser largamente utilizada [3].

O desenvolvimento sustentável é um conceito mais amplo que a proteção do ambiente. Envolve a preocupação pelas gerações futuras e a manutenção ou melhoria de salubridade e integridade do ambiente a longo prazo. Inclui também as preocupações com a qualidade de vida, e não só o crescimento económico, a equidade entre as pessoas no presente e entre gerações, a preocupação com os problemas sociais, sanitários e éticas do bem-estar humano. Pretende-se que as atividades para a realização das aspirações por desenvolvimento sejam projetadas para minimizarem o uso dos recursos ao longo do tempo [4].

No final do século XX, na conferência do Rio de Janeiro (Rio 92), o conceito de construção sustentável teve ênfase pela primeira vez. Na época, foi definido que o conceito visava o aumento de oportunidades às gerações futuras, através de uma nova estratégia ambiental direcionada à produção de construções melhor adaptadas ao meio ambiente e as exigências dos seus usuários. A construção sustentável é uma resposta da indústria da construção para se atingir as metas e objetivos do desenvolvimento sustentável [3].

O documento chamado “Princípios Estabelecidos e Modelo de Construção Sustentável” foi produzido por Charles J. Kibert, em 1994, com o objetivo de estabelecer critérios de sustentabilidade para a construção, definir questões e princípios da construção sustentável e criar um modelo para a indústria da construção usar uma ferramenta para entender e avaliar abordagens alternativas para alcançar um ambiente construído ambientalmente mais saudável [5].

O conselho internacional da construção (CIB), uma organização internacional de rede de pesquisa em construção, definiu em 1994 a construção sustentável como “criar e operar um ambiente construído saudável com base na eficiência dos recursos e no design ecológico” [6].

A construção sustentável possui diversos pilares sendo um deles a economia de energia. Os edifícios devem ser concebidos assegurando uma gestão eficiente dos recursos energéticos visto que o uso de energia apresenta um maior impacto ambiental nos edifícios. Assim, torna-se necessário a minimização dos consumos energéticos durante a fase de construção até a fase de utilização do edifício [4].

Alguns materiais contribuem para a redução do consumo energético como é o caso dos Materiais de Mudança de Fase (em inglês, *Phase Change Materials* – PCM) sendo a sua utilização uma nova opção para uma construção mais sustentável.

A capacidade dos materiais de mudança de fase de diminuir e deslocalizar os consumos energéticos potencializam a sua utilização em argamassas como uma solução para melhoria da eficiência energética dos edifícios. Sendo assim, a incorporação dos mesmos em argamassas de revestimento interior possui benefícios sociais, económicos e ambientais, possibilitando uma contribuição nas diferentes dimensões

do desenvolvimento sustentável [7].

1.2 Motivação e objetivos

O nosso planeta está a enfrentar desafios ambientais que requerem medidas significativas. É necessário dar um novo rumo ao setor da construção civil no sentido de uma maior sustentabilidade, sendo também indispensável uma mudança na forma como se projetam e constroem os edifícios.

A utilização dos materiais de mudança de fase apresenta benefícios sociais, ambientais e económicos. Os benefícios sociais encontram-se relacionados com o aumento do conforto térmico. O benefício ambiental pode ser descrito como a redução do consumo de fontes de energia não renovável. A dimensão económica refere-se aos custos de aplicação que são amortizados pelo utilizador devido a diminuição do consumo energético [8].

Diante de todos os fatores expostos anteriormente houve uma motivação para o estudo do tema pois o PCM é um material inovador e promissor que deve ser mais explorado. Devido a pesquisas anteriores [7–11] pode concluir-se que o mesmo apresenta bons resultados. Sendo assim, a incorporação de PCM em placas à base de cimento pode ampliar a sua utilização na construção civil. As placas à base de cimento com incorporação de materiais de mudança de fase trazem uma nova opção para a melhoria térmica dos edifícios podendo ser utilizadas em edifícios novos e reabilitações. As mesmas podem também trazer características arquitetónicas interessantes para os seus utilizadores.

O objetivo principal desta dissertação consiste no desenvolvimento de placas à base de cimento com incorporação de materiais de mudança de fase (PCM) para revestimento interior. Para que o objetivo principal fosse atingido foram definidos os objetivos específicos descritos abaixo:

- Estudar as dimensões e forma das placas;
- Produzir placas à base de cimento com incorporação de vários teores de PCM;
- Avaliar a influência da incorporação direta de PCM nas propriedades físicas e mecânicas das placas.

Esta dissertação tem um carácter inovador que é a produção de placas à base de cimento com PCM. Os principais resultados obtidos com este trabalho são:

- Obtenção de informações sobre a geometria das placas com incorporação direta de PCM não encapsulado;
- Avaliação do comportamento físico das placas com incorporação direta de PCM não encapsulado;
- Avaliação do comportamento mecânico das placas com incorporação direta de PCM não encapsulado.

1.3 Metodologia

A metodologia de investigação adotada, demonstrada na Figura 1, consistiu primeiramente em pesquisa bibliográfica, dentro desta fase destacou-se o estudo das dimensões das placas de acordo com as dimensões correntes no mercado e o estudo das normas referentes a placas para revestimento de paredes. A norma de referência utilizada foi a NP EN 1469 que descreve os requisitos das placas para revestimento de paredes em pedra natural. Apesar da existência de normas de painéis com cimento, fibrocimento e madeira, esta norma foi adotada devido ao fato de ser específica para placas usadas no revestimento de paredes.

A segunda fase consistiu no estudo da composição das argamassas das futuras placas. Esta fase teve por base trabalhos anteriores desenvolvidos na Universidade do Minho e na prática laboratorial que consistiu na determinação da trabalhabilidade destas argamassas através de ensaios de espalhamento, de acordo com a norma EN 1015-3. Posteriormente, foram fabricados provetes prismáticos com dimensões de 40x40x16mm³, de acordo com a EN 1015-11, feitos com a argamassa sem incorporação de PCM e com a incorporação de 5%, 10% e 20% de PCM. Após 28 dias foram realizados ensaios de flexão e compressão.

Na terceira fase, foram elaborados provetes sem incorporação de PCM, como referência, e provetes de cimento com incorporação de diferentes teores de PCM, sendo eles 5%, 10% e 20%. Nesta fase foram realizados ensaios para analisar as propriedades físicas e mecânicas das placas seguindo as normas para placas à base de cimento, as dimensões dos provetes foram definidas pelas normas e pelo estudo

da primeira fase.

Os principais ensaios realizados, tendo como referência a NP EN 1469, foram os seguintes: resistência a flexão (EN 12372), absorção de água à pressão atmosférica (EN 13755), absorção de água por capilaridade (EN 1925) e massa volúmica e porosidade aberta (EN 1936). Posteriormente os resultados obtidos foram analisados tendo em consideração a solução de referência (0% PCM).

Todos os procedimentos laboratoriais foram desenvolvidos no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

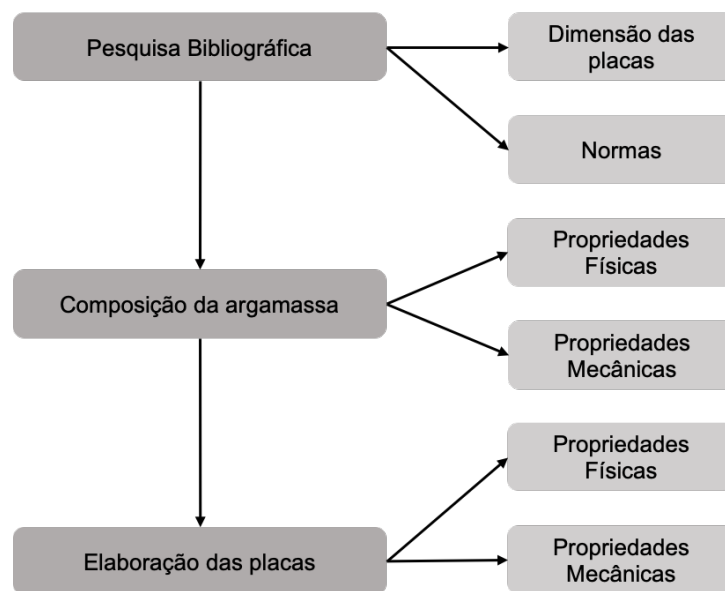


Figura 1 - Metodologia de Investigação.

1.4 Organização e descrição do conteúdo

Esta dissertação compreende 6 capítulos sendo os mesmos divididos da seguinte maneira: introdução; estado do conhecimento; materiais, composições e dimensão das placas; procedimentos de ensaio; resultados e discussão; e conclusão.

No primeiro capítulo é apresentado um breve enquadramento acerca do tema, a motivação e objetivos da dissertação.

No segundo capítulo são abordados alguns temas como a construção sustentável, a eficiência energética, a sustentabilidade dos materiais de construção. Também são apresentadas as definições e conceitos dos materiais de mudança de fase.

No terceiro capítulo são definidos os materiais utilizados e sua mistura para compor as placas com incorporação de material de mudança de fase. Também apresenta o estudo feito sobre as placas à base de cimento e sua dimensão.

No quarto capítulo é descrita a metodologia dos ensaios realizados.

No quinto capítulo são apresentados os resultados obtidos e suas respectivas discussões.

Por último, no sexto capítulo apresenta-se a conclusão da dissertação e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estado do Conhecimento

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

Neste capítulo são abordados tópicos referentes ao tema da dissertação como a construção sustentável e a sustentabilidade nos materiais de construção, eficiência energética, aplicação de placas à base de cimento e uma abordagem sobre os materiais de mudança de fase (PCM).

2.1 Construção sustentável e a sustentabilidade nos materiais de construção

Construção sustentável é um tema amplamente discutido nos dias de hoje sendo o conceito mais amplo do que a palavra construção, podendo ser aplicado também como sustentabilidade do meio construído. Este tema pode englobar: as estruturas construídas, os processos de utilização e sua manutenção, e o ciclo de vida. Os aspectos a se considerar na construção sustentável, juntamente com a qualidade ambiental, são as condicionantes económicas, equidade social e legado cultural, representados na Figura 2 [3].

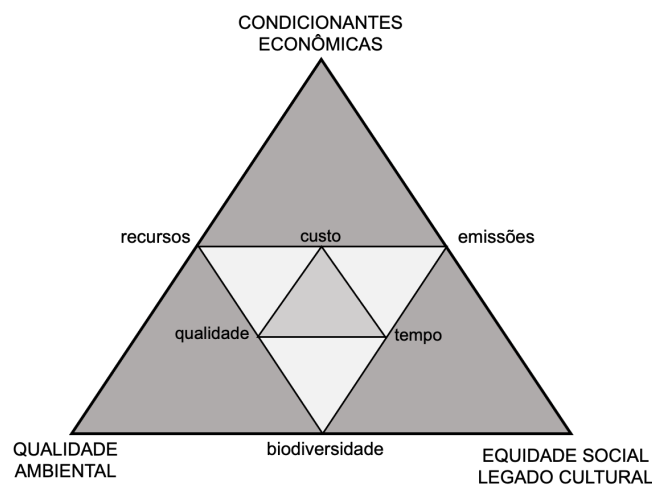


Figura 2 - Construção Sustentável [3].

A indústria da construção é, após a indústria de alimentos, a maior consumidora de matérias-primas no mundo. Uma das metas amplamente aceite para o desenvolvimento sustentável futuro é a redução drástica no uso de matérias-primas. Esta redução é ainda mais importante para os escassos recursos não renováveis uma vez que a produção destes materiais está ligada às principais questões energéticas e ambientais da atualidade [12].

Segundo Kibert, o conselho internacional da construção definiu a meta da construção sustentável como: criar e operar um ambiente construído saudável com base na eficiência de recursos e projetos ecológicos. Foram introduzidos sete princípios de sustentabilidade na construção: redução do consumo de recursos, reutilização de recursos, utilizar recursos recicláveis, proteger a natureza, eliminar as toxinas, aplicar o custo do ciclo de vida e focar na qualidade [6].

As práticas sustentáveis usadas na engenharia refletem predominantemente a incorporação de materiais sustentáveis alternativos, incluindo materiais reutilizáveis; materiais que utilizam menos recursos durante sua extração, fabricação ou transporte; ou materiais reciclados no final da vida útil de um projeto. Outro aspecto de sustentabilidade na construção é a capacidade de reduzir o consumo de energia durante a construção e operações ou usando tecnologias alternativas de energia renovável [13].

As inovações tecnológicas que visam a sustentabilidade estão a ganhar o mercado cada vez mais. A construção civil é um setor com grande consumo de recursos naturais, porém apresenta também um grande potencial para introdução de novos materiais e tecnologias. Há uma grande procura por materiais alternativos utilizando produtos que visem a redução de custos, agilidade na execução, durabilidade e melhoria das propriedades mecânicas [4].

A sustentabilidade dos materiais de construção está diretamente ligada com a durabilidade destes materiais. A definição de durabilidade de um material é a capacidade de suportar o desgaste ou a deterioração. Materiais mais duráveis apresentam menos ações de reabilitação, originando assim menores consumos de matéria-prima, energia e produção de resíduos [7].

De acordo com alguns investigadores, uma forma eficiente para a indústria da construção se tornar uma atividade sustentável é a incorporação de resíduos de outras indústrias em materiais de construção. O cimento Portland e o betão são os materiais mais utilizados na indústria da construção em todo o mundo, com tendência a aumentar nos próximos anos, sendo assim existe um esforço da comunidade académica em estudar a utilização de resíduos nos betões, como as cinzas volantes [14].

Uma escolha adequada dos materiais de construção pode contribuir não só para a sustentabilidade

ambiental, mas também para a redução da quantidade de energia necessária para construção dos edifícios.

2.2 Eficiência energética

Eficiência energética é um tema que está na agenda de diversas políticas públicas de países desenvolvidos e no geral refere-se ao fato de usar menos energia para produzir a mesma quantidade de serviços [15]. Em outras palavras a eficiência energética é otimizar o consumo de energia.

A Figura 3 mostra que ao longo dos anos o fornecimento de energia primária, energia disponível na natureza antes de ser convertida ou transformada, tem aumentado. Pode também verificar-se que a geração por fontes energéticas como carvão, gás natural e hidráulica tiveram crescimento de destaque com o passar dos anos [16].

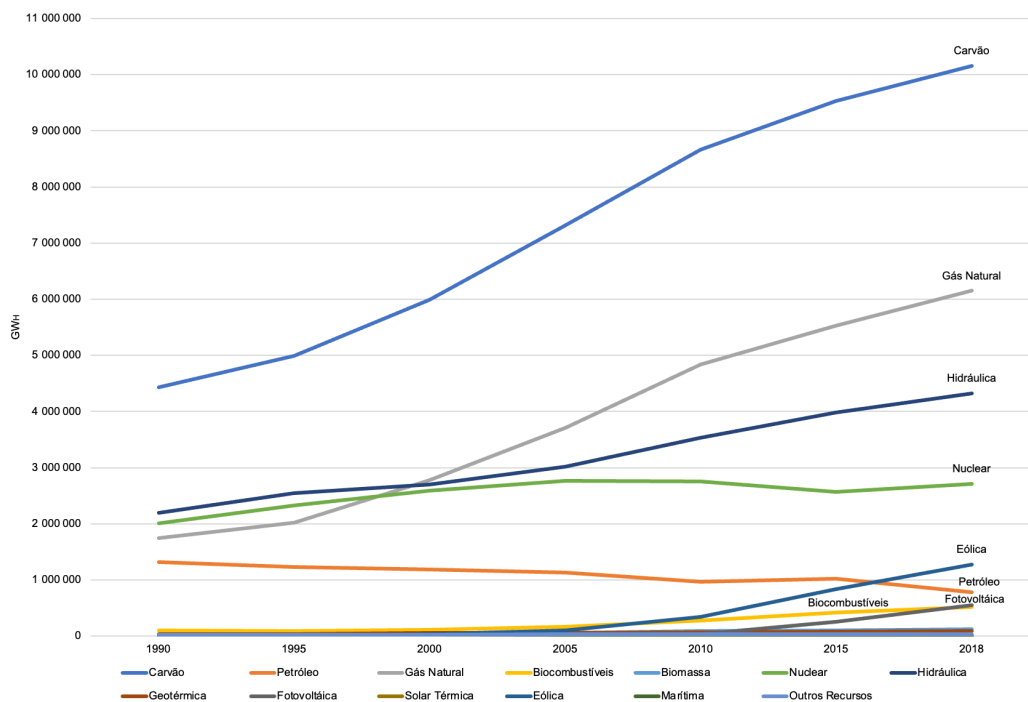


Figura 3 - Fornecimento de energia primária, adaptado de IEA [16].

Outra análise sobre o tema pode ser feita através da Figura 4 que mostra o consumo de energia por setores tendo um destaque nos setores industrial, de transporte e residencial onde houve um maior crescimento ao longo dos anos [17].

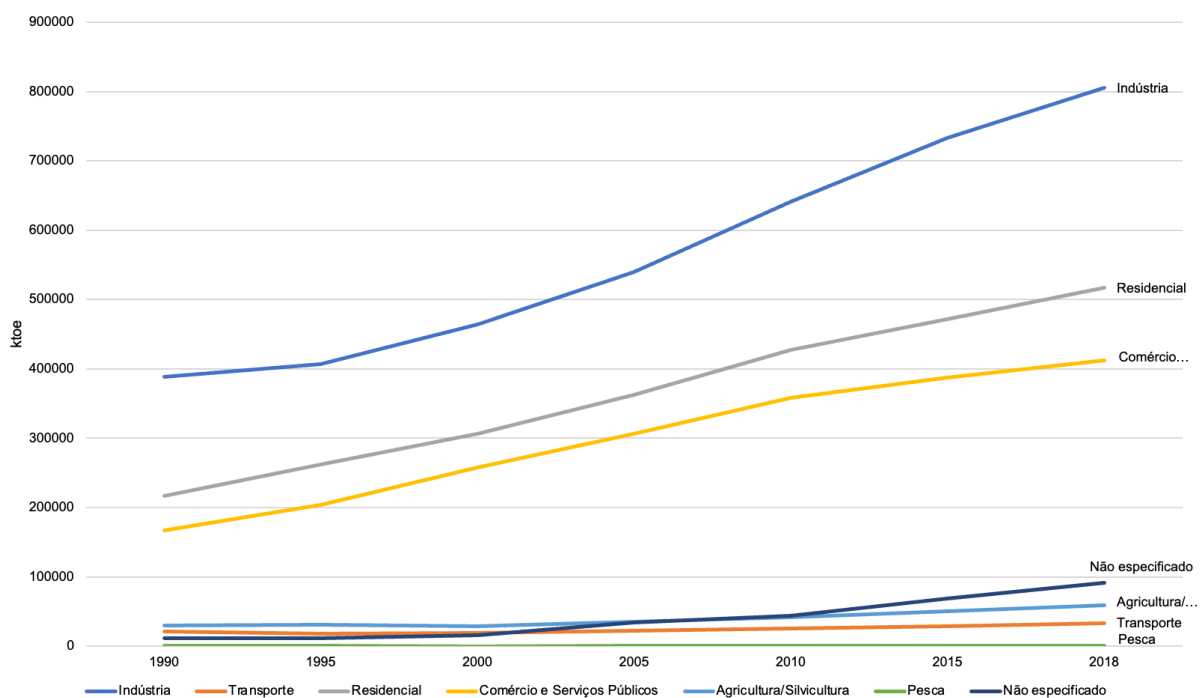


Figura 4 - Consumo de energia por setor, adaptado de IEA [17].

O rápido crescimento do consumo de energia no mundo já causou preocupações sobre dificuldades de suprimento, esgotamento dos recursos energéticos e impactos ambientais como a depleção da camada de ozônio, o aquecimento global e as mudanças climáticas [18]. A Figura 5 mostra a emissão de dióxido de carbono por uso em 2018 e pode verificar-se que o setor residencial contribuiu de maneira significativa nas emissões [19].

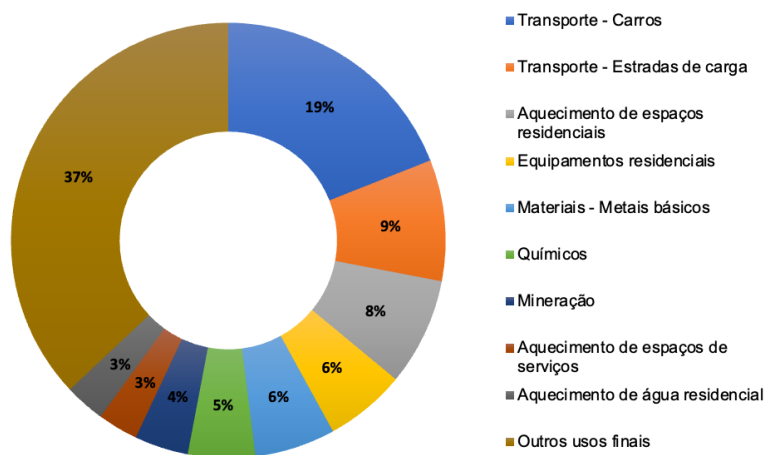


Figura 5 - Top 10 de emissões de CO₂ em usos finais, adaptado de IEA [19].

A indústria da construção é um gigante entre os consumidores de energia, a sua utilização é dividida entre produção, operação e demolição nas fases dos edifícios e totaliza, no mínimo, 40% de toda a energia usada na sociedade. A construção sustentável é, portanto, um dos desafios mais importantes que enfrentamos [12].

O crescimento populacional, o aumento da demanda por serviços de construção e níveis de conforto, juntamente com o aumento do tempo gasto no interior dos edifícios faz com que a tendência de aumento da demanda de energia continue no futuro. O setor da construção atraiu a atenção de todo o mundo pela sua contribuição no consumo global de energia. Entre os serviços de construção, o crescimento do uso de energia nos sistemas de climatização é particularmente significativo [18].

O aquecimento do ambiente foi o responsável por mais da metade do consumo de energia no setor residencial, demonstrado na Figura 6, com as maiores participações nos países europeus e as menores participações nos países da Ásia e Oceânia. Houve uma melhoria na eficiência energética com relação à climatização devido a um melhor isolamento dos edifícios, reforma de edifícios antigos e melhorias em equipamentos de aquecimento [19].

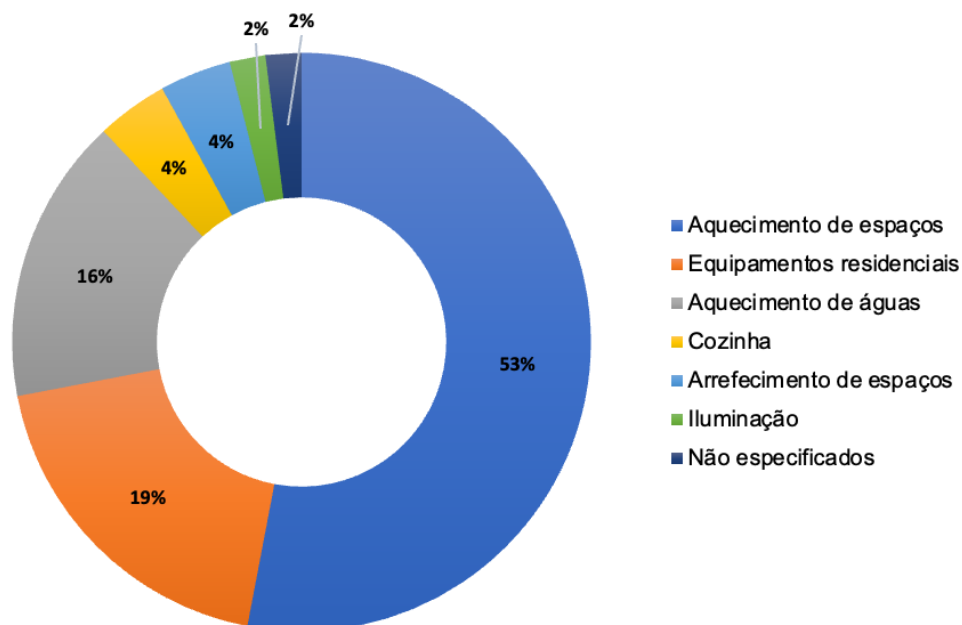


Figura 6 - Consumo de energia residencial, adaptado de IEA [19].

Em resumo, embora o setor da construção não seja somente o setor dos edifícios, a ênfase na construção sustentável tem sido colocada na eficiência energética do parque edificado. A principal razão desse fato encontra-se relacionada com o elevado dispêndio energético dos edifícios em termos operacionais. Sobre os materiais de construção, o seu papel vai adquirindo uma grande importância à medida que os edifícios vão se tornando cada vez mais eficientes do ponto de vista energético portanto deve-se ter uma especial atenção com os materiais usados [2].

2.3 Argamassas e placas à base de cimento

Argamassa é uma pedra artificial constituída por aglomerantes, agregados e água [20]. Seus diferentes campos de uso e condições de exposição fazem com que as argamassas tenham diferentes propriedades e níveis de desempenho [21].

A incorporação de PCM em argamassas de revestimento interior é uma solução para regular a temperatura dos edifícios contribuindo para o aumento do conforto térmico e diminuição do uso de equipamentos de climatização e consumos energéticos. O uso de PCM em paredes de edifícios é a solução preferencial para potencializar as características desse material. O estudo de aplicações de PCM em placas de gesso vem sendo amplamente estudado devido ao seu baixo custo e várias opções de uso [9].

As placas à base de cimento, também conhecidas como painéis ou chapas cimentícias, surgiram a partir de 1970 mas só foram popularizadas com a introdução da construção pré-moldada. Apresentam como vantagem a instalação rápida e limpa sendo o produto resultante da mistura de cimento Portland, agregados, adições ou adjuvantes, podendo também ser reforçado com fibras, fios, filamentos e telas. Vale ressaltar a importância de uma dosagem correta da argamassa para o sucesso do produto final. É também uma alternativa ao uso de placas de pedra natural ou alumínio [22].

Originalmente, as placas à base de cimento foram desenvolvidas como uma opção para fechamentos ou para ambientes decorativos sendo sua função posteriormente ampliada para sistemas construtivos. Porém, seu uso pode ser variado devido a grande versatilidade do material. As placas, além do betão, podem simular madeira ou pedra com diferentes tratamentos de superfície e pinturas [23].

As placas representam a possibilidade de ter um material de caracter inovador e com poucos precedentes, sendo uma lacuna na investigação. É um material tipicamente pré-fabricado, que pode ser comercializado como um produto para posteriormente ser aplicado em obras. A Figura 7 apresenta alguns exemplos de projetos usando placas à base de cimento como revestimento [24 - 26].



Figura 7 - Exemplos de projetos [24 - 26].

2.4 Materiais de mudança de fase

Os materiais de mudança de fase são materiais que possuem a capacidade de mudar o seu estado em função da temperatura do ambiente. Quando a temperatura ambiente aumenta, o material atinge seu ponto de fusão e muda de estado, passando do estado sólido para o estado líquido, absorvendo e armazenando a energia calorífica ambiente. Quando a temperatura ambiente diminui e atinge o ponto de solidificação do PCM, este muda de estado passando de líquido para sólido e libertando a energia anteriormente armazenada [8]. O processo é demonstrado na Figura 8.

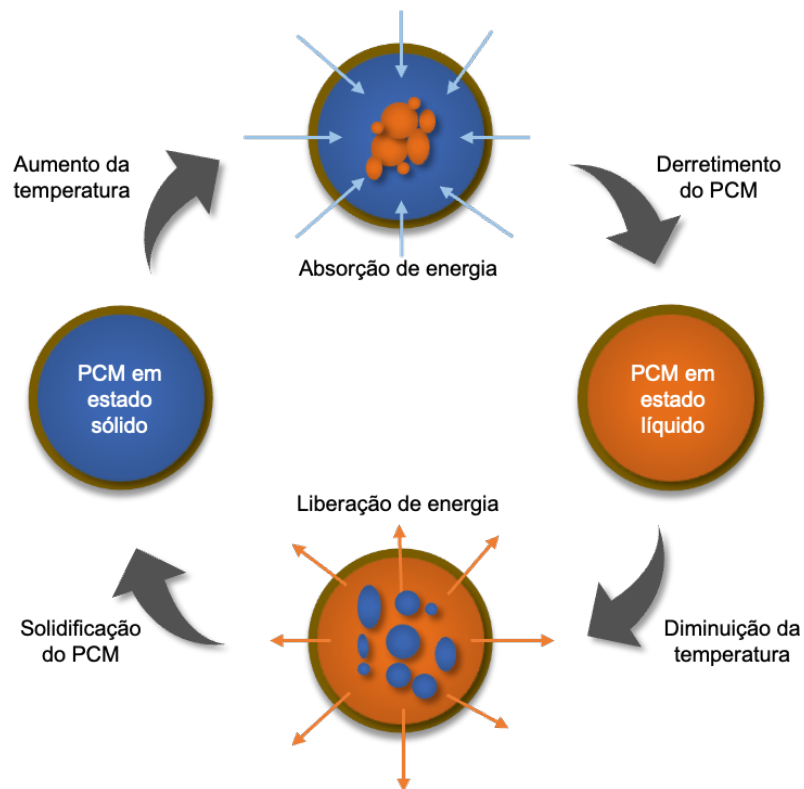


Figura 8 - Processo de mudança de fase do PCM, adaptado de Magendran *et al.* [27].

A utilização de PCM devido à sua capacidade de armazenamento de calor latente em edifícios começou a receber sérias considerações logo após a Segunda Guerra Mundial [28] sendo amplamente utilizado em sistemas de armazenamento térmico latente para aplicações de bombas térmicas, engenharia solar e controle térmico de naves espaciais. O uso de PCM para aplicações de aquecimento e arrefecimento de edifícios tem sido investigado desde a última década sendo que há um grande número de PCMs que se fundem e solidificam em uma ampla faixa de temperatura, tornando-os assim atraentes para diversas aplicações [29].

2.4.1 Armazenamento térmico

O armazenamento de energia térmica serve para guardar a energia que pode ser usada posteriormente para executar alguma operação útil. Diversas formas de energia térmica podem ser armazenadas com um método, sistema ou tecnologia apropriada. Os sistemas de armazenamentos térmicos têm o potencial de aumentar o uso efetivo de equipamentos de energia térmica e facilitar a troca em larga escala. Normalmente são úteis para corrigir a incompatibilidade entre a oferta e a demanda de energia [30].

O uso de sistemas adequados de armazenamento térmico na construção aumenta a eficiência energética. Em particular, a incorporação de materiais de mudança de fase nos edifícios permite um uso mais dinâmico da energia [31].

De acordo com o meio de armazenamento, os sistemas são classificados como armazenamento de calor sensível, calor latente e calor químico. Já de acordo com o conceito de armazenamento, os sistemas podem ser classificados em ativo e passivo. O primeiro envolve a convecção forçada de transferência de calor para o material de armazenamento, diretamente pelo meio de armazenamento ou indiretamente, sendo o fluido de transferência de calor e o meio de armazenamento diferentes substâncias. Nos sistemas passivos, não são necessários dispositivos adicionais [30].

Pode considerar-se como principais tipos o armazenamento de calor sensível e o armazenamento de calor latente. Como a temperatura de uma substância aumenta, seu conteúdo energético também aumenta, a energia liberada (ou absorvida) por um material à medida que sua temperatura é reduzida (ou aumentada) é chamado calor sensível. Por outro lado, a energia necessária para converter um material sólido em um material líquido, ou um material líquido em um gás é chamado calor de fusão (sólido para líquido) e calor de vaporização (líquido para gás). O calor latente está associado a essas mudanças de fase [30].

Os PCMs são materiais de armazenamento de calor latente. A transferência de energia térmica ocorre quando um material muda de fase. Inicialmente, esses PCMs funcionam como materiais de armazenamento convencionais, sua temperatura aumenta à medida que absorvem calor, mas ao contrário dos materiais de armazenamento convencionais (sensíveis), o PCM absorve e libera calor a

uma temperatura quase constante. Podem armazenar de 5 a 14 vezes mais calor por unidade de volume do que materiais de armazenamento sensíveis, como água, alvenaria ou rocha. Sabe-se que um grande número de PCM derrete com um calor de fusão em qualquer faixa necessária. No entanto, para seu emprego como materiais de armazenamento de calor latente, esses materiais devem exibir certas propriedades térmicas, físicas, cinéticas e químicas desejáveis [29].

O uso de PCM em paredes de edifícios pode diminuir as flutuações de temperatura, principalmente no caso de cargas de radiação solar. É então um método potencial para reduzir o consumo de energia em edifícios projetados passivamente. Essa tendência é confirmada por inúmeros trabalhos disponíveis na literatura nos últimos 20 anos. Ao selecionar um PCM, a temperatura ambiente média deve estar próxima da faixa de fusão / congelamento do material. Além disso, a temperatura do dia e as flutuações das radiações solares devem permitir a mudança de fase do material. Então, muitos fatores influenciam a escolha do PCM: clima, estrutura do edifício e propriedades termofísicas [32].

Os sistemas de armazenamento ativos são carregados e descarregados mecanicamente pelo uso de compressores, bombas ou ventiladores, esses sistemas podem ser adaptados à produção e demanda de energia usando estratégias de controle adequadas. Por outro lado, os sistemas passivos aproveitam a oscilação diária da temperatura e/ou as mudanças sazonais de temperatura nos edifícios e podem reduzir o consumo de serviços de aquecimento, ventilação e ar condicionado [31].

Sistemas baseados em materiais de mudança de fase com transição sólido-líquido são considerados os mais interessantes sendo uma eficiente alternativa de sistemas de armazenamento térmico sensíveis. Considerando a eficiência, os sistemas de armazenamento com PCM têm a vantagem de operar com pequenas diferenças de temperatura entre a absorção e a liberação de calor, conforme exemplificado na Figura 9 [30].

Estratégias passivas podem ser implementadas nos edifícios de várias maneiras, mas até agora uma das soluções mais comuns é instalar placas de gesso aprimoradas com PCM no lado interior do envelope do edifício. Assim, os PCMs podem melhorar a inércia térmica e proporcionar um aumento significativo na capacidade de armazenamento térmico [31].

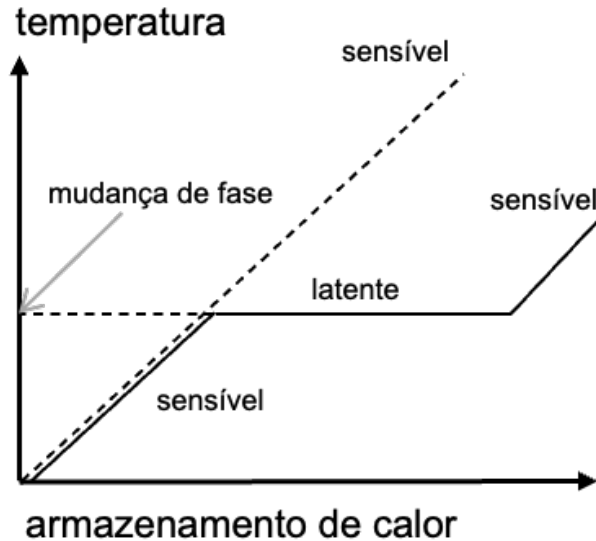


Figura 9 - Perfil de mudança de fase dos PCMs, adaptado de Gil *et al.* [30].

Uma investigação com placas de gesso de 12,7 mm de espessura utilizando PCM orgânico, incorporado de maneira direta e também por imersão, realizou diversos ensaios para testar as propriedades das placas. A comparação entre as placas convencionais e com PCM mostraram que [33 - 34]:

- Uma placa com PCM proporcionou um aumento de onze vezes na capacidade de armazenamento de energia (com um aumento de temperatura de 4°C);
- A diferença na condutividade térmica ficou dentro da faixa de $\pm 15\%$, dependendo do PCM;
- A resistência à flexão e a durabilidade foram comparáveis após o ciclo de gelo-degelo;
- Embora a velocidade da chama tenha sido um pouco maior nos painéis de PCM, sua resistência ao fogo, em geral, foi excelente;
- Total compatibilidade com fixadores, tintas e papéis de parede.

O desenvolvimento de materiais avançados para obter alta eficiência energética em edifícios, como PCMs capazes de armazenar energia térmica, é um dos principais requisitos do setor da construção [35]. A seleção adequada da temperatura de fusão dos PCMs, que depende da zona climática, é crucial para obter economias de energia notáveis. Em termos gerais, climas que necessitam de arrefecimento exigem PCMs com temperaturas de fusão próximas de 26°C (faixa de fusão de 24–28°C), enquanto climas que necessitam de aquecimento exigem temperaturas de fusão de cerca de 20°C (faixa de fusão de 18–22°C), a fim de obter maiores economias de energia [36].

A Norma ANSI/ASHRAE 55–2013 (Condições Ambientais Térmicas para Ocupação Humana) [37] define como conforto térmico a condição mental que expressa satisfação com o ambiente térmico, sendo a temperatura ambiente sugerida pela norma para edifícios é entre 23,5°C e 25,5°C no verão e entre 21°C e 23°C durante o inverno [35].

Em Portugal, o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) [38], aprovado pelo Decreto-Lei n.º 40/90, de 6 de Fevereiro, foi o primeiro instrumento legal que impôs requisitos ao projeto de novos edifícios e de grandes remodelações de maneira a salvaguardar a satisfação das condições de conforto térmico. Segundo o regulamento, as condições ambientes de conforto de referência são uma temperatura de 20°C para a estação de aquecimento e 25°C para a estação de arrefecimento.

Com relação ao uso do PCM, se a temperatura de fusão estiver muito alta, a quantidade de calor armazenada pelo PCM será baixa. Se a temperatura de fusão estiver muito baixa, a temperatura do ar interno não poderá ser mantida em um nível confortável sem aquecimento adicional [39]. Para as aplicações nas construções, considera-se que os PCMs com uma temperatura de mudança de fase entre 18°C e 30°C são preferidos pois atendem as necessidades de conforto térmico [40].

2.4.2 Classificação dos PCM

Existem um grande número de materiais de mudança de fase disponíveis em quaisquer faixas de temperatura, considerando a temperatura de transição e a entalpia. Estes materiais podem ser classificados em três grupos: orgânicos, inorgânicos e eutéticos, conforme Figura 10 [29].

Materiais inorgânicos notáveis são os sais hidratados com seus múltiplos usos no armazenamento de energia, já quando se trata de materiais orgânicos como os alcanos, ceras e parafinas a bibliografia é extensa [41].

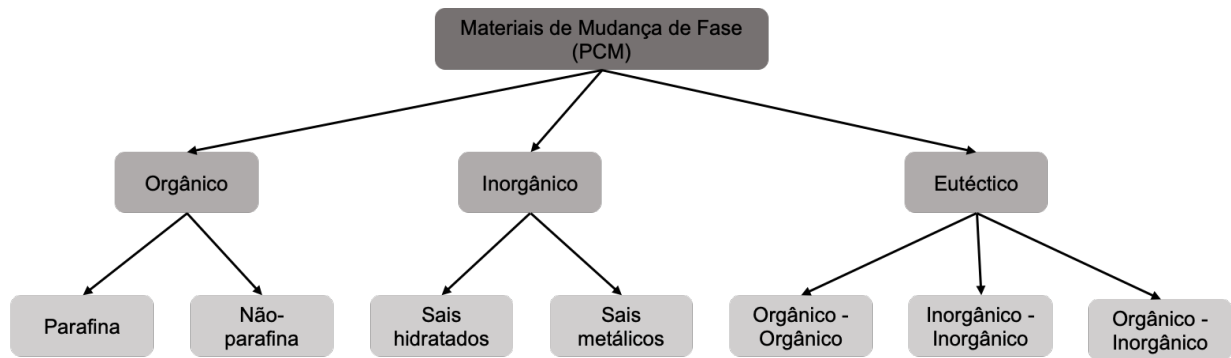


Figura 10 - Classificação dos PCMs, adaptado de Sharma *et al.* [29].

2.4.2.1 Orgânicos

Os materiais orgânicos são definidos como parafinas e não-parafinas. Estes materiais incluem algumas características como: fusão congruente, que significa derreter e congelar repetidamente sem segregação de fase e consequente degradação do calor latente de fusão; auto-nucleação que significa cristalização com pouco ou nenhum super-arrefecimento; e geralmente não são corrosivos [29].

A parafina consiste em uma mistura de alcanos de cadeia linear e que com a cristalização dessa cadeia libera uma grande quantidade de calor latente. A parafina se qualifica como PCM devido à sua disponibilidade em uma ampla faixa de temperatura. A parafina é segura, confiável, previsível e relativamente barata. Também é quimicamente inerte e estável abaixo de 500°C. E apesar das características favoráveis também apresentam desvantagens como a baixa condutividade térmica e ser moderadamente inflamável. Estas desvantagens podem ser parcialmente eliminadas modificando ligeiramente a parafina e a unidade de armazenamento [29].

Uma das principais razões para usar a parafina é devido à ausência de super-arrefecimento e sua natureza não corrosiva. Super-arrefecimento é um processo que normalmente ocorre em sais hidratados em que o PCM deve arrefecer muito abaixo da sua temperatura de mudança de fase, para então começar a se solidificar, necessitando de tempo extra para a solidificação [42].

Quando se trata de orgânicos não parafínicos pode-se dizer que são os mais numerosos dos PCMs e com propriedades altamente variadas. Cada um desses materiais tem suas próprias propriedades, ao

contrário da parafina, que tem propriedades muito semelhantes. Esta é a maior categoria de materiais de mudança de fase. Esses materiais são inflamáveis e não devem ser expostos a temperaturas excessivamente altas, chamas ou agentes oxidantes [29].

Algumas das características dos materiais orgânicos não parafínicos são: alto calor de fusão, inflamabilidade, baixa condutividade térmica, baixos pontos de inflamação, nível variável de toxicidade, instabilidade em altas temperaturas e moderadamente corrosivos. Sua principal desvantagem, no entanto, é o custo, sendo maior do que o da parafina [29].

2.4.2.2 Inorgânicos

Os materiais de mudança de fase inorgânicos são classificados como sais hidratados e sais metálicos. Estes materiais apresentam propriedades interessantes como o elevado calor de fusão por unidade de volume, baixa variação de volume nas transições de fase e elevada condutibilidade térmica, quase o dobro se comparado com a parafina. Também se destacam por não serem corrosivos, serem compatíveis com recipientes plásticos e baratos. Os sais hidratados têm sido amplamente estudados para utilização em sistemas de armazenamento térmico [8].

Materiais inorgânicos também podem apresentar inconvenientes como a formação de sais de forma incongruente, não se solidificando totalmente na mudança de fase devido à baixa taxa de nucleação. Como solução a estes inconvenientes pode adicionar-se um agente de nucleação [8].

Os sais hidratados podem ser considerados como ligas de sais inorgânicos e água formando um sólido cristalino típico. A transformação sólido-líquido de hidratos de sal é na verdade uma desidratação ou hidratação do sal, embora esse processo se assemelhe termo-dinamicamente ao derretimento ou congelamento [29].

Os sais metálicos diferem de outros PCMs pela sua alta condutividade térmica e alto calor de fusão por unidade de volume, e apresentam desvantagens pelo seu peso que podem causar problemas de engenharia. Algumas das características desses materiais são as seguintes: baixo calor de fusão por unidade de peso, baixo calor específico e relativamente baixa pressão de vapor [29].

2.4.2.3 Eutéticos

Eutéticos são uma misturas mínima de dois ou mais compostos que apresentam fusão e congelamento congruentes. A composição na qual este comportamento é observado chama-se composição eutética e a temperatura correspondente chama-se temperatura eutética. Suas vantagens são a nítida temperatura de mudança de fase e derreter e congelar congruentemente sem segregação. A maior parte dos PCM eutéticos estudados na literatura para aplicações de arrefecimento é de natureza orgânica [43].

2.4.2.4 Comparação entre os tipos de PCM

A Tabela 1 sintetiza a temperatura de fusão, calor latente, características, custo, vantagens e desvantagens dos PCMs que são classificados como orgânicos, inorgânicos e eutéticos [44].

Os PCMs apresentam inúmeras vantagens de utilização, porém também não estão livres de problemas. Outra comparação com os tipos de PCM, é relacionada com a toxicidade, riscos para saúde e impacto ambiental. Alguns desses fatores estão resumidos na Tabela 2 [43].

2.4.3 Propriedades dos PCM

Uma grande quantidade de materiais é conhecida pelo alto calor de fusão em qualquer faixa de temperatura necessária. No entanto, seu uso como material de armazenamento térmico depende de propriedades físicas, químicas, térmicas, cinéticas e de fatores econômicos desejáveis [45]. Um resumo das propriedades é apresentado na Tabela 3.

Em suma, um PCM é adequado para aplicação se for estável, possuir uma temperatura de mudança de fase adequada, boa condutividade térmica, boa compatibilidade com outros materiais, estabilidade química, estabilidade física e não toxicidade. Um fator final, que ofusca todos os outros aspectos, é a economia, um PCM precisa ter um preço moderado e disponibilidade no mercado [44].

Tabela 1 - Comparação entre os diferentes tipos de PCM, adaptado de Akeiber *et al.* [44].

Tipo	Orgânico		Inorgânico		Eutéticos
	Parafina	Não parafina	Sais hidratados	Sais metálicos	
Temperatura de fusão	12 – 71 °C	7,8 – 187 °C	11 – 120 °C	30 – 96 °C	4 – 93°C
Calor latente	190–260 kJ/kg	130–250 kJ/kg	100–200 kJ/kg	25–90 kJ/kg	100–230 kJ/kg
Características	- Calor latente e ponto de fusão aumenta com o número de carbonos - PCM mais usado	- Ampla faixa para ponto de fusão - Ampla faixa de calor latente	- Amplo interesse por estudos - É uma solução de água e sais inorgânicos	- Não amplamente estudado pela alta densidade, custo e outras limitações técnicas	- Inclui dois ou mais PCMs
Custo	Bastante caro	2 a 3 vezes mais caro que a parafina	Preço razoável	Caro	Caro
Vantagens	- Sem segregação e super-arrefecimento - Quimicamente estável - Elevado calor latente - Elevada compatibilidade com todos os recipientes metálicos - Seguro e não reativo	- Mudança de fase precisa	- Grande disponibilidade - Ponto de fusão preciso - Condutividade térmica apropriada - Baixa variação de volume - Densidade adequada	- Elevado calor de fusão por unidade de volume - Elevada condutividade	- Bom calor latente por unidade de volume - Condutividade abundante
Desvantagens	- Baixa condutividade - Não tem ponto de fusão exato - Altamente inflamável - Mudança de volume considerável	- Parcialmente corrosivo - Inflamável, não deve ser exposto a temperatura excessivamente altas, chamas ou agentes oxidantes	- Super-arrefecimento - Corrosivo - Devido a altas densidades, sais se acumulam no fundo e reduzem o volume ativo	- Baixo calor de fusão por unidade de peso - Baixo calor específico	- Baixo calor de fusão por unidade de peso

Tabela 2 - Toxicidade, riscos para saúde e impacto ambiental, adaptado de Chandel e Agarwal [43].

Tipos de PCM	Toxicidade, riscos para saúde e impacto ambiental
Óleos vegetais	Material presente na grade alimentar; seguro quando ingerido; amigo do ambiente; livre de carbono; renovável; altamente inflamável
Parafina	Material presente na grade comercial; libera toxinas nocivas quando queimado; não biodegradável
Sais hidratados	Variados níveis de toxicidade, usualmente não inflamável; sal de Glauber: pó pode causar irritação nos olhos e asma; $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$: riscos para saúde quando ingerido, irritação nos olhos; MgNO_3 : seguro, porém não biodegradável; $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$: não tóxico, pode causar irritação nos olhos e na pele
Ácidos graxos	Toxicidade variada
Eutéticos	Depende dos componentes que formam a mistura, por exemplo, orgânicos ou inorgânicos

Tabela 3 - Propriedades dos PCMs, adaptado de Magendran *et al.*, Akeiber *et al.* e Regin *et al.* [27,44,45].

Principais propriedades desejáveis para materiais categorizados como PCM	
Físicas	Baixa alteração de volume nas mudanças de fase Baixa variação de densidade durante mudança de fase Pressão de vapor mínima Elevada densidade Calor específico adequado Pouco ou nenhum super-arrefecimento
Químicas	Quimicamente estável e sem decomposição química Não corrosivo, tóxico, inflamável e explosivo Boa combinação com o material do recipiente
Térmicas	Elevado calor específico Elevado calor latente por unidade de massa Elevada condutividade térmica tanto na fase líquida ou sólida Ponto de fusão na faixa de temperatura operável preferida
Cinéticas	Sem super-arrefecimento ou sub-arrefecimento Sem isolamento de fases Elevada taxa de nucleação Elevada velocidade de crescimento de cristais
Econômicas	Disponibilidade em larga escala Preço razoável

2.4.4 Métodos de incorporação de PCM

O PCM pode ser incorporado através de quatro métodos distintos: incorporação direta, encapsulamento, imersão e estabilização.

2.4.4.1 Incorporação direta

A incorporação direta é o método mais prático e barato, consiste em adicionar o PCM diretamente na mistura. Existem dois fatores principais que interferem no sucesso do método: a não interferência da introdução do PCM com a hidratação da mistura ou com a força de ligação entre a pasta e agregados; e não haver reação significativa entre o PCM e os outros componentes da mistura ou produtos de hidratação [46].

2.4.4.2 Encapsulamento

O encapsulamento é o processo de envolver o PCM com um revestimento adequado e tem como objetivo manter a fase líquida ou sólida isolada do ambiente e garantir a composição adequada visto que evita a alteração da mistura por contato com materiais adjacentes [47].

Este processo apresenta vantagens como: redução de reações do PCM com o ambiente, flexibilidade para mudanças de fase frequentes, aumento da taxa de transferência de calor, melhoria da estabilidade mecânica e térmica do PCM e melhoria na compatibilidade de PCMs que não podem ser utilizados juntamente com outras substâncias [47].

O material usado para revestimento do PCM deve apresentar características que melhorem o desempenho do sistema e deve ter as seguintes propriedades: resistência estrutural e térmica para resistir aos ciclos de mudanças de fase, manutenção de todas as propriedades termofísicas do PCM, ser à prova de vazamentos, não reagir com o PCM, ser uma boa barreira de difusão de água e possuir maior condutividade térmica para facilitar as trocas de calor entre o PCM e o meio externo. Alguns exemplos de materiais comuns usados para encapsulamento são: polipropileno, poliolefina, poliamida, sílica, poliureia, ureia-formaldeído, cobre, alumínio [47].

O encapsulamento do PCM ocorre em duas formas usuais: macroencapsulamento e microencapsulamento. O microencapsulamento é o processo pelo qual partículas ou gotículas de material sólido ou líquido (núcleo) são envoltos ou revestidos com uma película de material polimérico (casca) produzindo uma microcápsula como representado na Figura 11 [48]. A morfologia dos diferentes tipos de microcápsulas pode variar, alguns exemplos são: esferas simples revestidas com espessura uniforme, partículas com núcleo irregular, núcleos diversos dentro da mesma cápsula, microcápsulas de paredes múltiplas e partículas embutidas em uma matriz contínua. Entre eles, a partícula esférica simples é a forma mais típica de microcápsulas [49].

Todos os três estados da matéria (sólido, líquido e gasoso) podem ser microencapsulados permitindo que os materiais sejam manuseados mais facilmente e podendo também oferecer alguma proteção no manuseio de materiais perigosos. As microcápsulas toleram mudanças de fase, inclusive as mudanças de volume em seu núcleo [48].

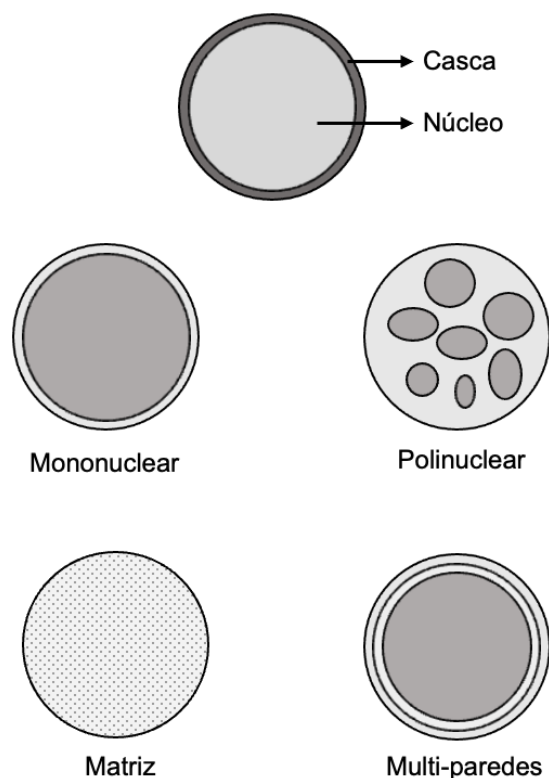


Figura 11 - Morfologia das microcápsulas, adaptado de Jamekhorshid *et al.* [50].

O processo de macroencapsulamento consiste em envolver o PCM em um material com tamanho superior a 1cm e é a forma mais usual de encapsulamento [51]. A estrutura pode apresentar diferentes geometrias, sendo as mais comuns representadas na Figura 12. Essa variedade de geometrias tornam o PCM macroencapsulado fácil de incorporar em qualquer forma, tamanho e dimensão da envolvente dos edificios. A escolha correta da forma melhora o desempenho do PCM quando incorporado no edificio [52].

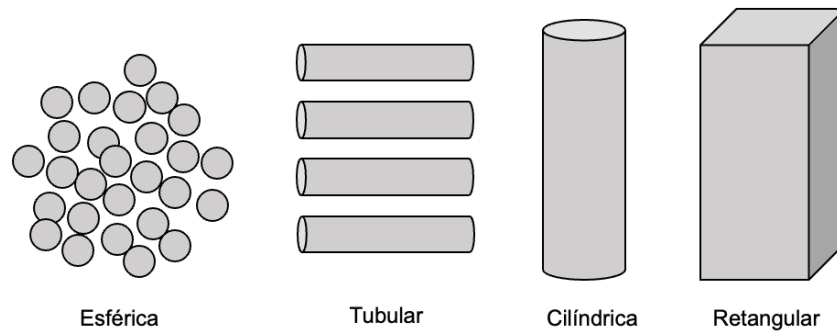


Figura 12 - Geometrias comuns para macroencapsulamento, adaptado de Salunkhe e Shembekar [47].

2.4.4.3 Imersão

Este método consiste basicamente em mergulhar materiais em PCM líquido sendo este absorvido por capilaridade. É um processo flexível e que pode ser automatizado em uma linha de produção. Apesar do método ser mais caro que a incorporação direta, com a produção de grandes quantidades o custo unitário pode não apresentar uma diferença significativa comparado com a incorporação direta [46].

2.4.4.4 Estabilização

Neste método o PCM e o material de suporte são derretidos e misturados em altas temperaturas, seguido pelo arrefecimento do material de suporte até que se torne sólido. Algumas características do método são: condutividade térmica apropriada, mantém a forma estabilizada na transição de fase, termicamente estável por longo período, não necessita de recipiente de contenção de PCM e a proporção da massa de PCM pode ser de até 80% [53].

2.4.5 Aplicação do PCM na construção

Diferentes aplicações de PCM podem ser encontradas na literatura, não estando apenas ligadas à construção. Essas aplicações podem ser divididas em dois grupos principais: proteção térmica ou armazenamento. Uma diferença entre esses dois campos de aplicação está relacionada à condutividade térmica do PCM. Regin *et al.* [45] exemplificou as seguintes aplicações:

- Armazenamento térmico de energia solar;
- Armazenamento passivo em arquitetura/construções bioclimáticas;
- Arrefecimento: uso de tarifas fora de pico e redução de potência instalada;
- Aquecimento: uso de tarifas fora de pico;
- Proteção térmica de alimentos: transporte, trocas, gelados, etc.;
- Proteção térmica de aparelhos eletrônicos (integrados nos equipamentos);
- Aplicações médicas: transporte de sangue, mesas de operação, terapias de aquecimento e arrefecimento;
- Arrefecimento de máquinas (elétrica e combustão);
- Conforto térmico em veículos;
- Usinas solares.

A aplicação de PCMs na construção permite arrefecer ou aquecer edifícios de maneira ativa ou passiva. O PCM integrado com materiais de construção, por meio do processo de derretimento e solidificação pode causar por si só o arrefecimento de edificações. A diferença entre o sistema ativo e passivo de arrefecimento está no uso de equipamentos como ventiladores. Em aplicações de aquecimento passivo, PCMs têm sido usados em componentes de construção, como pisos, paredes e telhados. Nas aplicações de aquecimento ativo, os PCMs estão localizados nos equipamentos mecânicos, como sistemas de bomba de calor solar, trocadores de calor e sistemas de aquecimento de piso e aquecedores de água domésticos [54].

Das diversas possibilidades de aplicação do PCM na construção a mais notável é a incorporação em materiais de construção com a finalidade de alterar as suas propriedades térmicas. A grande vantagem da incorporação em edifícios é a vasta área oferecida para armazenamento e transferência de calor.

Aplicações em paredes apresentam o maior número de publicações. Enfatiza-se o uso em paredes pois é o elemento construtivo com maior área disponível nos edifícios justificando-se assim o maior interesse neste elemento construtivo [10].

2.4.5.1 PCM em paredes

No trabalho de Castell [55], foram estudados os benefícios do PCM com a construção de cubículos utilizando tijolos alveolares e convencionais com incorporação de PCM macroencapsulado. Experimentos mostraram temperaturas de pico mais baixas (até 1°C) e condições mais constantes nos cubículos com PCM, suavizando as flutuações diárias da temperatura. Experiências adicionais usando uma bomba de calor para definir e controlar a temperatura interna dos cubículos foram realizadas demonstrando que o consumo de energia dos cubículos contendo PCM foi reduzido em cerca de 15% em comparação aos cubículos sem PCM. Isso demonstrou a significativa contribuição e potencial uso do PCM nas envolturas para economia de energia e conforto térmico. Além disso, cerca de 1 a 1,5 kg/ano/m² de emissões de CO₂ foram economizadas nos cubículos de PCM devido à redução do consumo de energia.

Ismail e Castro [56] estudaram de maneira analítica o uso de PCM em paredes e teto como barreira térmica sob reais condições, a investigação consistiu em um pequeno cômodo com paredes e tetos removíveis sendo as paredes e tetos feitos com e sem PCM para comparações. O estudo demonstrou o potencial do PCM em manter a temperatura interna estável e constante. Por consequência reduziu-se a necessidade de utilização de unidades de ar condicionado, reduzindo assim a demanda elétrica e movimentando o pico energético horário para o pico em horário padrão. Também concluiu que o PCM foi de fácil uso e não se degradou durante o período de teste de aproximadamente dois anos.

Cabeza *et al.* [57], ao longo de 10 anos, estudaram o desempenho de 2 cubículos com painéis de betão pré-moldados, sendo que em um deles foi adicionado PCM microencapsulado nas paredes. Foi comparado o desempenho térmico durante período similar ao do verão de 2005 e os resultados mostraram a mesma resposta térmica. Confirmou-se que o PCM integrado nas paredes não sofreu degradação e contribuiu para a redução da flutuação térmica do ar no interior mesmo após todos esses anos de incorporação. Além disso o desempenho mecânico do cubículo com PCM foi o mesmo após os 10 anos.

Mourid *et al.* [58] estudaram o desempenho de PCM adicionado em duas salas residenciais em períodos de aquecimento. Foram feitos cubículos idênticos de 3x3x3m³ com paredes compostas por 2 camadas de tijolo alveolar separadas por uma camada de ar. As faces internas da parede foram embutidas com uma camada de PCM de 5.3mm (Wallboard Energain® fabricado pela DuPont™). Os resultados mostraram que a parede com PCM levou a um aumento de temperatura de cerca de 6°C durante a noite e permitiu uma redução dos fluxos de calor. A economia de energia de aquecimento resultante da aplicação do PCM pode chegar a até 20%.

Li *et al.* [59] fabricaram um painel de PCM composto contendo três tipos de PCMs com diferentes pontos de fusão (12 °C, 18 °C e 29 °C) para manter o conforto térmico e aumentar a economia de energia em diferentes condições climáticas. Dois modelos de painéis foram fabricados com várias concentrações de PCM e o efeito de armazenamento térmico do PCM nos painéis foi analisado com base nas mudanças de temperatura e fluxo de calor. Os resultados mostraram alta economia de energia em até 30% para os painéis com PCM em comparação com o de gesso padrão.

D'Alessandro *et al.* [60] apresentaram uma investigação de concretos inovadores com PCM à base de parafina aplicados na envolvente de edifícios, sendo utilizado o microencapsulamento ou macroencapsulamento para a preparação do composto. Os resultados confirmaram os benefícios térmicos do PCM e demonstraram que a adição de PCM reduziu a densidade de massa do concreto em quase duas vezes o peso do PCM. Houve uma redução na média da resistência à compressão com o aumento da quantidade de PCM, mas seu coeficiente de variação não foi tão afetado negativamente, resultado promissor em termos estruturais. Além disso, otimizou o efeito de isolamento térmico em até 9 h em comparação com o concreto padrão.

2.4.5.2 PCM em tetos e coberturas

Abden *et al.* [61] estudaram experimentalmente o desempenho térmico de um teto falso de placa de gesso com incorporação de PCM. Uma câmara de teste em pequena escala com teto de placa de gesso integrado foi utilizada para o ensaio sendo o desempenho térmico e energético avaliado em comparação com a placa de gesso convencional em condições ambientais reais. Os resultados mostraram que o pico da temperatura do ar na câmara com PCM foi reduzido, no primeiro dia, em um máximo de 4,9°C e

uma média de 3,5°C em 3 dias, em comparação com a câmara sem o teto com PCM. Também se considerou economicamente viável a utilização da placa de gesso com PCM, sendo o período de retorno de 1,7 anos.

Zhang *et al.* [62] analisaram o desempenho de arrefecimento e a economia de energia de quatro sistemas de cobertura: cobertura normal, cobertura com PCM, cobertura com tinta térmica e cobertura com tinta térmica e PCM. Câmaras de teste foram elaboradas com combinações de camadas compostas por tinta térmica, placa de fibrocimento, placa de isolamento (poliestireno extrudado) e placa de PCM (macroencapsulado em policarbonato). Os testes também levaram em consideração a localização e a espessura do PCM e a espessura da camada de isolamento que tiveram grande impacto no arrefecimento da cobertura. Em resumo, os resultados mostraram que as três coberturas em comparação a cobertura normal foram capazes de diminuir a flutuação da temperatura interna e diminuir o fluxo de calor que entra na câmara. A cobertura com tinta térmica e PCM foi a que apresentou maior redução da temperatura interna, em 6,6°C, e maior economia energética, de 52,9%.

2.4.5.3 PCM em pavimentos

Jin e Zhang [63] estudaram um piso composto por camada dupla de PCM com diferentes pontos de fusão para armazenar calor ou frio fora do período de pico e posteriormente liberá-los no período de pico de aquecimento ou arrefecimento. O sistema numérico usado é composto pelas seguintes camadas: madeira, PCM para arrefecimento, PCM para aquecimento, betão com canalização de água e isolamento. Foi analisado o desempenho térmico do piso, concluiu-se que as flutuações de temperatura da superfície do piso e os fluxos de calor foram reduzidos e o sistema ainda forneceu certa quantidade de calor ou frio mesmo após a bomba de calor ou resfriador ter sido desligado por um longo período. Em comparação com o piso sem PCM, a energia liberada pelo piso com PCM no período de pico foi aumentada em 41,1% durante o aquecimento e 37,9% durante o arrefecimento.

González e Prieto [64] realizaram um estudo com piso radiante hidráulico com faixas de PCM, parafina macroencapsulada, embutidas no núcleo do betão. Foram analisados diversos sistemas com soluções de transferência de calor e efeitos como: espessura de cobertura de madeira, que representa a principal resistência térmica dos pisos, temperatura do ar interior e a temperatura da superfície do tubo de aquecimento. Os resultados mostraram que o piso radiante com PCM aumentou o armazenamento

térmico de energia em até 243% e diminuiu o fluxo máximo de calor entre 10 e 18% de acordo com o caso. O piso com PCM também liberou calor lentamente mesmo quando o aquecimento estava desligado, permitindo tempo para iniciar uma nova carga usando, por exemplo, energia solar.

2.4.5.4 PCM em janelas

Hu *et al.* [65] estudaram experimentalmente uma janela ventilada reforçada com PCM e seu desempenho térmico e energético no arrefecimento e aquecimento da ventilação. O sistema é composto por duas partes: a janela ventilada convencional e o trocador de calor que é composto por 62 placas de PCM (parafina) paralelas em uma estrutura de madeira. As conclusões do estudo relativo ao aquecimento demonstraram o aumento da temperatura do ar de entrada em 2,0 °C por 12 h e economia média de energia de 1,6 MJ/dia em comparação com uma janela ventilada normal. Os resultados relativos ao arrefecimento demonstraram que a temperatura do ar de entrada é em média 1,4 °C mais baixa em 7 h se comparado com uma janela ventilada normal e houve uma economia média de energia de 0,7 MJ/dia para o período testado. A investigação também demonstrou que foi possível reduzir a temperatura da superfície do vidro em uma média de 0,8 °C.

King *et al.* [66] analisaram experimentalmente o desempenho térmico de uma janela de vidro duplo com incorporação de PCM (parafina) e espaço de 12mm entre os vidros. Foram estudados a temperatura térmica ambiente, a temperatura do vidro interno, o consumo de energia através da janela e a transmitância do vidro contendo PCM. Os resultados confirmaram que a transmitância foi boa o suficiente durante o dia para permitir luz suficiente dentro da sala. A incorporação do PCM em janela de vidro duplo ajudou a reduzir a flutuação de temperatura do espaço interno de 21 °C a 11 °C e reduziu o pico de temperatura interno em 9 °C. A temperatura do vidro interno foi diminuída em 8,5 °C com o ajuda do PCM e o consumo de energia foi reduzido em 3,76%. Em resumo, o PCM reduziu significativamente a flutuação de temperatura, a temperatura do vidro interno e o consumo de energia através da janela.

Capítulo 3

Materiais, Composições e Dimensão das Placas

3. MATERIAIS, COMPOSIÇÕES E DIMENSÃO DAS PLACAS

Este capítulo contém informações sobre os materiais utilizados e sua respectiva composição para a elaboração de argamassas e placas à base de cimento com incorporação de materiais de mudança de fase.

3.1 Materiais utilizados

A seleção dos materiais utilizados para a composição da argamassa levou em consideração trabalhos já efetuados anteriormente na Universidade do Minho [8, 11, 67]. Os materiais adotados foram: Cimento Portland CEM II B-L 32.5 N; cinzas volantes; agregados, areia A e areia B, com tamanho médio de partículas de 439,9 μm e 762 μm respectivamente; PCM não encapsulado composto por parafina pura com temperatura de transição de 22°C; e água.

3.1.1 Cimento Portland

O ligante utilizado foi o Cimento Portland CEM II B-L 32.5 N que possui boa trabalhabilidade e baixo calor de hidratação sendo muito utilizado para argamassas de revestimento. A massa volúmica real deste Cimento Portland foi encontrada através de ensaios realizados anteriormente a esse trabalho e é de 3030 kg/m^3 .

Algumas das características do cimento utilizado são descritas na Tabela 4. Os dados foram fornecidos pelo fabricante Secil [68].

3.1.2 Cinzas volantes

A utilização de cinzas volantes torna a mistura mais sustentável, sendo um material bastante disponível no mercado durante a realização do trabalho. As cinzas volantes utilizadas no trabalho tiveram origem da combustão do carvão na central termoelétrica do Pego (Tejo Energia SA) e sua massa volúmica é de 2420 kg/m^3 .

Tabela 4 - Características do Cimento Portland CEM II B - L 32.5N.

Cimento Portland CEM II B-L 32.5 N	
Composição do produto	65% a 79% Clínquer Portland 21% a 35% Calcário 0 a 5% Outros Constituintes
Principais características	Cor cinzenta Menor calor de hidratação que o CEM I 32.5N Melhor trabalhabilidade que o CEM I 32.5N Desenvolvimento de resistência inicial mais lento Resistência final dentro dos valores da classe (28 dias)
Características químicas	Teor de sulfatos $\leq 3,5\%$ Teor de cloretos $\leq 0,10\%$
Características físicas	Princípio de presa ≥ 75 min Expansibilidade ≤ 10 mm
Características mecânicas	Resistência à compressão aos 7 dias ≥ 16 MPa Resistência à compressão aos 28 dias $\geq 32,5$ e $\leq 52,5$ MPa

3.1.3 Agregados

A escolha dos agregados é de extrema importância pois influencia diversas propriedades, tanto no estado fresco quanto endurecido. Como agregados foram utilizados dois tipos de areia de origem siliciosa designadas como Areia A e Areia B. A massa volúmica foi definida através de ensaios realizados anteriormente a este trabalho e é de 2600kg/m^3 para Areia A e 2569kg/m^3 para Areia B. O tamanho médio das partículas é de $439,9\ \mu\text{m}$ e $762\ \mu\text{m}$, respectivamente.

Através da Figura 13, que apresenta as curvas granulométricas dos 2 tipos de areia, pode-se verificar que a Areia A é constituída por partículas com dimensões entre 0.125mm e 0.5mm , e a Areia B é constituída por partículas com dimensões entre 0.125mm e 4mm .

A Areia A se encontrava pronta para uso, isto é, sem humidade, não necessitando ser colocada em

estufa. A Areia B foi colocada em estufa à 105 °C até atingir a massa constante, eliminando assim a humidade presente.

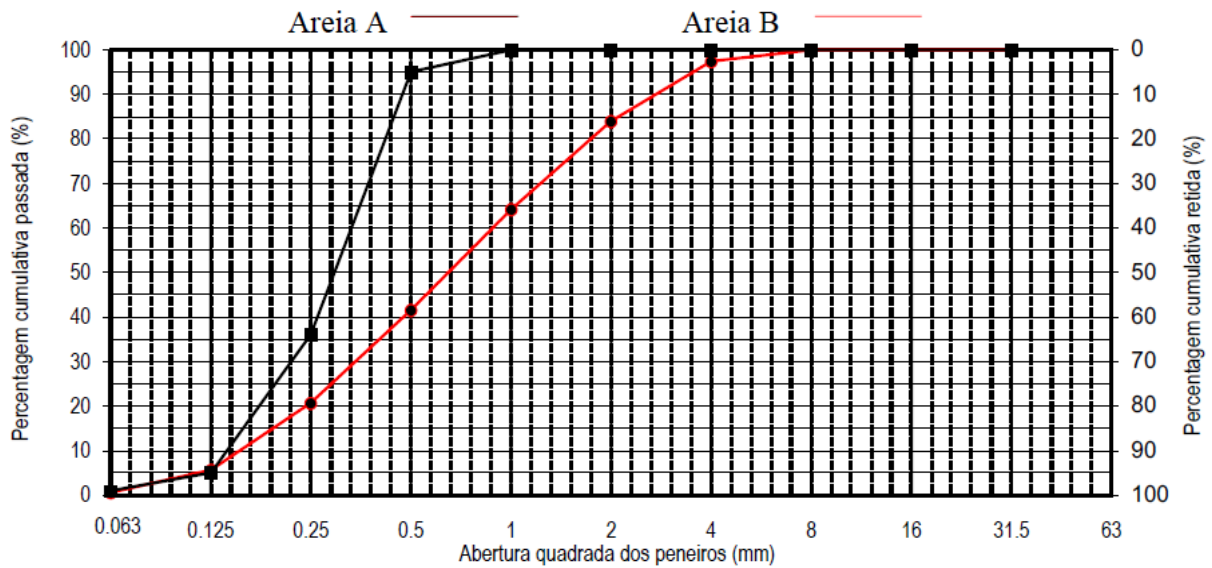


Figura 13 - Curva Granulométrica da Areia A e Areia B [67].

3.1.4 Material de mudança de fase (PCM)

O PCM utilizado é não-encapsulado e é composto por parafina pura com temperatura de transição de 22°C e entalpia de 200kJ/kg. O PCM com esta temperatura de transição é adequado à aplicação prevista, uma vez que a sua temperatura de transição se encontra dentro da gama de temperaturas de conforto dos edifícios.

A seleção do PCM não encapsulado encontra-se relacionada ao fato deste PCM apresentar um custo de aquisição inferior aos outros tipos de PCM promovendo a produção de argamassas mais econômicas.

As propriedades do PCM utilizado apresentadas pelo fornecedor encontram-se descritas na Tabela 5 e a entalpia do PCM é apresentada na Figura 13.

Ao analisar a Figura 14 pode observar-se que, apesar da temperatura de transição ser de 22°C, a mudança de fase não é um processo que se limita a apenas uma temperatura e sim um processo gradual que acontece em uma faixa de temperatura, para o PCM em questão, dos 16 aos 24°C.

Tabela 5 - Propriedades do PCM não encapsulado.

Propriedades do PCM	
Temperatura de transição	22°C
Temperatura máxima de operação	50°C
Entalpia	200 kJ/kg
Densidade no estado sólido	760 kg/m ³
Densidade no estado líquido	700 kg/m ³

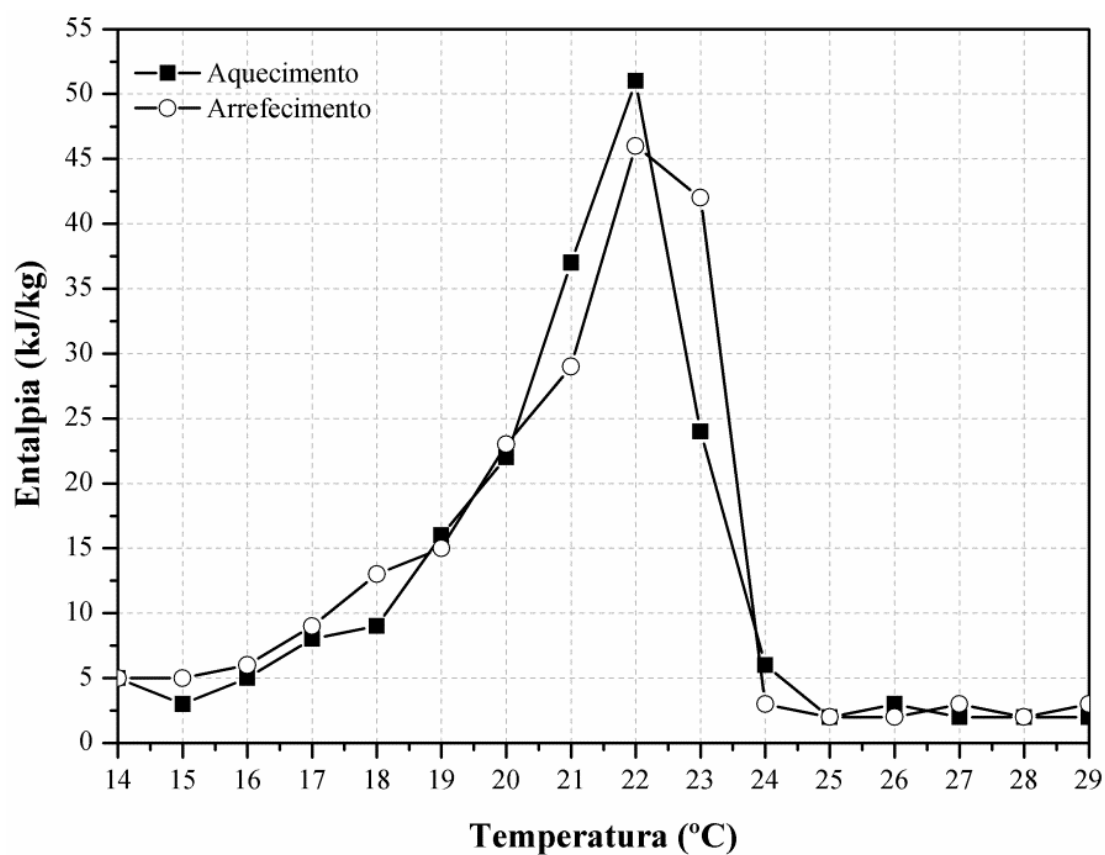


Figura 14 - Entalpia do PCM não encapsulado [7].

3.1.5 Água

Foi utilizada água do serviço público para a produção das argamassas. Visto que o cimento inicia o seu processo de hidratação em contato com a água e o PCM solidifica em temperatura inferior próxima dos 20°C foi necessário controlar a temperatura antes da mistura sendo a faixa de temperatura adotada para este trabalho de 22°C a 28°C.

3.2 Composições

A mistura dos materiais que compõem a argamassa também levou em consideração trabalhos já efetuados anteriormente na Universidade do Minho [8, 11, 68]. Foram preparadas quatro composições de argamassas de cimento com diferentes percentagens de PCM não encapsulado (0%, 5%, 10% e 20%). A quantidade de ligante utilizada foi de 500 kg/m³ sendo 200kg/m³ (40%) de cimento e 300kg/m³ (60%) de cinzas volantes. A quantidade de areia utilizada foi de 50% da Areia A e 50% de Areia B sendo que a adição de PCM substitui parte da massa dos agregados. A relação de água/ligante utilizada foi determinada em laboratório para conferir uma trabalhabilidade adequada. A densidade dos materiais utilizados é apresentada na Tabela 6. A fórmula utilizada é descrita abaixo:

$$\frac{C}{\gamma_{sc}} + \frac{CV}{\gamma_{scv}} + \frac{Ara}{\gamma_{sAra}} + \frac{Arb}{\gamma_{sArb}} + \frac{PCM}{\gamma_{sPCM}} + \frac{W}{\gamma_{sw}} + V_v = 1$$

Onde:

C = cimento (kg/m³);

CV = cinzas volantes (kg/m³);

Ara = areia A (kg/m³);

Arb = areia B (kg/m³);

PCM = material de mudança de fase (kg/m³);

W = água (kg/m³);

V_v = volume de vazios;

γ_s = densidade dos materiais (kg/m³).

Tabela 6 - Densidade dos materiais.

Material	Densidade (kg/m³)
Cimento	3030
Cinzas Volantes	2420
Areia A	2600
Areia B	2569
PCM (líquido)	760
PCM (sólido)	700

O volume de vazios foi considerado zero. Para cada composição utilizaram-se as percentagens de PCM e relação água/ligante apresentada na Tabela 7. A formulação das argamassas encontra-se na Tabela 8.

Tabela 7 - Teor de PCM e relação água/ligante das argamassas.

Composição	PCM (%)	W/L
C0PCM	0	0,56
C5PCM	5	0,55
C10PCM	10	0,52
C20PCM	20	0,48

Tabela 8 - Formulação das argamassas (kg/m³).

Composição	Cimento	Cinzas Volantes	Areia A	Areia B	PCM	Água
C0PCM	200	300	684,9	684,9	0	280
C5PCM	200	300	583,63	583,63	58,36	275
C10PCM	200	300	519,09	519,09	103,82	260
C20PCM	200	300	423,72	423,72	169,49	240

3.3 Dimensão das placas à base de cimento com PCM

Para a definição das dimensões das placas à base de cimento com PCM considerou-se três fatores: pesquisa de placas para revestimento atualmente disponíveis no mercado, apresentada na Tabela 9, os moldes disponíveis no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho e as dimensões recomendadas pelas normas para os ensaios que determinam as características físicas e mecânicas das placas.

A pesquisa de mercado indicou que as placas são produzidas nos mais diversos tamanhos e que em muitos casos também é possível personalizar o tamanho de acordo com o projeto e necessidades do cliente. Sendo assim, a escolha da dimensão das placas para uso neste trabalho priorizou a

disponibilidade dos moldes e dimensões recomendadas por norma.

Concluiu-se que a placa teria formato prismático e a dimensão ideal seria de 200x100x20mm, conforme ilustrado na Figura 15. A espessura adotada de 2cm, apesar de parecer espessa, está dentro dos padrões encontrados na pesquisa de mercado das placas para revestimento.

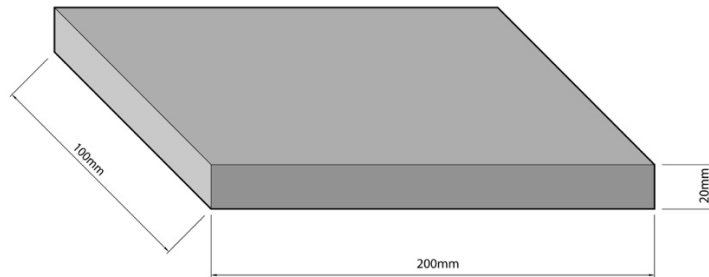


Figura 15 - Modelo de placa de cimento com PCM.

Tabela 9 - Pesquisa de placas para revestimento.

Material	Marca	Modelo	Dimensões (mm)	Espessura (mm)	Aplicação do revestimento	Fabricação e Distribuição	Website
Compósito de madeira e cimento	Investwood	Viroc	2600X1250, 2600X1200, 3000X1250, 3000X1200, 2440X1100	8, 10, 12, 16, 19, 22, 25, 28, 32	Interno/Externo	Portugal	http://www.viroc.pt/content.aspx?menuid=97&eid=147
Cimento e fios sintéticos	Brasilit	Nextera	2000X1200, 2400X1200, 3000X1200	6, 8, 10, 12	Interno/Externo	Brasil	https://www.brasilit.com.br/produtos/placa-cimenticia
Cimento	Rerthy	Diversos	Várias	Várias	Interno/Externo	Brasil	https://www.rerthy.com.br
Cimento	The Tile Shop	Encaustic Square Pattern Series	200x200	16	Interno	Vietnam/US	https://www.tileshop.com/Search?search=encaustic
Concreto	Ivanka	Ivanka Concrete Panels	300X100, 100X100, 160X80, 120X80	2 e 3	Interno/Externo	Hungria/Geral	https://pdf.archiexpo.com/pt/pdf-en/ivanka/ivanka-panel-catalogue/89100-211133.html
Concreto	Castelatto	Diversos	Várias	Várias	Interno/Externo	Brasil/Geral	https://castelatto.com.br
Gesso e fibra de cana de açúcar	Klimex	Panel 3D Bjorn, Panel 3D Kale, Panel 3D Pelle	500x500	30	Interno	Europa	https://www.leroymerlin.pt/pesquisa/klimex
Gesso	Stegu	New York	400X600	17	Interno	Europa e US	https://en.stegu.pl/product/new-york/
Pedra	Stegu	Natural Stone	100X360	12 - 17	Interno	Europa e US	https://en.stegu.pl/products/natural-stone-plate/

Pedra	Pasinato	Trendwall, Vulcano, Travertino, Easywall, Coralina	Várias	Várias	Interno/Externo	Brasil	https://www.pasinato.com.br/revestimentos
Pedra	The Tile Shop	Architectural Wall Tile	Várias	Várias	Interno	Turquia/US	https://www.tileshop.com/shape/architectural

Capítulo 4

Procedimentos de Ensaaios

4. PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS

Este capítulo apresenta os procedimentos de ensaio que foram divididos em ensaios da argamassa com incorporação de materiais de mudança de fase e, posteriormente, ensaios referentes às placas à base de cimento com incorporação de materiais de mudança de fase. Estes foram selecionados tendo em conta o objetivo do trabalho sendo baseados em normas europeias ou especificações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

É importante ressaltar que devido à especificidade dos materiais, as limitações do laboratório e também a inovação do tema foram necessárias algumas adaptações aos procedimentos de ensaio sendo estas mencionadas, sempre que necessário, durante a descrição dos diferentes ensaios realizados.

4.1 Argamassa com incorporação de materiais de mudança de fase

Os ensaios de argamassa com incorporação de PCM consistem no estudo da propriedade física de trabalhabilidade, e ensaios de propriedades mecânicas que são a resistência à flexão e a resistência à compressão.

4.1.1 Propriedades físicas da argamassa

A propriedade física da argamassa ensaiada foi a trabalhabilidade sendo a mesma descrita abaixo.

4.1.1.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade foi obtida através do método da mesa de espalhamento sendo especificada pela norma EN 1015-3:1999 [69] que determina a consistência da argamassa no estado fresco. A consistência é uma medida da fluidez e/ou humidade da argamassa fresca e fornece uma medida da deformabilidade da argamassa fresca quando submetida a um certo tipo de tensão.

O valor do espalhamento é medido pelo diâmetro médio da argamassa fresca que foi colocada em uma mesa de espalhamento e definida por meio de um molde (Figura 16). Aplicaram-se diversos impactos verticais elevando a mesa de espalhamento e permitindo que ela caísse livremente através de uma

determinada altura.

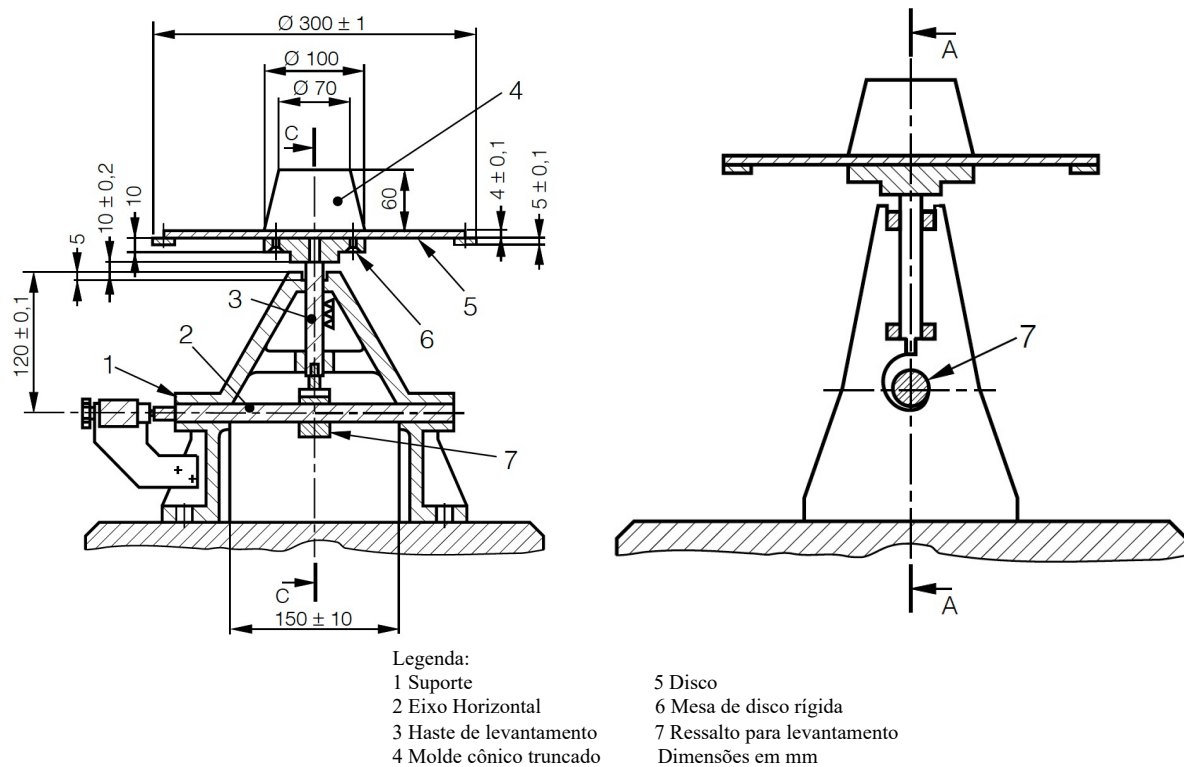


Figura 16 - Exemplo de equipamento utilizado no ensaio, adaptado de EN 1015-3 [69].

Antes do início de cada teste a superfície da mesa e as bordas internas do molde foram limpas com um pano húmido e lubrificadas com óleo mineral. Considerando que a mesa não foi utilizada nas últimas 24 horas, aplicou-se 10 pancadas antes de iniciar os ensaios do dia.

O molde foi colocado centralmente na mesa de disco e a argamassa foi introduzida em duas camadas, cada uma das camadas sendo compactada por 10 pancadas para garantir o preenchimento uniforme do molde. Foi retirado o excesso de argamassa e o molde retirado verticalmente de maneira lenta.

Foram aplicadas 15 pancadas de forma constante, uma pancada por segundo, e então o diâmetro foi medido em 2 direções, perpendiculares entre si. O valor do espalhamento foi a média das duas medições (Figura 17). Considerou-se o ensaio válido quando o diâmetro médio se encontrava compreendido entre 180 ± 5 mm. O diâmetro médio adotado foi utilizado em trabalhos já efetuados anteriormente na Universidade do Minho [11, 67].



Figura 17 - Exemplo de argamassa testada no ensaio.

Para que este diâmetro fosse alcançado foram feitas alterações na quantidade de água da argamassa sendo realizados novos ensaios até que a razão água/ligante atendesse o diâmetro médio considerado no trabalho.

4.1.2 Propriedades mecânicas da argamassa

As propriedades mecânicas estudadas foram a resistência à flexão e a resistência à compressão, ambas são definidas pela EN 1015-11:1999 [70].

Foram elaborados 12 provetes de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, sendo 3 provetes para cada composição que contém 0%, 5%, 10% e 20% de PCM, respectivamente. Os provetes foram desmoldados aos 7 dias de idade, e permaneceram na totalidade de 28 dias na câmara húmida, com humidade relativa de cerca de 90%.

4.1.2.1 Resistência à flexão

A resistência à flexão foi determinada com controle de força, a uma velocidade de 50N/s. A expressão

que determina a resistência à flexão é definida abaixo.

$$R_f = 1,5 X \frac{F X l}{b X d^2}$$

Onde:

R_f = resistência à flexão (MPa);

F = carga de rutura (N);

l = distância entre os apoios (mm);

b = largura do provete (mm);

d = altura do provete (mm).

Os provetes foram dispostos no equipamento conforme ilustrado nas Figuras 18 e 19.

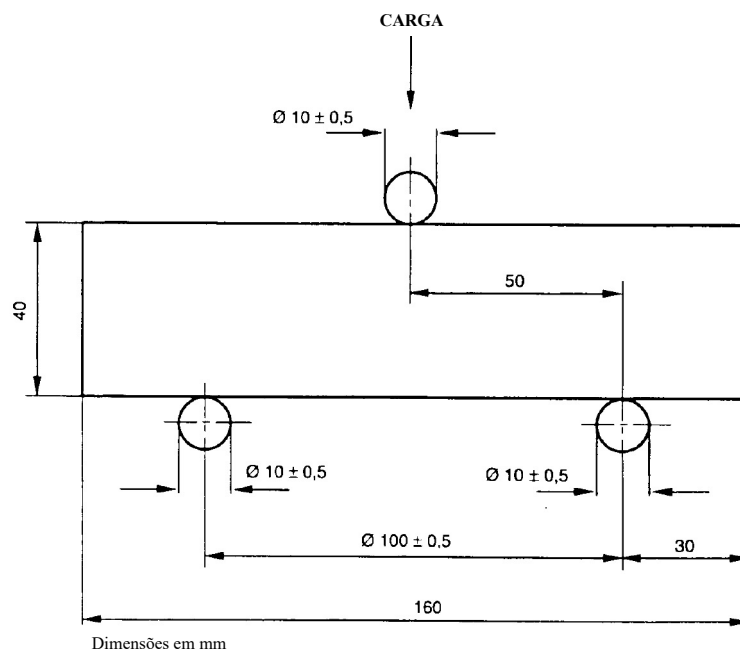


Figura 18 - Configuração do ensaio, adaptado de EN 1015-11 [70].



Figura 19 - Exemplo de ensaio de resistência à flexão.

4.1.2.2 Resistência à compressão

Os provetes utilizados para a determinação da resistência à flexão foram as metades dos provetes obtidos no ensaio de resistência à flexão, sendo assim 6 provetes para cada composição. O exemplo do ensaio é demonstrado na Figura 20. A resistência à compressão foi determinada com controle de força, a uma velocidade de 150N/s. A expressão que determina a resistência à compressão é definida abaixo.

$$R_c = \frac{F}{b \times d}$$

Onde:

R_c = resistência à compressão (MPa);

F = carga de rutura (N);

b = largura do provete (mm);

d = altura do provete (mm).

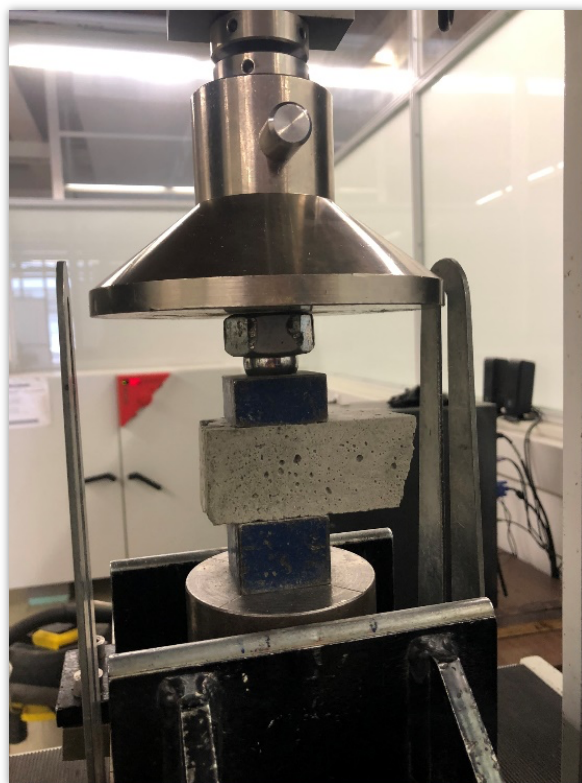


Figura 20 - Exemplo de ensaio de resistência à compressão.

4.2 Placas à base de cimento com incorporação de materiais de mudança de fase

A escolha dos ensaios presentes neste trabalho levou em consideração a NP EN 1469:2015 – Produtos em Pedra Natural – Placas para revestimento de paredes [71]. Apesar da existência de normas de painéis com cimento, fibrocimento e madeira, esta norma foi adotada devido ao fato de ser específica para placas usadas em revestimento. Esta norma define os requisitos para placas de pedra natural utilizadas como revestimento no acabamento de paredes e de tetos interiores e exteriores e também especifica uma série de ensaios. A placa para revestimento é definida como placa cortada à medida destinada a ser utilizada no revestimento de paredes interiores e exteriores que poderá ser fixada ou suspensa segundo qualquer ângulo.

Pelas normas se basearem em pedras naturais algumas adaptações aos ensaios foram feitas sendo os procedimentos de ensaio descrito nas seções abaixo.

4.2.1 Propriedades físicas das placas

As propriedades físicas estudadas são a absorção de água à pressão atmosférica; absorção de água por capilaridade; e determinação das massas volúmicas real e aparente e porosidades total e aberta.

4.2.1.1 Massa volúmica real e aparente e porosidade total e aberta

A determinação da massas volúmica real e aparente e da porosidade total e aberta foram obtidas segundo a NP EN 1936:2008 [72]. Para o ensaio foram utilizados 5 provetes de 100x100x20mm³, metade dos provetes utilizados no ensaio de flexão descrito em 4.2.2.1, para cada composição que contém 0%, 5%, 10% e 20% de PCM.

Os provetes foram secos à temperatura de 70°C até atingirem a massa constante. A massa constante foi atingida quando a diferença entre duas pesagens sucessivas realizadas num intervalo de (24±2) h não foi superior a 0,1%.

Os provetes foram pesados e em seguida colocados num recipiente de vácuo capaz de reduzir a pressão em -1 bar. Esta pressão foi mantida durante 2h para eliminar o ar contido nos poros abertos dos provetes (Figura 21).

Depois disso, manteve-se a pressão e foi introduzida água no recipiente garantindo que os provetes ficassem totalmente submersos em não menos que 15 minutos. Posteriormente, a pressão atmosférica foi restaurada no interior do recipiente e os provetes foram deixados submersos por 24h, sendo pesados novamente após esse período. Os provetes foram primeiramente pesados submersos (m_i) e depois fora da água (m_s).



Figura 21 - Recipiente utilizado para o ensaio.

Com as massas obtidas é possível obter o volume de poros abertos, definido pela seguinte equação:

$$V_0 = \frac{m_s - m_d}{\rho_{th}} \times 1000$$

Onde:

V_0 = volume dos poros abertos do provete (mL);

m_s = massa do provete saturado (g);

m_d = massa do provete seco (g);

ρ_{th} = massa volúmica real da água (kg/m³).

Também é possível obter o volume aparente através de uma equação, porém optou-se por calcular com base nas dimensões do provete conforme sugerido na norma.

A massa volúmica aparente e a porosidade aberta podem ser calculadas com as massas obtidas anteriormente, sendo definidas pelas seguintes equações:

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} X \rho_{th}$$

$$p_o = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} X 100$$

Onde:

ρ_b = massa volúmica aparente do provete (kg/m^3);

p_o = porosidade aberta do provete (%);

m_s = massa do provete saturado (g);

m_d = massa do provete seco (g);

m_h = massa do provete imerso em água (g);

ρ_{th} = massa volúmica real da água (kg/m^3).

No prosseguimento do ensaio, os provetes foram novamente secos à temperatura de 70 °C até atingirem a massa constante. Para o cálculo da massa volúmica real o método escolhido foi o Voluménómetro de Le Chatelier. Para a execução do método escolhido cada provete foi moído até as suas partículas passassem em um peneiro com 0,075mm de abertura de malha.

Foi retirada uma massa com aproximadamente 40g e no Voluménómetro de Le Chatelier foi inserido gasolina. Então, determinou-se através da escala o volume de líquido deslocado pela massa do provete moído, Figura 22. Após o ensaio pode-se obter a massa volúmica real e a porosidade total, ambas descritas nas equações abaixo:

$$\rho_r = \frac{m_e}{V_s} X \rho_{th}$$

$$p = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_r}\right) X 100$$

Onde:

ρ_r = massa volúmica real do provete (kg/m^3);

p = porosidade total do provete (%);

m_e = massa do provete seco e moído (g);

V_e = volume do líquido deslocado pela massa m_e ;

ρ_{th} = massa volúmica real da água (kg/m^3);

ρ_b = massa volúmica aparente do provete (kg/m^3).

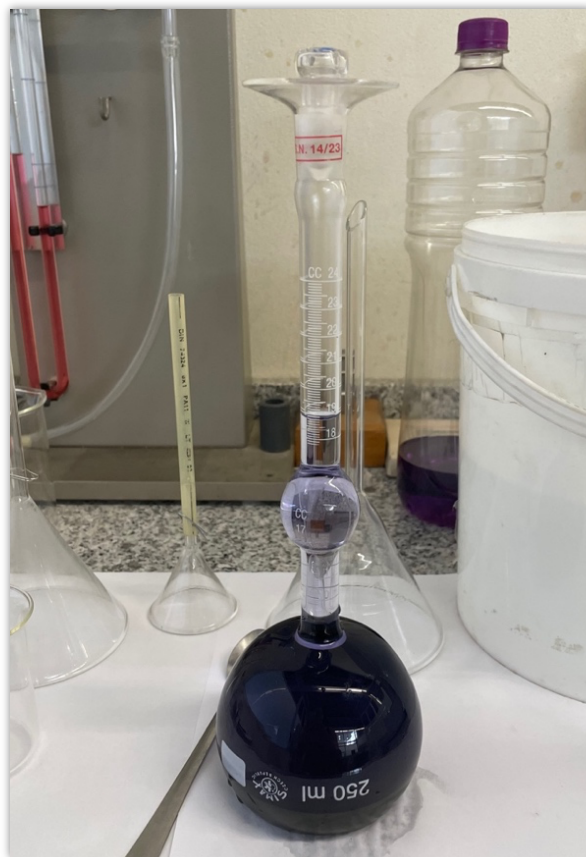


Figura 22 - Método Volunómetro de Le Chatelier.

4.2.1.2 Absorção de água à pressão atmosférica

A norma que especifica este ensaio é a NP EN 13755:2008 [73] definindo que, após a secagem até a massa constante, cada provete é pesado e seguidamente imerso em água à pressão atmosférica durante um período de tempo especificado. A absorção de água à pressão atmosférica, expressa em

percentagem, é calculada através da razão entre a massa do provete saturado (após ter atingido a massa constante) e a massa do provete seco.

Os provetes foram confeccionados na forma de cubos de 50x50x50 mm³ sendo 6 provetes de cada composição, que posteriormente foram secos à temperatura de 70 °C até atingirem a massa constante. A massa constante (massa do provete seco) foi atingida quando a diferença entre duas pesagens sucessivas realizadas num intervalo de (24±2) h não foi superior a 0,1%.

O ensaio consistiu em pesar os provetes após secagem e colocar os provetes no recipiente de imersão sobre suportes. Foi adicionado ao recipiente água corrente canalizada à temperatura de (20±10) °C até metade da altura dos provetes. Após 60 minutos adicionou-se água até ³/₄ da altura do provete. Após 120 minutos adicionou-se água até que os provetes ficassem totalmente imersos até profundidade de (25±5) mm relativa à superfície livre da água (Figura 23).

Após 48h, foram retirados os provetes da água, limpos com pano húmido, e pesados no decorrer de 1 minuto. O ensaio foi repetido a cada 24h até que o provete atingisse a massa constante (massa do provete saturado).

O valor da absorção de água à pressão atmosférica (A_b) de cada provete foi obtido pela expressão abaixo:

$$A_b = \frac{m_s - m_d}{m_d} \times 100$$

Onde:

A_b = absorção de água à pressão atmosférica (%);

m_s = massa do provete saturado (g);

m_d = massa do provete seco (g).



Figura 23 - Ensaio de absorção de água à pressão atmosférica.

4.2.1.3 Absorção de água por capilaridade

A NP EN 1925:2000 [74] especifica um método para a determinação do coeficiente de absorção de água de pedras naturais por capilaridade, que tem como princípio, após secagem até massa constante, colocar o provete em contato com uma lâmina de água de 3 ± 1 mm, sendo o aumento da massa sofrido avaliado em função do tempo.

Os provetes foram confeccionados na forma de cubos de $50\times 50\times 50$ mm³ sendo feitos 6 provetes de cada composição, que foram secos à temperatura de 70 °C até atingirem a massa constante. A massa constante foi atingida quando a diferença entre duas pesagens sucessivas realizadas num intervalo de (24 ± 2) h não foi superior a 0,1%.

O ensaio consistiu em pesar os provetes após secagem e calcular a área da base a ser colocada em contato com a água através da medição de duas medianas. Para otimizar o ensaio foram impermeabilizadas as faces laterais do provete para que o contato com a água acontecesse somente

pela face inferior. Colocaram-se os provetes no recipiente de modo que não ficassem em contato direto com o fundo (Figura 24).

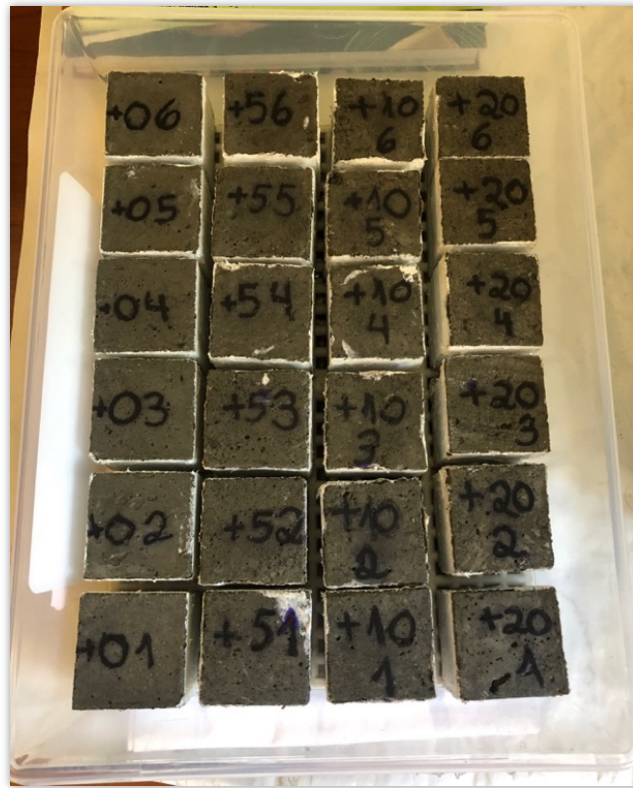


Figura 24 - Ensaio de absorção de água por capilaridade.

Imergiu-se a base do provete na água até a profundidade de 3 ± 1 mm e o tempo de ensaio iniciou-se. Manteve-se o nível de água constante durante o ensaio, através da adição de água caso fosse necessário, e o recipiente manteve-se fechado para evitar evaporação da água. Em intervalos de tempo determinados, retirou-se sucessivamente cada provete, limpou-se ligeiramente a parte imersa utilizando pano húmido e pesou-se de imediato, voltando a colocar o provete no recipiente. Anotou-se o tempo decorrido desde o início do ensaio até o momento de cada pesagem.

A seleção dos intervalos de tempo adotado para pesagem dos provetes encontra-se na Tabela 10. O final do ensaio foi atingido quando a diferença entre duas pesagens sucessivas não foi superior a 0,1%.

Tabela 10 - Plano do ensaio de absorção de água por capilaridade.

Medição	Tempo (min)	Tempo (h)
1	10	0,17
2	20	0,33
3	30	0,5
4	60	1
5	180	3
6	480	8
7	1440	24
8	2880	48
9	4320	72
10	5760	96
11	7200	120
12	8640	144
13	10080	168
14	11520	192

Com os resultados obtidos foi possível calcular o coeficiente de absorção capilar e elaborar gráficos em função da raiz quadrada do tempo. O coeficiente de absorção capilar é apresentado na expressão abaixo:

$$C = \frac{m_i - m_d}{A \times \sqrt{t_i}}$$

Onde:

C = coeficiente de absorção capilar (kg/m².min^{0,5});

m_i = massas sucessivas do provete durante o ensaio (kg);

m_d = massa do provete seco (kg);

A = área da face imersa em água (m²);

t_i = tempo decorrido desde o início do ensaio até o momento da obtenção das sucessivas massas m_i (min).

4.2.2 Propriedades mecânicas das placas

A propriedade mecânica estudada foi a resistência à flexão, definida pela NP EN 12372:2008 [75]. Foram elaborados 4 provetes de 100x200x20mm³ para cada composição que contém 0%, 5%, 10% e 20% de PCM. Os provetes foram desmoldados com 7 dias, e permaneceram na totalidade de 28 dias na câmara húmida, com humidade relativa de cerca de 90%.

4.2.2.1 Resistência à flexão sob carga centrada

A resistência à flexão sob carga centrada foi determinada com controle de força, a uma velocidade de 50N/s. A expressão que determina a resistência à flexão é definida abaixo.

$$Rf = 1,5 X \frac{F X l}{b X d^2}$$

Onde:

Rf = resistência à flexão (MPa);

F = carga de rutura (N);

l = distância entre os apoios (mm);

b = largura do provete (mm);

d = altura do provete (mm).

Os provetes foram dispostos no equipamento conforme mostrado nas Figuras 25 e 26. A distância entre apoios adotada foi de 100mm, visto que a norma especifica que a distância deve ser 5 vezes o valor da espessura do provete.

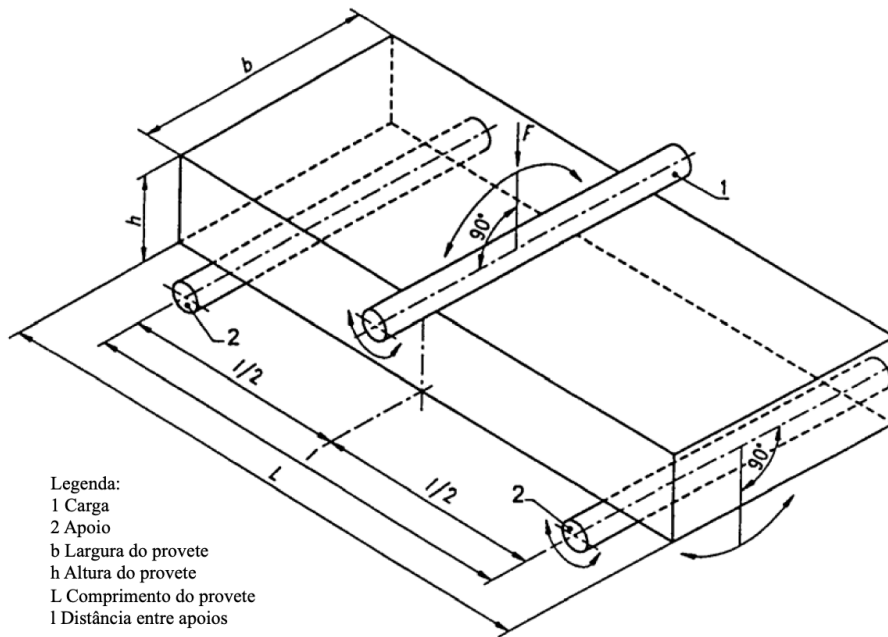


Figura 25 - Configuração do ensaio, adaptado de NP EN 12372 [75].



Figura 26 - Ensaio de resistência à flexão sob carga centrada.

Capítulo 5

Resultados e Discussão

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Argamassa com incorporação de materiais de mudança de fase

5.1.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade foi obtida através do método da mesa de espalhamento [69], sendo que para este trabalho, considerou-se o ensaio válido quando o diâmetro médio se encontrava compreendido entre 180 ± 5 mm.

O PCM solidifica a uma temperatura inferior a 20°C sendo assim necessário controlar a temperatura da água antes da mistura. Os resultados de espalhamento obtidos com diferentes variações de temperatura são demonstrados na Figura 27. Pode concluir-se que o intervalo de temperatura da água para a obtenção da trabalhabilidade ideal nas argamassas com PCM foi dos 22°C aos 26°C .

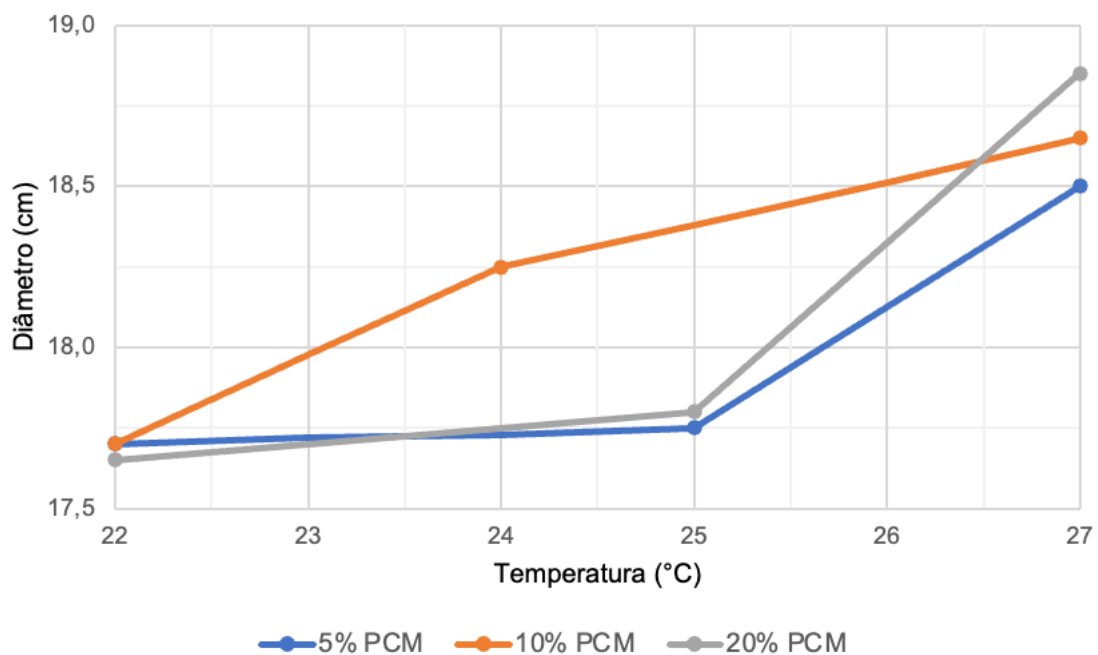


Figura 27 - Relação da temperatura da água e o diâmetro de espalhamento.

Através da Figura 27 também é possível verificar que o diâmetro de espalhamento aumenta com o acréscimo da temperatura da água. Este comportamento pode ser justificado pelo fato do PCM ser

sensível ao aumento de temperatura, tornando-se menos viscoso e conseqüentemente mais líquido, aumentando a trabalhabilidade da argamassa.

Os resultados obtidos no ensaio demonstraram que, com o aumento do teor de PCM, a quantidade necessária de água para obter uma mistura homogênea diminuiu (Figura 28). Em comparação com a argamassa de referência (0% de PCM) verifica-se que a relação de água/ligante diminuiu em 2% com incorporação de 5% de PCM, 7% com 10% de PCM e 14% com 20% de PCM na composição da mistura. Atribui-se este comportamento o fato do PCM ser adicionado na forma líquida, contribuindo para uma maior trabalhabilidade da argamassa, mesmo não contribuindo para a hidratação do ligante.

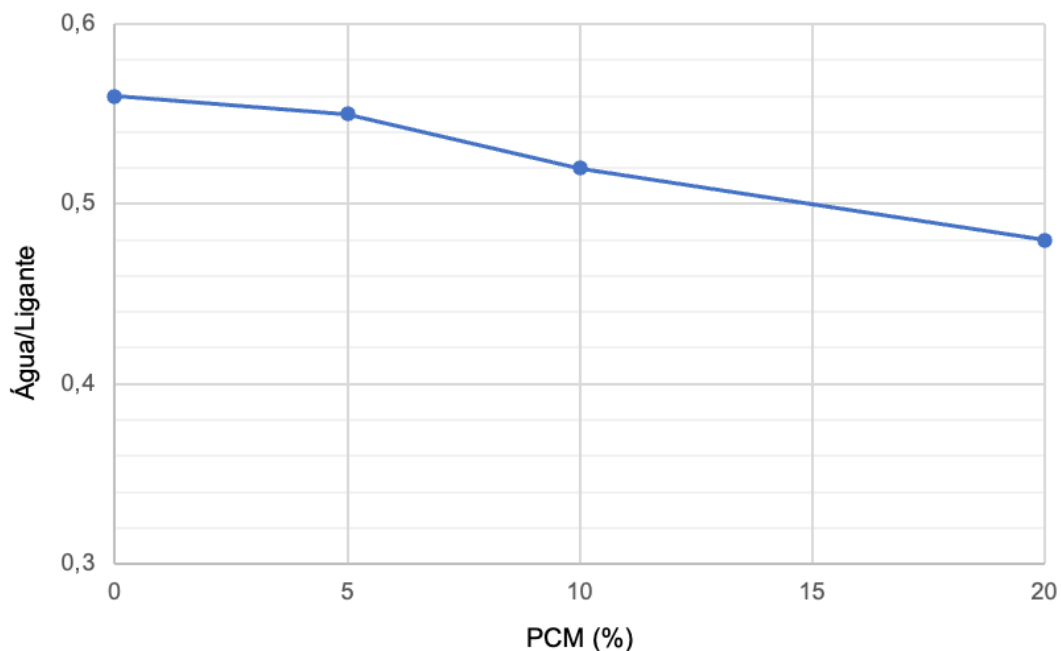


Figura 28 - Relação Água/Ligante das Argamassas.

Outro comportamento possível de observar é o aumento da razão líquido/ligante nas argamassas conforme o aumento do teor de incorporação de PCM (Figura 29). Este aumento deve-se ao fato do PCM apresentar-se de forma líquida. Em comparação com a argamassa de referência verifica-se que a relação de líquido/ligante aumenta em 20% com incorporação de 5% de PCM, 30% com 10% de PCM e 46% com 20% de PCM na composição da mistura.

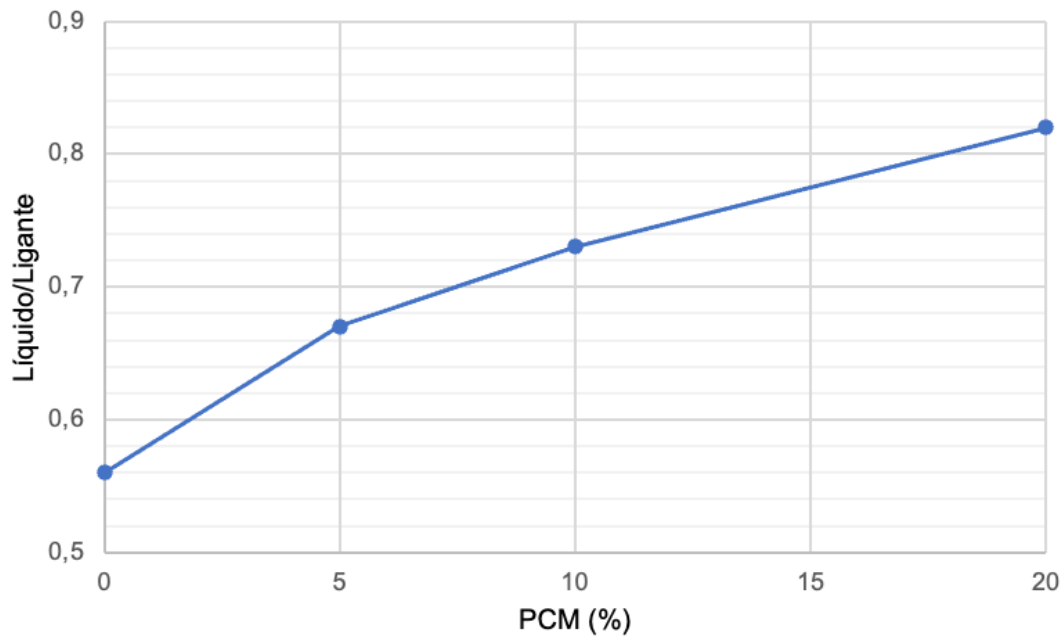


Figura 29 - Relação Líquido/Ligante das Argamassas.

5.1.2 Resistência à flexão

A resistência à flexão foi determinada pela EN 1015-11:1999 [70]. Com os resultados obtidos analisou-se que a resistência à flexão diminui com o aumento do teor de PCM nas argamassas (Figura 30). Com a incorporação de 5% de PCM observa-se que houve uma diminuição de 27% na resistência à flexão em comparação com a argamassa de referência, porém a maior diferença foi na incorporação de 10% e 20% de PCM na argamassa, com uma redução de 38% e 55%, respectivamente, na resistência à flexão.

Este comportamento pode ser justificado pelo aumento da quantidade de líquido nas argamassas (relação líquido/ligante) que provoca um aumento da porosidade e conseqüente diminuição da resistência à flexão. Este aumento da porosidade pode ser comprovado através do ensaio de massa volúmica real e aparente e porosidade total e aberta, descrito na secção 5.2.1, que demonstrou um aumento no volume de poros abertos e aumento da porosidade aberta e total com o acréscimo da incorporação de PCM nas composições.

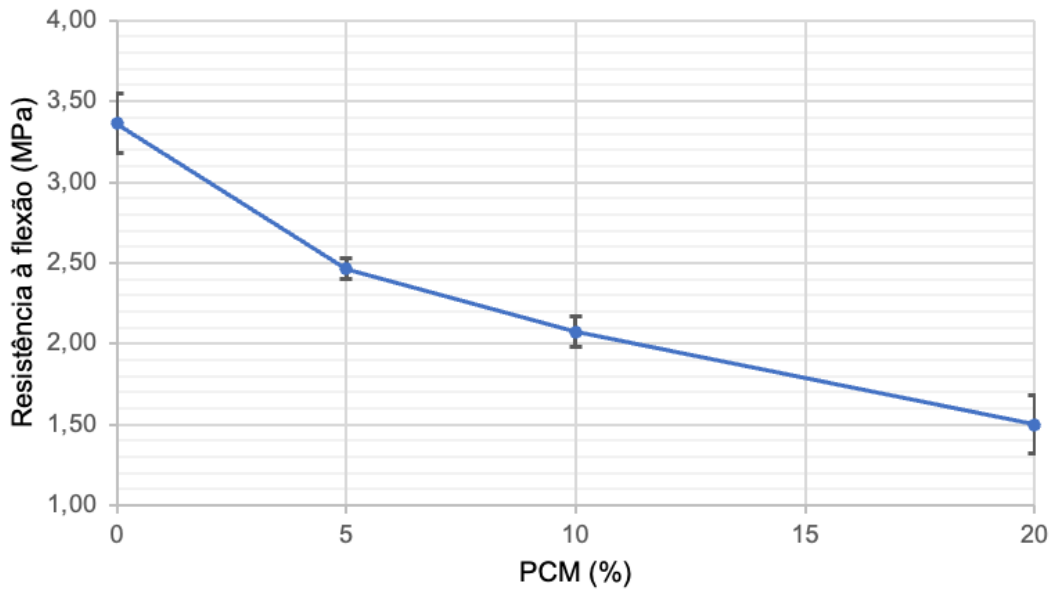


Figura 30 - Resistência à flexão.

5.1.3 Resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada pela EN 1015-11:1999 [70]. Assim como os resultados da resistência à flexão, a resistência à compressão diminuiu com o aumento do teor de PCM (Figura 31). A incorporação de 5% de PCM na argamassa originou uma diminuição de 26% na resistência à compressão, para a incorporação de 10% e 20% de PCM a diminuição foi maior sendo de 48% e 57% respectivamente.

O comportamento verificado é também justificado pelo aumento da quantidade de líquido nas argamassas, que provoca uma maior porosidade e conseqüente diminuição da resistência à compressão.

Apesar da redução na resistência à compressão, o desempenho foi bom o suficiente para classificar a argamassa, segundo a NP EN 998-1:2010 [21] e Tabela 11, com qualidade para ser aplicada em rebocos interiores, por exemplo. A Tabela 12 apresenta as classificações obtidas tendo como objetivo avaliar a adequabilidade das argamassas desenvolvidas para aplicação no setor da construção. Pode observar-se que, apesar da redução da resistência à compressão com a incorporação de PCM, a classificação das argamassas segundo a norma se manteve em CS IV para 5% de PCM e apenas uma classificação abaixo, CS III, para incorporação de 10% e 20% de PCM, o que corresponde às classificações mais elevadas para argamassas (Tabelas 11 e 12).

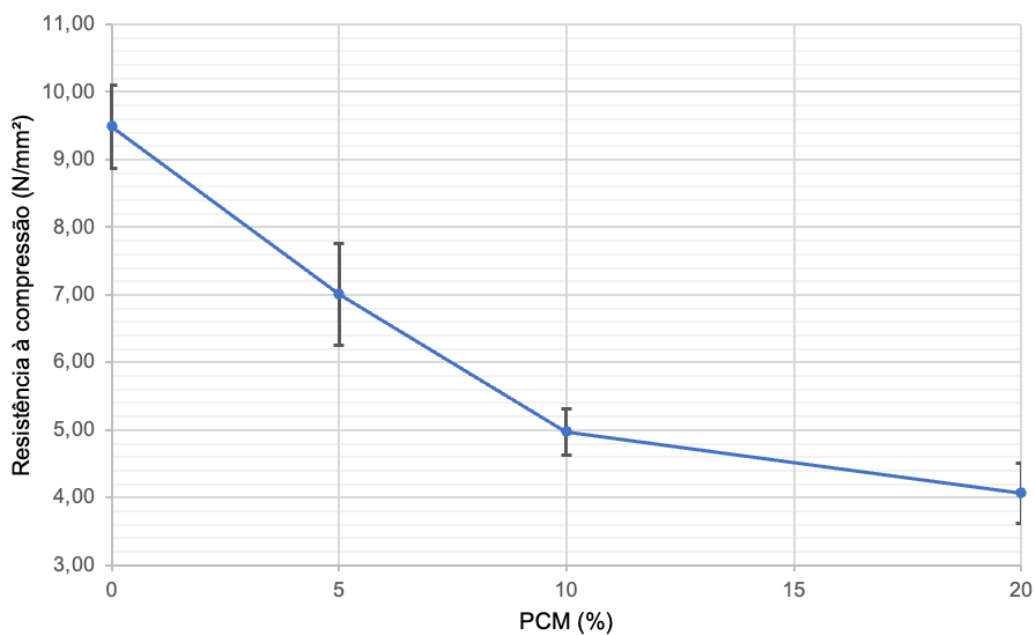


Figura 31 - Resistência à compressão.

Tabela 11 - Classificação das argamassas [21].

Categorias	Resistência à compressão (N/mm²)
CS I	0,4 – 2,5
CS II	1,5 – 5,0
CS III	3,5 – 7,5
CS IV	≥6

Tabela 12 - Classificação das argamassas em relação à resistência à compressão pela NP EN 998-1.

Composição	PCM (%)	Resistência à compressão (N/mm²)	Classificação
C0PCM	0	9,49 ± 0,61	CS IV
C5PCM	5	7,01 ± 0,75	CS IV
C10PCM	10	4,97 ± 0,34	CS III
C20PCM	20	4,07 ± 0,44	CS III

5.2 Placas à base de cimento com incorporação de materiais de mudança de fase

5.2.1 Massa volúmica real e aparente e porosidade total e aberta

As massas volúmica real e aparente e a porosidade total e aberta foram obtidas segundo a NP EN 1936:2008 [72]. Também através da norma foi possível obter o volume de poros abertos e o volume aparente.

Conforme a Figura 32 é possível analisar que o volume de poros abertos aumenta com o acréscimo do teor de PCM incorporado. Comparando-se a placa de referência (0% PCM) e a placa com incorporação de 5% de PCM houve um aumento no volume de poros abertos de 30%. A incorporação de 10% de PCM apresentou um aumento de 41% e com a incorporação de 20% de PCM esse aumento passou para 43%. Este comportamento pode ser justificado pelo fato da placa ter uma maior superfície exposta, o que permite uma maior facilidade na evaporação da água durante o processo de cura. Por outro lado, o PCM tem uma maior tendência para se deslocar pela superfície, o que também contribui para um aumento do volume de vazios, podendo este efeito chamar-se “efeito placa”.

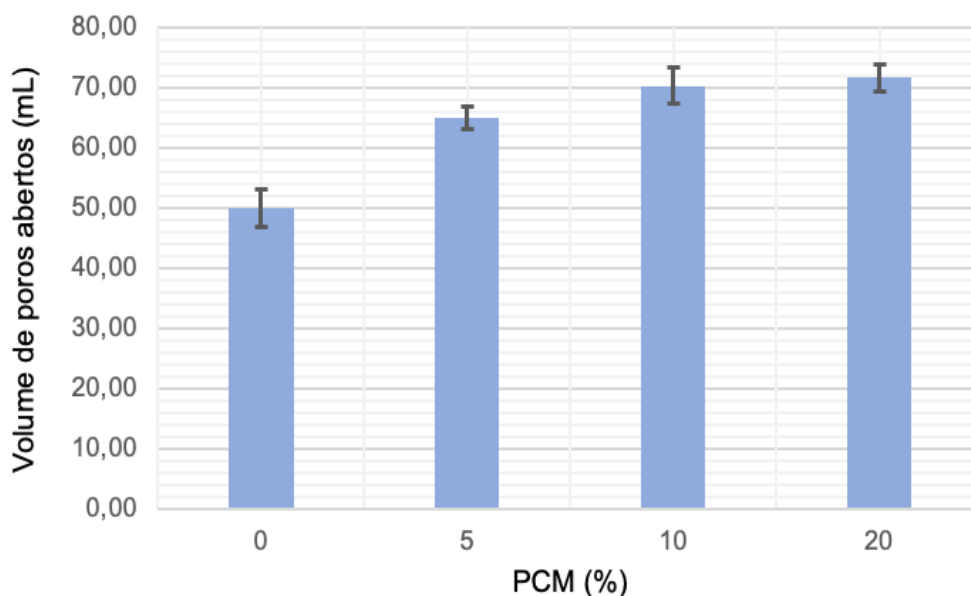


Figura 32 - Volume de poros abertos.

O volume aparente pode ser analisado através da Figura 33. Observa-se um aumento de 1%, 4% e 5% com a incorporação de 5%, 10% e 20% de PCM, respectivamente. Apesar deste aumento ligeiro pode considerar-se que o acréscimo de PCM não teve consequências no volume aparente das placas, fator este que pode ser justificado pela limitação dos moldes quando os provetes foram confeccionados.

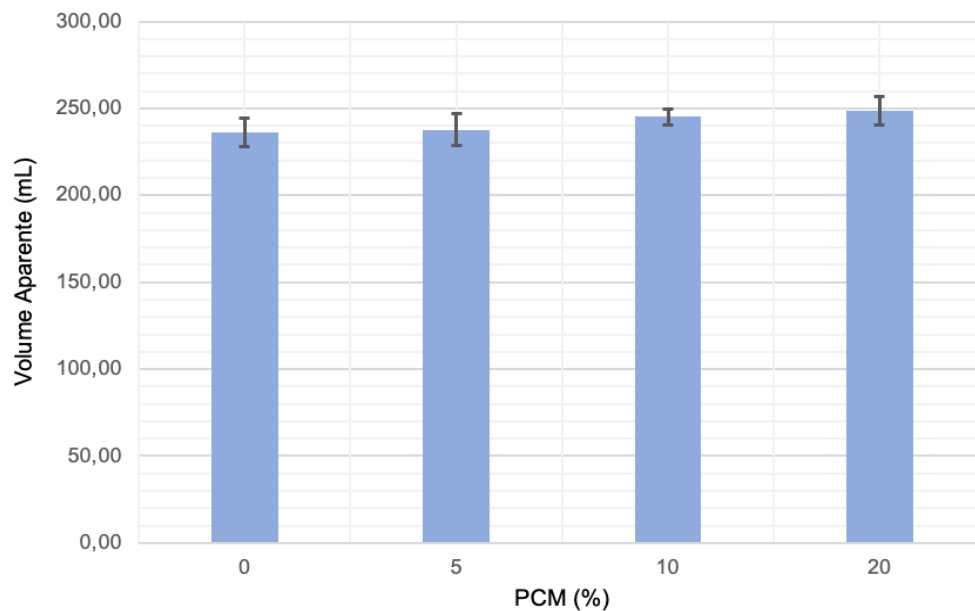


Figura 33 - Volume Aparente.

Os resultados obtidos anteriormente, como o volume de poros abertos, refletiram-se na massa volúmica aparente das placas que diminuiu com o aumento do teor de PCM (Figura 34), pois quanto maior o volume de poros, menor é sua massa volúmica aparente. Observa-se que houve uma diminuição de 11% na massa volúmica aparente com 5% de PCM em comparação com os provetes de referência, para 10% e 20% de PCM, houve uma redução de 14% e 18%, respectivamente. Este comportamento também pode ser justificado pelo fato do PCM apresentar massa volúmica inferior à da areia e da água.

A porosidade aberta é demonstrada na Figura 35. Pode observar-se que a porosidade aberta aumenta com a incorporação de maiores teores de PCM. Comparando-se a composição de referência e a composição com incorporação de 5% de PCM verifica-se um aumento na porosidade aberta de 23%. A incorporação de 10% de PCM originou um aumento de 27% e a incorporação de 20% de PCM levou a um aumento de 36%. Ou seja, quanto maior o teor de PCM, maior foi o volume dos poros abertos e consequentemente maior porosidade nas placas, ambas justificadas pelo “efeito placa”, descrito anteriormente.

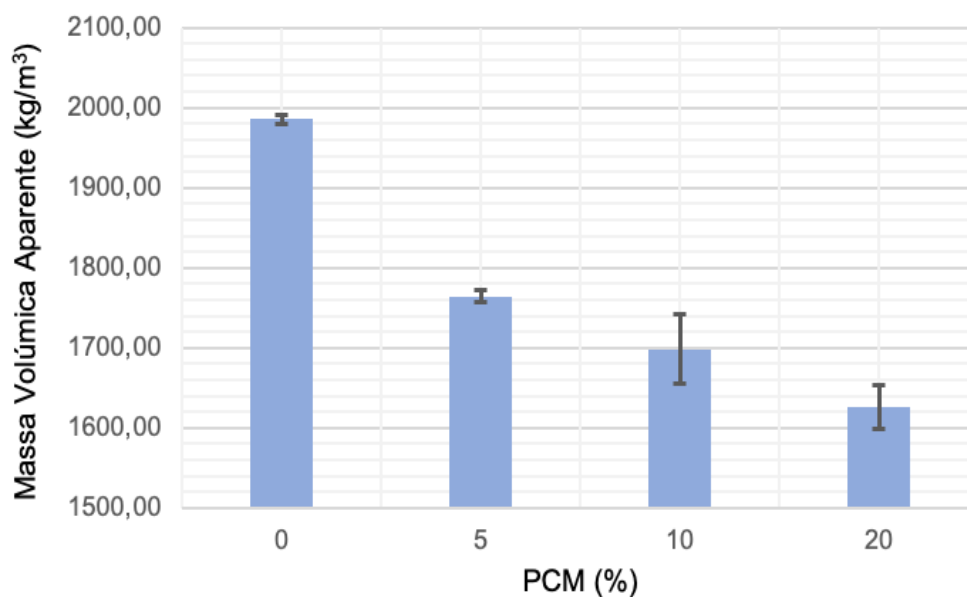


Figura 34 - Massa volúmica aparente.

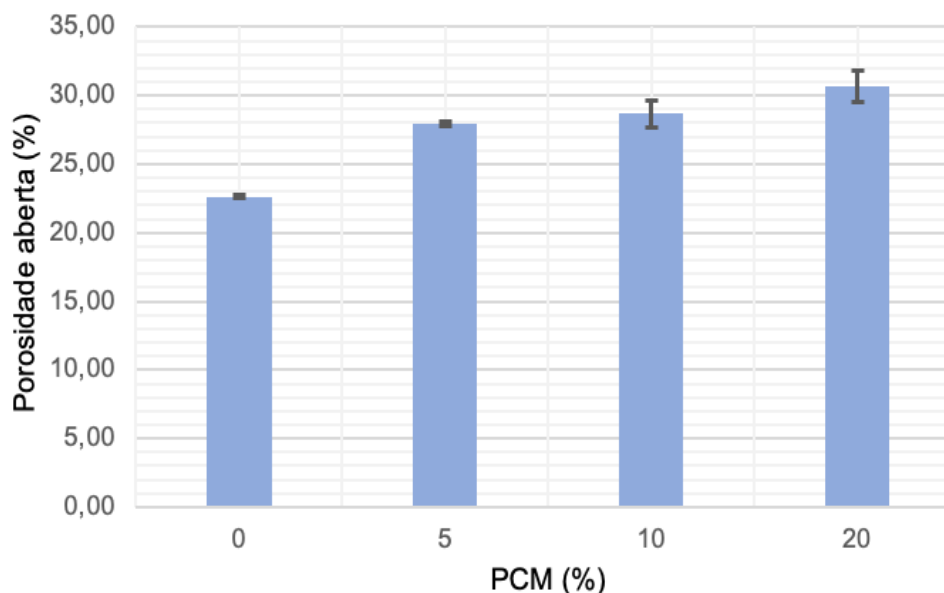


Figura 35 - Porosidade Aberta.

A massa volúmica real pode ser analisada através da Figura 36. Observa-se que houve uma diminuição de 4%, 5% e 6% com a incorporação de 5%, 10% e 20% de PCM, respetivamente. Apesar desta diminuição, a percentagem pode ser considerada irrelevante, sendo assim conclui-se que não houve alteração na massa volúmica real para os diferentes teores de PCM nas placas. O PCM apresenta massa volúmica inferior à da areia e da água, razão pela qual a massa específica das placas diminuiu ligeiramente, mas após retirar os vazios presentes nos provetes, essa diferença foi mínima podendo considerar que não

houve alteração significativa na massa específica.

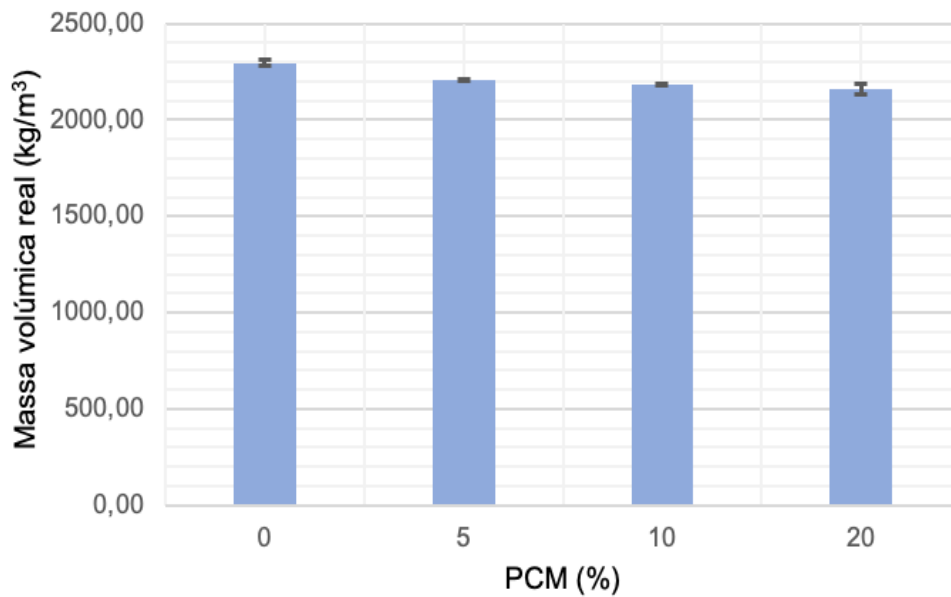


Figura 36 - Massa volúmica real.

A porosidade total é demonstrada na Figura 37 e tem relação com os poros abertos e fechados. Pode observar-se que a porosidade total aumenta com a incorporação de maiores teores de PCM. Comparando-se a composição de referência e a composição com incorporação de 5% de PCM observou-se um aumento na porosidade total de 48%. A incorporação de 10% de PCM apresentou um aumento de 65% e com a incorporação de 20% de PCM originou um aumento de 76%, mais uma vez justificado pela maior relação água/ligante presente nas argamassas e pela maior facilidade de evaporação da água devido à maior superfície exposta das placas, relacionada com a sua geometria.

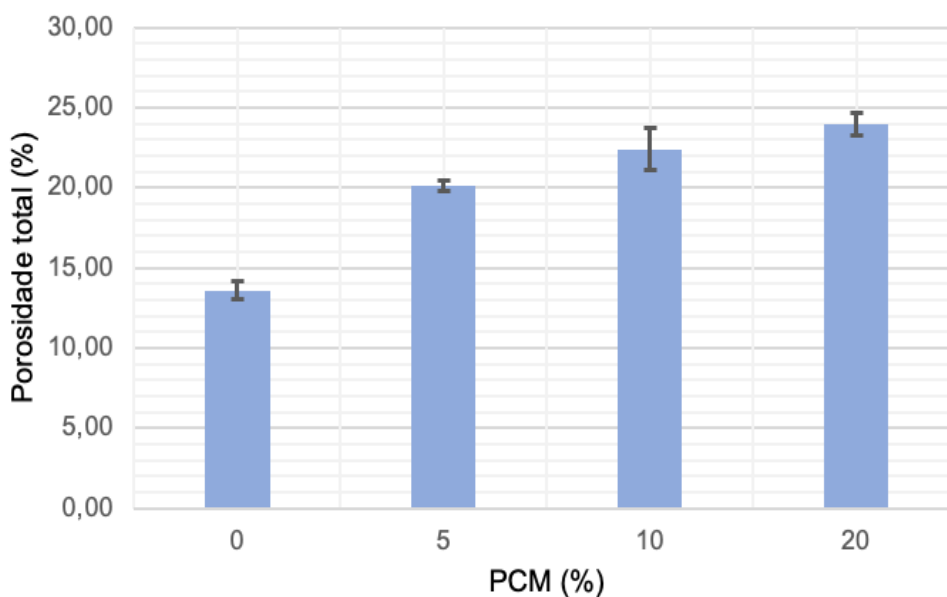


Figura 37 - Porosidade total.

5.2.2 Absorção de água à pressão atmosférica

A absorção de água à pressão atmosférica é especificada na NP EN 13755:2008 [73] e tem relação com a presença de poros de maiores dimensões (macroporosidade). Conforme a Figura 38 é possível observar que houve uma ligeira tendência no aumento de absorção de água com o acréscimo do teor de PCM incorporado. Este comportamento pode ser atribuído ao aumento da razão líquido/ligante e aumento do volume de poros nas composições com incorporação de PCM, como tal demonstrado anteriormente em 5.2.1. O aumento no volume de poros ocasionou uma maior porosidade na argamassa proporcionando este ligeiro aumento na absorção de água com o acréscimo do teor de PCM.

Comparando-se a composição de referência (0% PCM) e a composição com incorporação de 5% de PCM houve um aumento de absorção de água de 3%. A incorporação de 10% de PCM apresentou um aumento de 7% na absorção de água e se comparado com a incorporação de 20% de PCM esse aumento passou para 21%, conforme descrito anteriormente, este aumento pode ser considerado ligeiro.

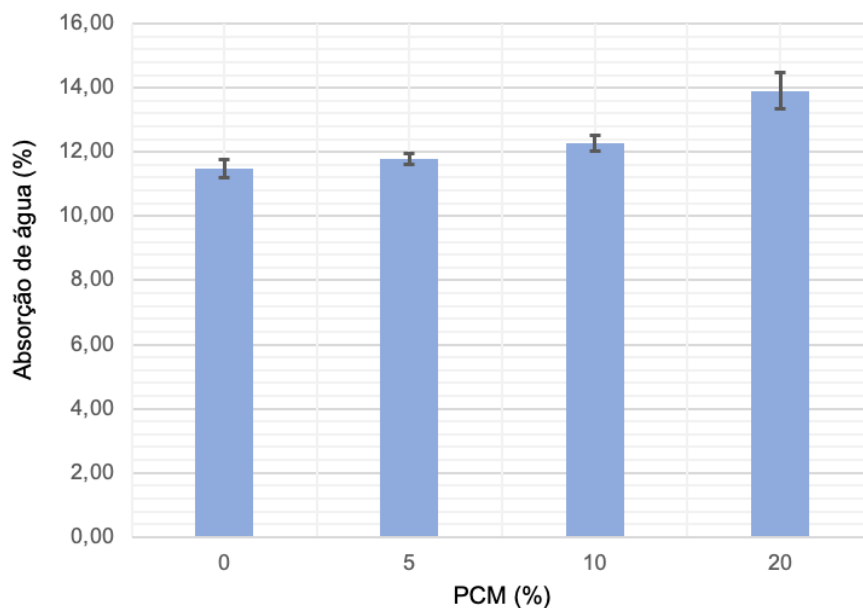


Figura 38 - Variação da absorção de água à pressão atmosférica.

5.2.3 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade é especificada na NP EN 125:2000 [74]. Esta propriedade tem relação com a microporosidade e é importante pois influencia na durabilidade das placas e também determina a facilidade de penetração de agentes agressivos no interior das mesmas. A capacidade de penetração de agentes agressivos é influenciada por diversos fatores como: trabalhabilidade, relação água/ligante, idade, finura do ligante e condições de cura.

Para a determinação do valor do coeficiente de absorção capilar considerou-se a seleção dos intervalos de tempo adotado no plano de ensaio no item 4.2.1.3 (Tabela 10). Os valores válidos para a obtenção do coeficiente foram representados pelo declive da reta de regressão linear nos primeiros pontos do gráfico. O coeficiente de correlação da reta adotado foi superior à 0,9. A Figura 39 representa um exemplo de gráfico para o cálculo do coeficiente.

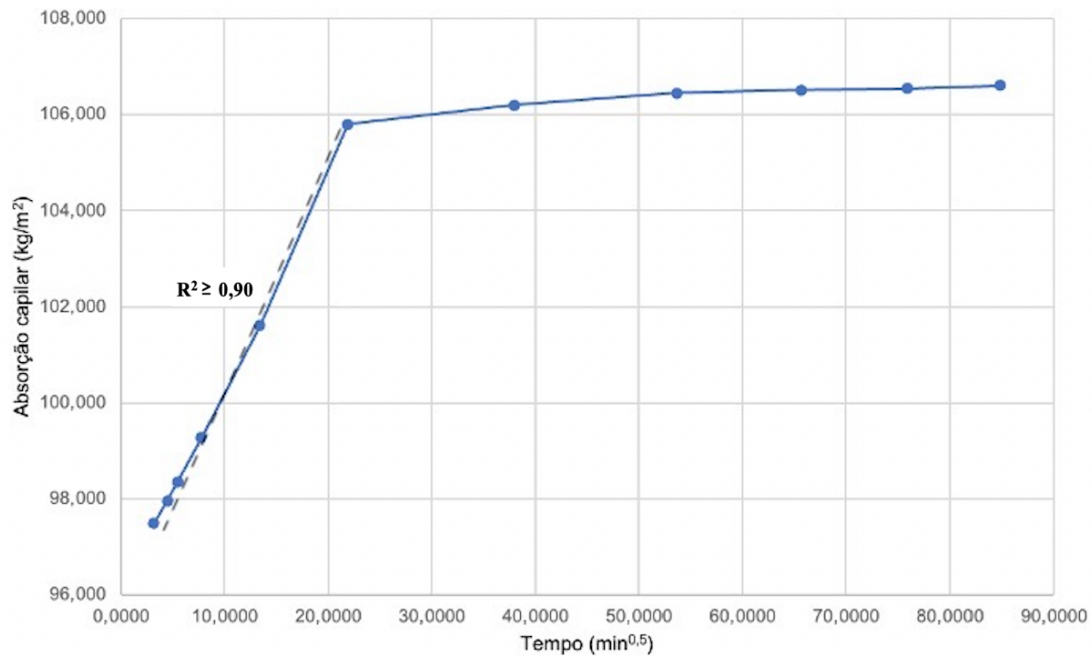


Figura 39 - Exemplo de gráfico de absorção capilar.

Confirme observado na Figura 40, o coeficiente de absorção de água por capilaridade é praticamente o mesmo para três composições, isto quer dizer que a velocidade que os provetes absorveram a água foi similar. Para 20% de PCM, o coeficiente foi 25% menor que os demais. Este comportamento pode ser justificado pela presença de PCM nos poros da matriz cimentícia diminuindo assim o tamanho dos mesmos e consequentemente a velocidade de absorção tal como verificado em trabalho anteriores [8, 11].

Já com relação a quantidade de água absorvida pelos provetes por capilaridade, Figura 41, pode verificar-se que para a composição de referência a absorção foi de 10kg/m², e para as composições com incorporação de 5%, 10% e 20% de PCM a absorção foi de 9 kg/m². Houve uma diminuição de 10% na capacidade de absorção capilar. Novamente, este comportamento pode ser relacionado com a presença de PCM nos poros, impedindo assim uma maior absorção capilar, em termos de microporosidade.

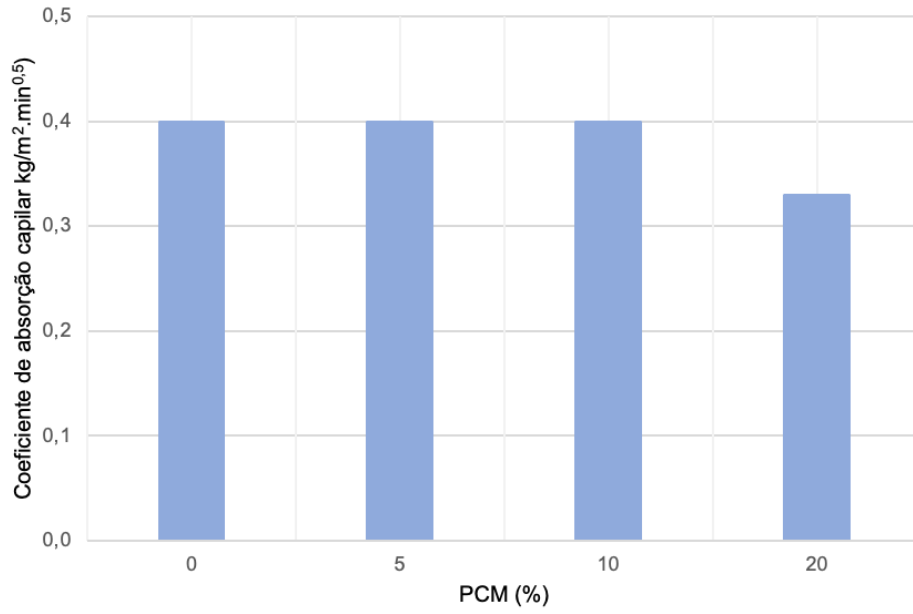


Figura 40 - Coeficiente de absorção capilar.

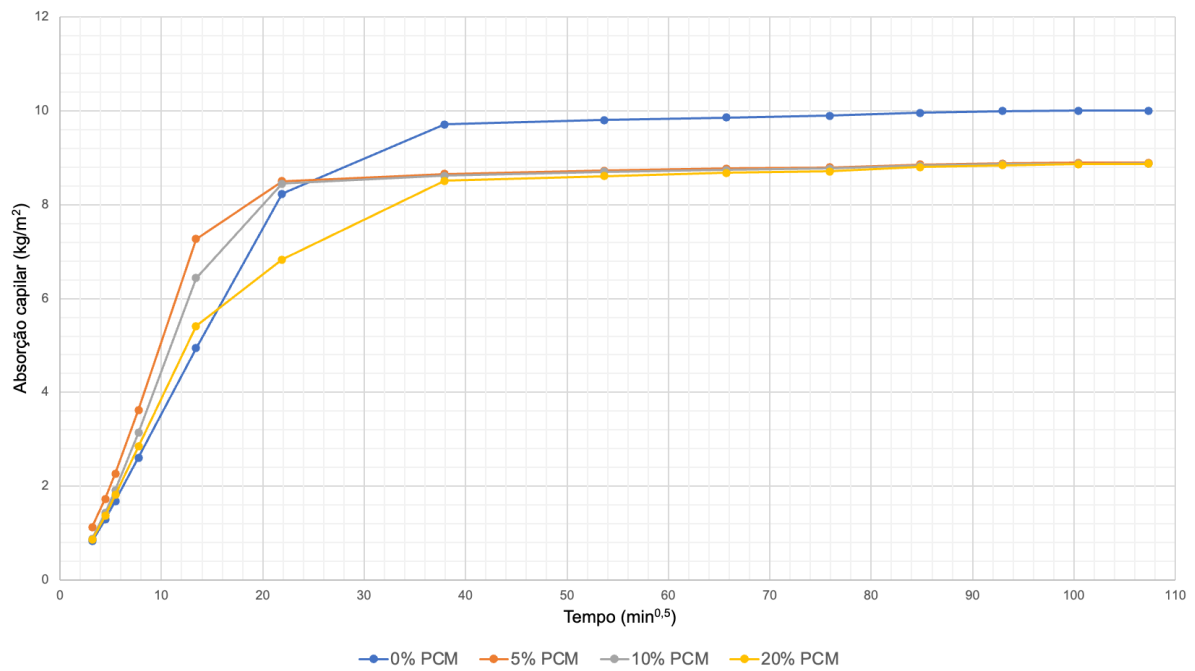


Figura 41 - Absorção capilar.

5.2.4 Resistência à flexão sob carga centrada

A resistência à flexão das placas foi determinada pela NP EN 12372:2008 [75]. Com os resultados obtidos analisou-se que a resistência à flexão diminuiu com o aumento do teor de PCM (Figura 42). Observa-se que houve uma queda de 17% da resistência à flexão com a incorporação de 5% de PCM em comparação com a argamassa de referência, porém a maior queda foi na incorporação de 10% e 20% de PCM na argamassa, chegando a uma redução de 21% e 30%, respectivamente.

Este comportamento, conforme descrito anteriormente, pode ser associado ao aumento da quantidade de líquido nas argamassas, que provoca uma maior porosidade e consequente diminuição da resistência à flexão, o que pode ser comprovado pelos comportamentos descritos em 5.2.1 e 5.2.2.

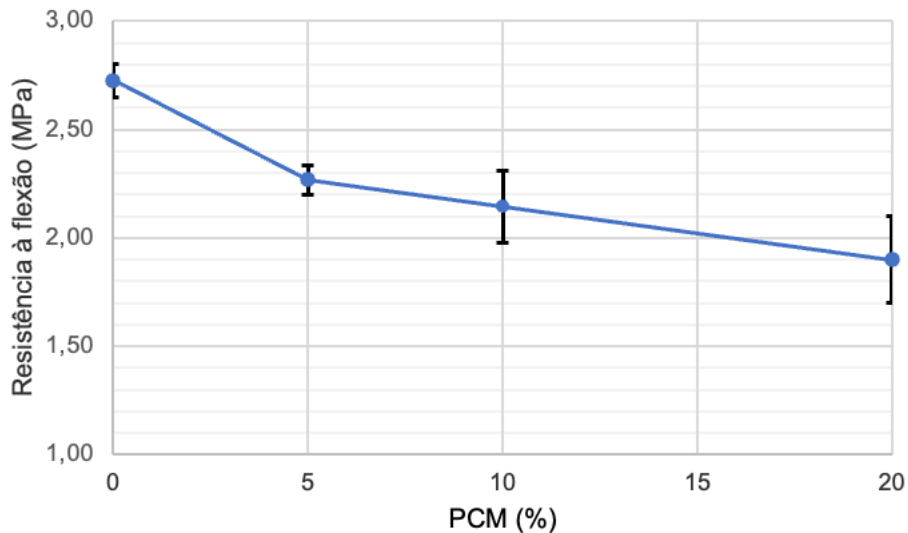


Figura 42 - Resistência à flexão das placas.

Capítulo 6

Conclusão

6. CONCLUSÃO

6.1 Considerações finais

A realização deste trabalho permitiu concluir que é possível desenvolver placas à base de cimento com incorporação de PCM para revestimento interior. A incorporação de PCM alterou os comportamentos físicos e mecânicos das placas, contudo não impedem a sua aplicação prática.

Através de pesquisa de mercado, estudo de normas e disponibilidade de moldes definiu-se como ideal a produção de placas com formato retangular e dimensões de 200x100x20mm³. Foram produzidas placas sem PCM e com 5%, 10% e 20% de teor de incorporação de PCM, tendo sido desenvolvido um estudo das suas propriedades físicas e mecânicas. Este estudo foi realizado para o material em si, ou seja, na própria argamassa, mas também no produto desenvolvido, ou seja, nas placas.

No que diz respeito à trabalhabilidade das argamassas que constituem as placas concluiu-se que o intervalo de temperatura da água para a obtenção da trabalhabilidade ideal encontra-se compreendido entre 22°C e 26°C, no qual o diâmetro de espalhamento aumentou com o acréscimo da temperatura da água devido à sensibilidade do PCM com as mudanças de temperatura. Este aumento tornou o PCM mais viscoso e conseqüentemente aumentou a trabalhabilidade da argamassa.

A relação água/ligante diminuiu com o aumento do teor de PCM sendo justificado pelo fato do PCM ser adicionado na forma líquida, contribuindo para uma maior trabalhabilidade da argamassa. Outro comportamento observado foi o aumento da razão líquido/ligante nas argamassas conforme o aumento do teor de incorporação de PCM devido ao fato do PCM ser incorporado na forma líquida.

Verificou-se que a resistência à flexão e a resistência à compressão diminuíram com o aumento do teor de PCM nas argamassas. Este comportamento encontra-se relacionado com o aumento da quantidade de líquido nas argamassas (relação líquido/ligante) que provocou um aumento da porosidade e conseqüentemente uma diminuição das suas resistências mecânicas.

Através do ensaio de massa volúmica real e aparente e porosidade total e aberta foi possível analisar

diversas propriedades. Com relação ao volume de poros abertos, este aumentou com o acréscimo de PCM na composição, sendo justificado pelo aumento da superfície exposta que permitiu uma maior evaporação de água durante o processo de cura e também pela tendência do PCM em se deslocar para a superfície, sendo este efeito denominado de “efeito placa”. Já com relação ao volume aparente pode concluir-se que o mesmo não teve interferências com o aumento da incorporação de PCM nas diferentes composições desenvolvidas.

A massa volúmica aparente diminuiu com o aumento do teor de PCM sendo justificado pelo aumento no volume de poros abertos e pela massa volúmica do PCM ser inferior à da areia e da água. Já a porosidade aberta aumentou com a incorporação de PCM também devido ao aumento do volume de poros abertos e pelo “efeito placa” descrito anteriormente.

Com relação à massa volúmica real, não houve alteração significativa. Já a porosidade total aumentou com a incorporação de PCM nas composições sendo justificada pela maior relação líquido/ligante e pela maior facilidade de evaporação da água devido à maior superfície exposta das placas, relacionada com a sua geometria.

No ensaio de absorção de água à pressão atmosférica observou-se uma ligeira tendência de aumento de absorção com a incorporação de maiores teores de PCM sendo o comportamento atribuído ao aumento da razão líquido/ligante e o aumento do volume de poros e conseqüente aumento da porosidade.

No ensaio de absorção de água por capilaridade observou-se que o coeficiente de absorção capilar foi praticamente o mesmo para as composições, com ligeiro aumento na composição de 20% de PCM. Sendo assim, concluiu-se que a velocidade de absorção de água das composições foi similar. Já com relação a quantidade de água absorvida por capilaridade concluiu-se que a quantidade foi menor nas composições com PCM em comparação com a composição de referência, este comportamento foi atribuído à presença de PCM nos poros impedindo a absorção capilar.

E por fim, com relação a resistência à flexão das placas concluiu-se que a resistência diminuiu com o aumento do teor de PCM nas composições. Este comportamento, conforme descrito anteriormente, foi associado ao aumento da quantidade de líquido nas argamassas, que provocou uma maior porosidade

e conseqüente diminuição da resistência.

Visto que os resultados apresentados foram satisfatórios, a produção de placas à base de cimento com incorporação de PCM é uma alternativa interessante para ser introduzida no mercado da construção civil. Vale ressaltar a necessidade da indústria da construção deixar de ser tradicionalmente conservadora e começar a utilizar soluções mais inovadoras, como é o caso das soluções sustentáveis que são adaptadas ao meio ambiente e às exigências dos seus utilizadores.

6.2 Trabalhos futuros

O estudo realizado apresentou bons resultados e concluiu que é possível desenvolver placas à base de cimento com incorporação de PCM para revestimento interior, no entanto, outros estudos podem ser realizados para dar continuidade e complementar a pesquisa e também aprofundar o conhecimento da temática.

Os seguintes aspectos são sugeridos para serem desenvolvidos em trabalhos futuros:

- Estudar a aderência das placas à base de cimento com incorporação de PCM.
- Estudar as propriedades físicas e mecânicas das placas com diferentes dimensões e o possível efeito escala.
- Estudar o comportamento térmico das placas à base de cimento com incorporação de PCM.
- Desenvolver placas à base de outros ligantes (cal aérea ou cal hidráulica) para diversificar o uso e comparar as propriedades.
- Realizar um estudo econômico das placas à base de cimento com incorporação de PCM.

Capítulo 7

Referências Bibliográficas

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Bruntland, "Our Common Future," Oxford University Press, Oxford, 1987. [Online]. Available: <https://ambiente.wordpress.com/2011/03/22/relatrio-brundtland-a-verso-original/>.
- [2] S. Torgal, F.; Jalali, *A Sustentabilidade dos Materiais de Construção*, 2nd ed. Guimarães, 2010.
- [3] R. Mateus, "Avaliação da construção sustentável : propostas para o desenvolvimento de edifícios mais sustentáveis," Universidade do Minho, 2009.
- [4] L. Mateus, R.; Bragança, *Tecnologias construtivas para a sustentabilidade da construção*, 1st ed. Porto, 2006.
- [5] C. Kibert, "Establishing the principles and model for sustainable construction," in *In Proceedings of the 1st International Conference of CIB TG 16*, 1994, pp. 1–9.
- [6] C. Kibert, *Sustainable Construction: green building design and delivery*, 4th ed. New Jersey, EUA: John Wiley & Sons Inc., 2016.
- [7] S. Cunha, J. Aguiar, V. Ferreira, and A. Tadeu, "Argamassas com incorporação de Materiais de Mudança de Fase (PCM): Caracterização física, mecânica e durabilidade," *Rev. Mater.*, vol. 20, no. 1, pp. 245–261, 2015, doi: 10.1590/S1517-707620150001.0025.
- [8] S. Cunha, "Desenvolvimento e Caraterização de Argamassas com Incorporação de Materiais de Mudança de Fase," Universidade do Minho, 2018.
- [9] S. Cunha, V. Alves, J. Aguiar, and V. Ferreira, "Argamassas Térmicas Sustentáveis: O Contributo dos Materiais de Mudança de Fase," *4º Congr. Port. Argamassas e ETICS*, p. CD, 2012, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/1822/21737>.
- [10] S. Cunha and B. J. Aguiar, *Eficiência Energética dos Edifícios: contributo dos materiais de mudança de fase*, 1ª Edição. 2021.
- [11] S. Cunha, M. Silva, and J. Aguiar, "Behavior of cementitious mortars with direct incorporation of non-encapsulated phase change material after severe temperature exposure," *Constr. Build. Mater.*, vol. 230, p. 117011, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117011.
- [12] B. Berge, *The ecology of building materials*, 2nd ed., vol. 1. Oxford, UK: Architectural Press, Elsevier, 2009.
- [13] J. K. Yates and D. Castro-Lacouture, *Sustainability in Engineering Design and Construction*, 1st ed. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016.
- [14] S. Torgal, F.; Jalali, "Considerações sobre a Sustentabilidade dos Materiais de Construção," *C.*

- Mater.*, p. 2010, 2010.
- [15] M. G. Patterson, "What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues," *Energy Policy*, vol. 24, no. 5, pp. 377–390, 1996, doi: 10.1016/0301-4215(96)00017-1.
- [16] IEA, "Electricity generation by source, World 1990-2018," 2018. <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy supply&indicator=ElecGenByFuel> (accessed Feb. 17, 2021).
- [17] IEA, "Electricity final consumption by sector, World 1990-2018," 2018. <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy consumption&indicator=ElecConsBySector> (accessed Feb. 17, 2021).
- [18] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout, "A review on buildings energy consumption information," *Energy Build.*, vol. 40, no. 3, pp. 394–398, 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007.
- [19] IEA, "Energy efficiency indicators," France, 2020. doi: 10.1787/9789264268692-en.
- [20] Porto: Porto Editora, "Porto Editora – argamassa na Infopédia." [https://www.infopedia.pt/\\$argamassa](https://www.infopedia.pt/$argamassa) (accessed Jul. 20, 2021).
- [21] EN, "EN 998-1: Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar Définitions," *CEN (Comité Eur. Norm.*, pp. 1–23, 2010.
- [22] G. Cichinell, "Parede ou Vedação," *Revista Techne - Pini*, São Paulo, pp. 52–57, 2007.
- [23] J. A. Speck, "Análise do desempenho de placas cimentícias através da adição de fibras e telas, visando a redução de deformações térmicas e patologias," 2014.
- [24] Ivanka, "Ivanka Panel Catalogue," 2021. <https://pdf.archiexpo.com/pt/pdf-en/ivanka/ivanka-panel-catalogue/89100-211133.html> (accessed Sep. 01, 2021).
- [25] Rerthy, "Catálogo," 2021. <https://rerthy.com.br/pdf/catalogo.pdf> (accessed Sep. 01, 2021).
- [26] Investwood, "Aplicações Viroc," 2021. <https://www.investwood.pt/viroc/#aplicacoes> (accessed Sep. 01, 2021).
- [27] S. S. Magendran *et al.*, "Synthesis of organic phase change materials (PCM) for energy storage applications: A review," *Nano-Structures and Nano-Objects*, vol. 20, p. 100399, 2019, doi: 10.1016/j.nanoso.2019.100399.
- [28] M. Zhang, M. A. Medina, and J. B. King, "Development of a thermally enhanced frame wall with phase-change materials for on-peak air conditioning demand reduction and energy savings in residential buildings," *Int. J. Energy Res.*, vol. 29, no. 9, pp. 795–809, 2005, doi: 10.1002/er.1082.

- [29] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 2, pp. 318–345, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2007.10.005.
- [30] A. Gil *et al.*, "State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1-Concepts, materials and modellization," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 31–55, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.07.035.
- [31] A. De Gracia and L. F. Cabeza, "Phase change materials and thermal energy storage for buildings," *Energy Build.*, vol. 103, pp. 414–419, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.06.007.
- [32] F. Kuznik and J. Virgone, "Experimental assessment of a phase change material for wall building use," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 10, pp. 2038–2046, 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.01.004.
- [33] M. Kenisarin and K. Mahkamov, "Solar energy storage using phase change materials," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, no. 9, pp. 1913–1965, 2007, doi: 10.1016/j.rser.2006.05.005.
- [34] D. W. Hawes, D. Feldman, and D. Banu, "Latent heat storage in building materials," *Energy Build.*, vol. 20, no. 1, pp. 77–86, 1993, doi: 10.1016/0378-7788(93)90040-2.
- [35] M. Martin, A. Villalba, A. Inés Fernández, and C. Barreneche, "Development of new nano-enhanced phase change materials (NEPCM) to improve energy efficiency in buildings: Lab-scale characterization," *Energy Build.*, vol. 192, pp. 75–83, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.03.029.
- [36] M. Saffari, A. de Gracia, C. Fernández, and L. F. Cabeza, "Simulation-based optimization of PCM melting temperature to improve the energy performance in buildings," *Appl. Energy*, vol. 202, pp. 420–434, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.107.
- [37] ASHRAE, "ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy," *ASHRAE*, 2013. https://ashrae.iwrapper.com/ViewOnline/Standard_55-2013.
- [38] T. e C. Ministério das Obras Públicas, *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, Decreto-Lei n. 80/2006*. 2006, pp. 2468–2513.
- [39] Y. P. Zhang, K. P. Lin, R. Yang, H. F. Di, and Y. Jiang, "Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings," *Energy Build.*, vol. 38, no. 10, pp. 1262–1269, 2006, doi: 10.1016/j.enbuild.2006.02.009.
- [40] D. Zhou, C. Y. Zhao, and Y. Tian, "Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications," *Appl. Energy*, vol. 92, pp. 593–605, 2012, doi:

- 10.1016/j.apenergy.2011.08.025.
- [41] B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza, and H. Mehling, "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, pp. 251–283, 2003, doi: 10.1017/jfm.2012.219.
- [42] A. Waqas and Z. Ud Din, "Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings - A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 18, pp. 607–625, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.10.034.
- [43] S. S. Chandel and T. Agarwal, "Review of current state of research on energy storage, toxicity, health hazards and commercialization of phase changing materials," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 581–596, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.070.
- [44] H. Akeiber *et al.*, "A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 1470–1497, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.03.036.
- [45] A. F. Regin, S. C. Solanki, and J. S. Saini, "Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 9, pp. 2438–2458, 2008, doi: 10.1016/j.rser.2007.06.009.
- [46] D. Hawes, D.W.; Banu, D.; Feldman, "Latent Heat Storage in Concrete," *Sol. Energy Mater.*, vol. 19, pp. 335–348, 1989.
- [47] P. B. Salunkhe and P. S. Shembekar, "A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 8, pp. 5603–5616, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.05.037.
- [48] V. V. Tyagi, S. C. Kaushik, S. K. Tyagi, and T. Akiyama, "Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 2, pp. 1373–1391, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.10.006.
- [49] X. Huang, C. Zhu, Y. Lin, and G. Fang, "Thermal properties and applications of microencapsulated PCM for thermal energy storage: A review," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 147, no. August 2018, pp. 841–855, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.11.007.
- [50] A. Jamekhorshid, S. M. Sadrameli, and M. Farid, "A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 531–542, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.12.033.
- [51] L. F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. De Gracia, and A. I. Fernández, "Materials used as

- PCM in thermal energy storage in buildings: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 3, pp. 1675–1695, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.018.
- [52] P. K. S. Rathore and S. K. Shukla, "Potential of macroencapsulated pcm for thermal energy storage in buildings: A comprehensive review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 225, pp. 723–744, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.221.
- [53] S. A. Memon, "Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 870–906, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.12.042.
- [54] A. Kasaeian, L. bahrami, F. Pourfayaz, E. Khodabandeh, and W. M. Yan, "Experimental studies on the applications of PCMs and nano-PCMs in buildings: A critical review," *Energy Build.*, vol. 154, pp. 96–112, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.08.037.
- [55] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez, and L. F. Cabeza, "Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling," *Energy Build.*, vol. 42, no. 4, pp. 534–540, 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.10.022.
- [56] K. A. R. Ismail and J. N. C. Castro, "PCM thermal insulation in buildings," *Int. J. Energy Res.*, vol. 21, no. 14, pp. 1281–1296, 1997, doi: 10.1002/(SICI)1099-114X(199711)21:14<1281::AID-ER322>3.0.CO;2-P.
- [57] L. F. Cabeza *et al.*, "Behaviour of a concrete wall containing micro-encapsulated PCM after a decade of its construction," *Sol. Energy*, vol. 200, no. October, pp. 108–113, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2019.12.003.
- [58] A. Mourid, M. El Alami, and F. Kuznik, "Experimental investigation on thermal behavior and reduction of energy consumption in a real scale building by using phase change materials on its envelope," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 41, no. March, pp. 35–43, 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.04.031.
- [59] C. Li *et al.*, "Experimental thermal performance of wallboard with hybrid microencapsulated phase change materials for building application," *J. Build. Eng.*, vol. 28, no. June 2019, p. 101051, 2020, doi: 10.1016/j.job.2019.101051.
- [60] A. D'Alessandro, A. L. Pisello, C. Fabiani, F. Ubertini, L. F. Cabeza, and F. Cotana, "Multifunctional smart concretes with novel phase change materials: Mechanical and thermo-energy investigation," *Appl. Energy*, vol. 212, no. January, pp. 1448–1461, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.01.014.
- [61] M. J. Abden, Z. Tao, Z. Pan, L. George, and R. Wuhrer, "Inclusion of methyl stearate/diatomite

- composite in gypsum board ceiling for building energy conservation,” *Appl. Energy*, vol. 259, no. October, p. 114113, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114113.
- [62] Y. Zhang, J. Huang, X. Fang, Z. Ling, and Z. Zhang, “Optimal roof structure with multilayer cooling function materials for building energy saving,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 44, no. 3, pp. 1594–1606, 2020, doi: 10.1002/er.4969.
- [63] X. Jin and X. Zhang, “Thermal analysis of a double layer phase change material floor,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 10, pp. 1576–1581, 2011, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.01.023.
- [64] B. González and M. M. Prieto, “Radiant heating floors with PCM bands for thermal energy storage: A numerical analysis,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 162, no. January 2020, 2021, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106803.
- [65] Y. Hu, P. K. Heiselberg, and R. Guo, “Ventilation cooling/heating performance of a PCM enhanced ventilated window - an experimental study,” *Energy Build.*, vol. 214, p. 109903, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109903.
- [66] M. F. Luther *et al.*, “Thermal performance of a double-glazed window integrated with a phase change material (PCM),” *Mater. Today Proc.*, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.09.099.
- [67] M. D. M. da Silva, “Comportamento de argamassas com incorporação de material de mudança de fase não encapsulado submetidas a condições extremas,” Universidade do Minho, 2018.
- [68] SECIL, “Ficha de Produto - Maestro Cimento CEM II/B-L 32,5N. Cimento Portland de Calcário,” 2018. <https://secilpro.com/upload/documents/5b0d30fd1dd39.pdf> (accessed Mar. 25, 2020).
- [69] BSI, “BS EN 1015-3: Methods of Test for Mortar for Masonry - Determination of Consistence of Fresh Mortar,” *Br. Stand. Inst.*, vol. 3, no. 1, 1999.
- [70] BSI, “BS EN 1015-11: Methods of Test for Mortar for Masonry - Determination of Flexural and Compressive Strength of Hardened Mortar,” *Br. Stand. Inst.*, vol. 11, no. 1, 1999.
- [71] IPQ, “NP EN 1469: Produtos em Pedra Natural - Placas para revestimento de Paredes,” *Inst. Port. Qual.*, vol. 1, no. 1, 2015.
- [72] IPQ, “NP EN 1936: Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta,” *Inst. Port. Qual.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–13, 2008.
- [73] IPQ, “NP EN 13755: Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da absorção de água à pressão atmosférica,” *Inst. Port. Qual.*, vol. 1, no. 1, 2008.
- [74] IPQ, “NP EN 1925: Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do coeficiente de

absorção de água por capilaridade,” *Inst. Port. Qual.*, vol. 1, no. 1, 2000.

- [75] IPQ, “NP EN 12372: Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à flexão sob carga centrada,” *Inst. Port. Qual.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–17, 2008.

ANEXOS

Tabela A1 - Relação da temperatura da água com o espalhamento das argamassas.

Temperatura da água (°C)	Diâmetro (cm)		
	5% PCM	10% PCM	20%PCM
22	17,70	17,70	17,65
23	17,72	17,98	17,70
24	17,73	18,25	17,75
25	17,75	18,38	17,80
26	18,13	18,51	18,33
27	18,50	18,65	18,85

Tabela A2 - Relação Água/Ligante (W/L) e Relação Líquido/Ligante (L/L) das argamassas.

Composição	PCM (%)	W/L	L/L
C0PCM	0	0,56	0,56
C5PCM	5	0,55	0,67
C10PCM	10	0,52	0,73
C20PCM	20	0,48	0,82

Tabela A3 - Resistência à flexão das argamassas.

Composição	PCM (%)	Rf (N/mm²)
C0PCM	0	3,36 ± 0,18
C5PCM	5	2,47 ± 0,06
C10PCM	10	2,07 ± 0,10
C20PCM	20	1,50 ± 0,18

Tabela A4 - Volume de poros abertos e volume aparente.

Composição	PCM (%)	Volume de poros abertos (mL)	Volume aparente (mL)
C0PCM	0	50,03 ± 3,15	235,95 ± 8,13
C5PCM	5	65,16 ± 1,91	237,66 ± 9,31
C10PCM	10	70,44 ± 3,07	245,19 ± 4,62
C20PCM	20	71,72 ± 2,36	248,43 ± 8,23

Tabela A5 - Massa volúmica aparente e porosidade aberta.

Composição	PCM (%)	Massa volúmica aparente (kg/m³)	Porosidade aberta (%)
C0PCM	0	1985,28 ± 5,45	22,62 ± 0,11
C5PCM	5	1763,93 ± 7,77	27,92 ± 0,17
C10PCM	10	1698,44 ± 43,14	28,66 ± 1,01
C20PCM	20	1626,28 ± 26,83	30,70 ± 1,13

Tabela A6 - Massa volúmica real e porosidade total.

Composição	PCM (%)	Massa volúmica real (kg/m³)	Porosidade total (%)
C0PCM	0	2294,78 ± 15,04	13,58 ± 0,56
C5PCM	5	2203,92 ± 3,76	20,10 ± 0,34
C10PCM	10	2183,47 ± 5,65	22,38 ± 1,31
C20PCM	20	2158,90 ± 27,98	23,97 ± 0,74

Tabela A7 - Absorção de água à pressão atmosférica das placas.

Composição	PCM (%)	Ab (%)
C0PCM	0	11,48 ± 0,29
C5PCM	5	11,80 ± 0,17
C10PCM	10	12,26 ± 0,24
C20PCM	20	13,90 ± 0,56

Tabela A8 - Resistência à flexão das placas.

Composição	PCM (%)	Rf (N/mm²)
C0PCM	0	2,73 ± 0,08
C5PCM	5	2,27 ± 0,07
C10PCM	10	2,15 ± 0,17
C20PCM	20	1,90 ± 0,20