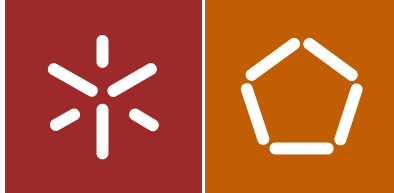


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Zhiyou Jia

BETÃO TÉRMICO COM AGREGADOS
RECICLADOS

Zhiyou Jia BETÃO TÉRMICO COM AGREGADOS RECICLADOS



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Zhiyou Jia

BETÃO TÉRMICO COM AGREGADOS RECICLADOS

Tese de Doutoramento
Doutoramento em Engenharia Civil

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

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos. Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



**Atribuição
CC BY**

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

AGRADECIMENTOS

À medida que o meu doutoramento chega ao fim, gostaria de aproveitar esta oportunidade para expressar o meu sincero agradecimento a todos que me ajudaram e apoiaram ao longo desta jornada.

Em primeiro lugar, agradeço à minha família pelo amor incondicional, paciência e apoio inestimável. Foi graças a vocês que pude focar-me inteiramente na investigação, sem preocupações externas. O vosso incentivo constante e compreensão foram fundamentais para que eu superasse cada obstáculo com determinação. Em especial, à minha esposa, que esteve sempre ao meu lado, oferecendo-me força, motivação e encorajamento nos momentos mais difíceis. O teu apoio e compreensão foram essenciais para que eu mantivesse a perseverança e a confiança ao longo desta jornada exigente.

Aos meus orientadores, Professor José Barroso de Aguiar e Professora Sandra Cunha, o meu mais sincero reconhecimento. Professor Aguiar, a sua orientação rigorosa, dedicação incansável e visão académica foram cruciais para o meu crescimento como investigador. A sua experiência e aconselhamento ajudaram-me a superar desafios e a desenvolver uma abordagem científica mais só lida e madura. Professora Sandra, sou imensamente grato pelo seu apoio contínuo, pelas suas sugestões valiosas e pelo incentivo constante, que contribuíram significativamente para a qualidade do meu trabalho. Além disso, a sua presença no meu casamento, como testemunha desse momento tão especial, representa para mim um gesto de amizade e consideração que jamais esquecerei.

Agradeço também à Universidade do Minho pelo ambiente académico e pelas infraestruturas laboratoriais fundamentais para a realização desta investigação. O meu reconhecimento estende-se igualmente ao Sr. Carlos Jesus pelo seu apoio técnico e disponibilidade, que foram indispensáveis para o sucesso dos meus experimentos.

Igualmente, expresso a minha gratidão à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) pelo apoio financeiro. Graças a esta bolsa, pude dedicar-me integralmente à pesquisa, sem preocupações económicas, o que foi essencial para a conclusão do meu doutoramento e para a consolidação do meu percurso académico.

Por fim, um agradecimento especial a todos os colegas, amigos e profissionais que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta jornada. No futuro, comprometo-me a aplicar o conhecimento adquirido em prol do desenvolvimento da sociedade, retribuindo, assim, todo o apoio que recebi ao longo deste percurso

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

Com o acelerado processo de urbanização, a quantidade de resíduos de construção tem aumentado anualmente, resultando em pressões ecológicas e ambientais significativas. Ao mesmo tempo, o rápido desenvolvimento econômico global e o aumento da demanda por energia durante a operação dos edifícios entram em conflito com a limitada reserva de recursos fósseis e os crescentes problemas ambientais. Para enfrentar esses desafios, este estudo propõe uma solução inovadora que combina materiais de mudança de fase (PCM) com agregados reciclados (AR) para o betão, visando otimizar suas propriedades de durabilidade, melhorar a eficiência térmica e reduzir a dependência de energias não renováveis. Inicialmente, foi estabelecido um procedimento de combinação entre PCM e AR para produzir agregados reciclados funcionalizados (ARPP). Foram preparados 9 tipos de betão com diferentes proporções (25%, 50%, 75% e 100%) de agregados reciclados e agregados reciclados funcionalizados, e os efeitos sobre as propriedades físicas, mecânicas, de durabilidade e comportamento térmico dos betões foram analisados. Para otimizar ainda mais o desempenho térmico, foram adicionados 7.5% e 15% de PCM livre às misturas de betão com 75% e 100% de ARPP, resultando em 4 novos conjuntos de amostras, cujas propriedades físicas, mecânicas, durabilidade e comportamento térmico foram também avaliadas. Os resultados experimentais indicaram que o betão com 100% de ARPP apresentou as melhores performances em termos de durabilidade e propriedades térmicas, especialmente com relação à resistência à corrosão por dióxido de carbono e ciclos de congelamento-descongelamento. Contudo, a adição de PCM livre resultou na perda de eficiência de armazenamento de calor, uma vez que o PCM não teve espaço suficiente durante a transição de fase para absorver calor adequadamente. Portanto, o design adequado da quantidade de PCM e AR no betão é crucial para otimizar seu desempenho global.

Palavra-chave: agregado reciclado, betão sustentabilidade, material de mudança de fase, propriedades de betões.

ABSTRACT

With the rapid urbanization process, the amount of construction waste has been increasing annually, leading to significant ecological and environmental pressures. At the same time, the rapid global economic development and increased demand for energy during the operation of buildings are in conflict with the limited reserves of fossil resources and the growing environmental issues. To address these challenges, this study proposes an innovative solution that combines phase change materials (PCM) with recycled aggregates (AR) in concrete to optimize its durability properties, enhance thermal efficiency, and reduce dependence on non-renewable energy sources. Initially, a combination method for PCM and AR was established to produce functionalized recycled aggregates (ARPP). Nine types of concrete with different proportions (25%, 50%, 75%, and 100%) of recycled aggregates and functionalized recycled aggregates were prepared, and their effects on the physical, mechanical, durability, and thermal behavior properties of the concrete were analyzed. To further optimize the thermal performance, 7.5% and 15% free PCM were added to the 75% and 100% ARPP concrete, resulting in four new sets of samples, whose physical properties, mechanical properties, durability, and thermal behavior were also evaluated. Experimental results showed that the concrete with 100% ARPP exhibited the best performance in terms of durability and thermal properties, especially with respect to resistance to carbon dioxide corrosion and freeze-thaw cycles. However, the addition of free PCM resulted in a loss of heat storage efficiency, as PCM did not have enough space during the phase transition to absorb heat adequately. Therefore, the proper design of the PCM and AR content in the concrete is crucial for optimizing its overall performance.

Keyword: Recycled aggregate, sustainable concrete, phase change materials, proprieties of concrete.

ÍNDICE

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS.....	xvi
1. Introdução	1
1.1. DESAFIOS GLOBAIS AMBIENTAIS E DE RECURSOS	2
1.2. Motivação	3
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.4. ADEQUAÇÃO DOS OBJETIVOS COM A AGENDA 2030	5
2. Materiais de mudança de fase	7
2.1. INTRODUÇÃO.....	8
2.2. TECNOLOGIA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	9
2.3. ARMAZENAMENTO TÉRMICO.....	10
2.4. PROPRIEDADES DOS PCM.....	14
2.5. CLASSIFICAÇÃO DOS PCM	17
2.5.1. PCM orgânico	18
2.5.2. PCM inorgânicos.....	20
2.5.3. Misturas eutéticas.....	22
2.6. DESAFIOS DA APLICAÇÃO DE PCM.....	24
2.6.1. Super-arrefecimento.....	24
2.6.2. Separação de fase	26
2.6.3. Vazamento de PCM.....	27
2.7. TÉCNICAS DE INCORPORAÇÃO DE PCM	28
2.7.1. Incorporação direta	28
2.7.2. Imersão	30
2.7.3. Encapsulamento	31
2.7.4. Estabilização.....	33
2.8. PCM APLICADO EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	34
2.8.1. Argamassas	35

2.8.2. Betão.....	37
2.8.3. Placas de gesso cartonado.....	38
2.8.4. Tijolos e Blocos.....	39
3. Resíduos de Construção e Demolição	40
3.1. INTRODUÇÃO.....	41
3.2. RECICLAGEM RCD	43
3.2.1. Reciclagem RCD móveis	43
3.2.2. Reciclagem RCD fixas	45
3.3. AGREGADO RECICLADO.....	48
3.3.1. Propriedades do Agregado Reciclado.....	48
3.3.1.1 Forma e Distribuição do Agregado Reciclado.....	48
3.3.1.2 Massa volúmica e absorção de água do Agregado Reciclado	49
3.3.2. Aplicação de Agregado Reciclado no betão	52
3.3.2.1 Propriedades físicas do betão com Agregado Reciclado.....	56
3.3.2.2 Propriedades mecânicas do betão com Agregado Reciclado	58
3.3.2.3 Durabilidade do betão com Agregado Reciclado	61
4. Procedimentos de ensaio.....	65
4.1. METODOLOGIA.....	66
4.2. CARACTERIZAÇÃO DE MATÉRIAS-PRIMAS.....	67
4.2.1. Massa volúmica	67
4.2.2. Determinação da granulometria	68
4.3. PROPRIEDADES FÍSICAS DOS BETÕES	69
4.3.1. Abaixamento.....	69
4.3.2. Massa volúmica	71
4.3.3. Absorção de água por imersão	71
4.3.4. Absorção de água por capilaridade.....	72
4.3.5. Microestrutura dos betões.....	74
4.3.6. Análise termogravimétrica	74
4.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS BETÕES	74
4.4.1. Resistência à compressão.....	74
4.4.2. Resistência à flexão.....	75

4.5. DURABILIDADE DOS BETÕES.....	76
4.5.1. Migração de cloretos em regime não estacionário (CTH)	76
4.5.2. Gelo – degelo.....	78
4.5.3. Sulfato de magnésio.....	80
4.5.4. Carbonatação	82
4.6. DESEMPENHO TÉRMICAS DOS BETÕES.....	83
5. Materiais e Formulação do Betão	85
5.1. INTRODUÇÃO	86
5.2. MATERIAIS UTILIZADOS	86
5.2.1. Cimento.....	86
5.2.2. Areia natural	88
5.2.3. Brita	89
5.2.4. Agregado reciclado.....	90
5.2.5. Material de Mudança de Fase (PCM)	93
5.3. Preparação de ARPP	95
5.4. Formulação de betões.....	99
5.4.1. Metodologia Faury.....	99
6. Betão com agregado reciclado aditivado com PCM	102
6.1. Composições de betões	103
6.2. Comportamento físico	103
6.2.1. Água de amassadura	103
6.2.2. Microestrutura	104
6.2.3. Análise termogravimétrica	106
6.2.4. Massa volúmica	110
6.2.5. Absorção de água por imersão	111
6.2.6. Absorção de água por capilaridade	112
6.3. Comportamento mecânico	115
6.3.1. Resistência à compressão	115
6.3.2. Resistência à flexão.....	117
6.4. Durabilidade	118
6.4.1. Migração de cloretos em regime não estacionário (CTH)	118

6.4.2. Gelo-degelo	119
6.4.3. Sulfato de magnésio	122
6.4.4. Carbonatação	123
6.5. Desempenho a elevadas temperaturas	126
6.6. Comportamento térmico	128
6.6.1. Estação de Primavera	129
6.6.2. Estação de Verão	138
6.6.3. Estação de Outono.....	141
6.6.4. Estação de Inverno	144
6.6.5. Análise de custo.....	145
7. Betão com agregado reciclado aditivado com PCM e PCM livre	149
7.1. Composições de betões	150
7.2. Comportamento físico	150
7.2.1. Abaixamento do betão fresco	150
7.2.2. Massa volúmica	151
7.2.3. Absorção de água por imersão	152
7.2.4. Microestrutura	153
7.3. Comportamento mecânico	154
7.3.1. Resistência à compressão.....	154
7.3.2. Resistência à flexão.....	155
7.4. Durabilidade	157
7.4.1. Migração de cloretos por migração em regime não estacionário (CTH).....	157
7.4.2. Gelo-degelo.....	158
7.4.3. Sulfato de magnésio	161
7.4.4. Carbonatação	163
7.5. Comportamento térmico	163
7.5.1. Estação de Primavera	164
7.5.2. Estação de verão	167
7.5.3. Estação de outono	171
7.5.4. Estação de inverno.....	175
7.5.5. Análise de custo.....	177

8. Conclusão.....	179
8.1. Considerações finais	180
8.2. Trabalhos futuros	184
9. Referências bibliográficas	185

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tipos de armazenamento de energia.	9
Figura 2.2 - Classificação dos materiais de armazenamento térmico e PCM [37].	11
Figura 2.3 - Diferentes tipos de armazenamento de [39,41].	12
Figura 2.4 - Percentagem de cada tipo de PCM utilizado no estudo [23].	17
Figura 2.5 - Diagrama esquemático da transição de fase física [62].	18
Figura 2.6 - Diagrama esquemático da transição de fase química [62].	21
Figura 2.7 - Atraso na mudança de fase (Super-arrefecimento) [62].	25
Figura 2.8 – Separação de fase [62].	27
Figura 2.9 – Estabilização FCM por Agregado reciclado.	34
Figura 3.1 – Estações móveis de reciclagem e processamento de RCD.	44
Figura 3.2 – Processo de reciclagem RCD fixas.	45
Figura 3.3 – Representação pictórica de AR no betão.	49
Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia de investigação.	66
Figura 4.2 – Ensaio de massa volúmica e absorção de água da areia.	67
Figura 4.3 – Processo de preparação da amostra para o ensaio de granulometria.	69
Figura 4.4 - Os equipamentos usados no ensaio de abaixamento (a) e Medição do valor (b).	70
Figura 4.5 - Pesagem do provete saturado imerso em água.	72
Figura 4.6 - Os provetes na caixa plástica.	73
Figura 4.7 - Ensaio de resistência à compressão.	75
Figura 4.8 - Ensaio à flexão de um provete de betão.	76
Figura 4.9 - Ensaio migração de cloretos com a indicação dos polos elétricos (+ e -) a conectar e a parte anódica e catódica das soluções.	77
Figura 4.10 - Ensaio de gelo-degelo em curso.	78
Figura 4.11 - A variação de temperatura real de um ciclo.	79

Figura 4.12 - Diagrama esquemático do ensaio de resistência do betão ao sulfato de magnésio.	81
Figura 4.13 – Caixa de testes.	84
Figura 4.14 - Configurações de temperatura que simulam quatro estações.....	84
Figura 5.1 – Areia natural 0-4 mm (a) e Granulometrias de areia natural (b).....	89
Figura 5.2 – A brita natural 4-10 mm (a) e Granulometrias de brita (b).....	90
Figura 5.3 – Granulometrias de agregado reciclado.....	91
Figura 5.4 – A proporção de cada material na massa total de AR.	92
Figura 5.5 – Carga de esmagamento das partículas de AR.	93
Figura 5.6 – O provete na câmara com 35 °C.	94
Figura 5.7 – Variação de volume da PP com o efeito da temperatura.	95
Figura 5.8 – Absorção de PCM pelo agregado reciclado: (a) sem vácuo; (b) com vácuo.	95
Figura 5.9 –Agregado reciclado aditivado com PCM (ARPP).....	96
Figura 5.10 – Microestrutura dos principais materiais de AR.	98
Figura 5.11 –Apresentação da curva de Faury para o betão referência.	99
Figura 5.12 – Processo de preparação das diferentes composições de betão.	101
Figura 5.13 – O processo de preparação de terceiras composições.....	101
Figura 6.1 – Água de amassadura.	104
Figura 6.2 – Microestrutura de betão com AR e betão com ARPP.	105
Figura 6.3 - Os resultados de TGA do betão referência, resultado de DTG (a) e resultado TGA (b).....	107
Figura 6.4 – Os resultados de TGA do betão100AR, resultado de DTG (a) e resultado TGA (b).	108
Figura 6.5 - Os resultados de TGA do betão com ARPP, DTG do 75ARPP (a), TGA do 75ARPP (b), DTG do 100ARPP (c) e TGA do 100ARPP (d).	109
Figura 6.6 - Massa volúmica das diferentes composições de betão.....	110
Figura 6.7 – Absorção de água por imersão das diferentes composições de betão.....	112
Figura 6.8 – Absorção de água por capilaridade das diferentes composições de betão.	113

Figura 6.9 – Resistência à compressão das diferentes composições de betão.	116
Figura 6.10 – Resistência à flexão das diferentes composições de betão.	117
Figura 6.11 – Coeficiente de migração de cloretos do betão.....	118
Figura 6.12 – Superfície dos provetes após os ensaios de gelo-degelo.	120
Figura 6.13 – Resistência à compressão do betão no início e após 100 ciclos de gelo-degelo.	121
Figura 6.14 – Variação de massa do betão após ataque por sulfato de magnésio.	122
Figura 6.15 – Profundidade de carbonatação com 180 dias dos betões.	124
Figura 6.16 – A profundidade de carbonatação do betão em diferentes períodos.....	125
Figura 6.17 – Resistência à compressão do betão com AR (a) e betão com ARPP (b) em temperatura de 20°C, 200°C, 400°C, 600°C.	127
Figura 6.18 – Comportamento térmico de primavera dos betões: a) REF, 75AR e 75ARPP; b) REF, 100AR e 100ARPP.....	129
Figura 6.19 – Temperatura simulação de primavera a) temperatura máxima; b) temperatura mínima.	130
Figura 6.20 – Gradiente térmico simulação de primavera.....	131
Figura 6.21 – Quantificação das necessidades de aquecimento e arrefecimento na estação de primavera (°C.h) - a) Betão referência; b) necessidades de aquecimento; c) necessidades de arrefecimento; d) necessidades de aquecimento.	133
Figura 6.22 – Quantificação das necessidades de aquecimento e arrefecimento na estação de primavera (K.h) - a) Betão de referência; b) necessidades de aquecimento; c) necessidades de arrefecimento; d) necessidades de aquecimento.	134
Figura 6.23 – Comportamento térmico de verão dos betões: a) REF, 75AR e 75ARPP; b) REF, 100AR e 100ARPP.	138
Figura 6.24 – Temperatura simulação de verão: a) temperatura máxima; b) temperatura mínima. ..	139
Figura 6.25 – Gradiente térmico simulação de verão.....	140
Figura 6.26 – Comportamento térmico de outono dos betões: a) REF, 75AR e 75ARPP; b) REF, 100AR e 100ARPP.....	142
Figura 6.27 – Temperatura simulação de outono: a) temperatura máxima; b) temperatura mínima.	143

Figura 6.28 – Gradiente térmico simulação de outono.....	143
Figura 6.29 – Comportamento térmico de inverno dos betões.....	145
Figura 7.1 - Abaixamento dos diferentes betões desenvolvidos.....	151
Figura 7.2 - Massa volúmica do betão.....	152
Figura 7.3 – Absorção de água por imersão do betão.....	153
Figura 7.4 – Microestrutura do betão, ampliação de 5000 vezes: (a) 75ARPP+15; (b) 100ARPP+15.	154
Figura 7.5 – Resistência à compressão do betão.....	155
Figura 7.6 – Resistência à flexão das diferentes composições de betão.	156
Figura 7.7 – Coeficiente de migração em estado não estacionário do betão.....	158
Figura 7.8 – As mostras do betão apos 30 e 90 ciclos de gelo-degelo.	159
Figura 7.9 – Variação do volume aparente do betão sob ensaio de gelo-degelo.....	160
Figura 7.10 – Resultados de resistência a sulfato de magnésio do betão.	161
Figura 7.11 – Amostras do betão após 120 dias de carbonatação.....	163
Figura 7.12 – Comportamento térmico de primavera dos betões.....	164
Figura 7.13 – Temperatura simulação de primavera a) temperatura máxima; b) temperatura mínima.	165
Figura 7.14 – Gradiente térmico simulação de primavera.....	166
Figura 7.15 – Comportamento térmico de verão dos betões.....	168
Figura 7.16 – Temperatura simulação de verão a) temperatura máximo; b) temperatura mínimo. ...	169
Figura 7.17 – Gradiente térmico simulação de verão.....	170
Figura 7.18 – Comportamento térmico de outono dos betões.....	171
Figura 7.19 – Temperatura simulação de outono a) temperatura máxima; b) temperatura mínima. .	172
Figura 7.20 – Gradiente térmico simulação de outono.....	173
Figura 7.21 – Comportamento térmico de inverno dos betões.....	176

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparação de três métodos de armazenamento de calor [27].	14
Tabela 2.2 – Critérios de seleção com base nas características do PCM [39,50].	16
Tabela 2.3 – Temperatura de transição e entalpia de parafinas [38,50].	19
Tabela 2.4 – PCM inorgânico [64,67].	21
Tabela 2.5 – Misturas eutéticas [77,78].	23
Tabela 3.1 – Comparação de dois métodos de reciclagem RCD.	46
Tabela 3.2 – Massa volúmica e absorção de água do AR em alguns estudos.	51
Tabela 3.3 – Alguns trabalhos sobre betão com AR.	53
Tabela 4.1 - Classes de abaixamento do betão.	70
Tabela 5.1 – Características de CEM I 42.5R [258].	87
Tabela 5.2 – As características do Material de Mudança de Fase [264].	94
Tabela 5.3 – Absorção de PCM pelo agregado reciclado (%).	97
Tabela 6.1 – Composição de betões com AR ou ARPP (kg/m ³).	103
Tabela 6.2 – Coeficiente de absorção de água por capilaridade dos betões (kg/(m ² ·min ^{0,5})).	115
Tabela 6.3 – Necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento para a estação de primavera.	137
Tabela 6.4 – Poupança energéticas por dia na estação de primavera.	137
Tabela 6.5 – Necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento para a estação de verão...	140
Tabela 6.6 – Poupanças energéticas por dia na estação de verão.	141
Tabela 6.7 – Necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento para a estação de outono.	143
Tabela 6.8 – Poupança energéticas por dia na estação de outono.	144
Tabela 6.9 – Poupança de climatização mensais (J/m ³).	146
Tabela 6.10 – Poupança de climatização mensais (kWh/m ³).	147
Tabela 6.11 – Poupança de climatização anuais (kWh/m ³).	147

Tabela 6.12 – Poupança monetária anual (€/m³).....	148
Tabela 7.1 – Composição de betões com ARPP e PP (kg/m³).....	150
Tabela 7.2 – Necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento para a estação de primavera.	167
Tabela 7.3 – Poupança energéticas por dia na estação de primavera.	167
Tabela 7.4 – Necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento para a estação de verão...	170
Tabela 7.5 – Poupança energéticas por dia na estação de verão.	171
Tabela 7.6 – Necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento para a estação de outono.	174
Tabela 7.7 – Poupança energéticas por dia na estação de outono.	175
Tabela 7.8 – Poupanças de climatização mensais (J/m³).	177
Tabela 7.9 – Poupanças de climatização mensais (kWh/m³).	177
Tabela 7.10 – Poupanças de climatização anual (kWh/m³).	177
Tabela 7.11 – Poupança monetária anual (€/m³).....	178

CAPÍTULO

1. INTRODUÇÃO

1.1. DESAFIOS GLOBAIS AMBIENTAIS E DE RECURSOS

Com o rápido crescimento da população mundial e o acelerado processo de urbanização, o consumo excessivo de recursos naturais e os problemas de poluição ambiental tornaram-se cada vez mais graves. A indústria da construção, como um setor intensivo em recursos, desempenha um papel importante no consumo global de recursos e na degradação ambiental. De acordo com o relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP), o setor da construção é responsável por 40% do consumo global de energia e gera cerca de 30% das emissões de gases de efeito estufa [1]. As atividades de construção consomem grandes quantidades de matérias-primas, como areia, brita e cimento, ameaçando a sustentabilidade dos recursos globais. Além disso, a quantidade de resíduos de construção e demolição (RCD) gerados a cada ano excede 3.8 bilhões de toneladas, e o acúmulo desses resíduos causa poluição ambiental e desperdício de recursos [2]. No contexto global de esforços para alcançar o desenvolvimento sustentável, a redução do consumo de recursos e do impacto ambiental da construção tornou-se uma questão urgente.

Para enfrentar esses desafios, a comunidade internacional estabeleceu metas de redução de emissões de carbono e aumento da eficiência energética. De acordo com o Acordo de Paris, é necessário limitar o aumento da temperatura global a 1.5°C até o final do século XXI, o que exige que setores, especialmente o da construção, adotem medidas mais agressivas de redução de emissões [3]. O setor da construção, devido à sua elevada emissão de carbono, tornou-se uma área-chave para a redução das emissões. Para atingir esse objetivo, a melhoria do desempenho térmico dos materiais de construção, o uso de materiais de baixo carbono e a promoção de tecnologias de eficiência energética tornaram-se tendências importantes no setor. Nesse contexto, o setor da construção precisa urgentemente de explorar novos materiais e tecnologias que possam reduzir a pegada de carbono, ao mesmo tempo que melhoram a eficiência energética geral dos edifícios.

Nesse cenário, os materiais de mudança de fase (em inglês é Phase change materials, PCMs), com sua capacidade de armazenar e liberar calor latente, têm se destacado como uma tecnologia importante para melhorar o desempenho térmico dos edifícios com o uso da energia solar. Os PCM podem absorver ou liberar grandes quantidades de calor latente durante a mudança de fase, regulando a temperatura interna e reduzindo o consumo de energia para aquecimento e arrefecimento de edifícios [4]. Estudos demonstram que a incorporação de PCM em materiais de construção pode melhorar significativamente o conforto térmico interno e reduzir drasticamente a demanda energética dos edifícios, especialmente em climas com grandes variações de temperatura [5].

Além disso, a utilização de agregados reciclados mostra um enorme potencial na redução dos impactos ambientais causados pelos resíduos de construção. A reciclagem de resíduos provenientes da demolição de edifícios não apenas diminui a demanda por novos recursos, como também reduz o acúmulo e a disposição inadequada de resíduos, minimizando a poluição ambiental [6]. No entanto, a aplicação de agregados reciclados em betão convencional ainda apresenta várias limitações em termos de desempenho, particularmente em resistência e durabilidade. Portanto, combinar agregados reciclados com materiais de mudança de fase, criando materiais compostos com excelente desempenho térmico e durabilidade, é uma direção importante para o desenvolvimento sustentável na construção civil.

Este estudo foca no betão com agregados reciclados e materiais de mudança de fase, investigando o seu potencial para melhorar o desempenho térmico e estrutural do betão. Ao incorporar materiais de mudança de fase, esta pesquisa busca não apenas otimizar a eficiência energética do betão com agregados reciclados, mas também fornecer ao setor da construção uma solução sustentável, de baixo carbono e altamente eficiente. Os resultados deste estudo contribuirão para a transformação verde dos materiais de construção e oferecerão suporte técnico para enfrentar os desafios globais de mudanças climáticas e escassez de recursos.

1.2. Motivação

Com o agravamento das mudanças climáticas globais e o aumento acelerado do consumo de recursos, a indústria da construção, caracterizada pelo uso intensivo de recursos e alto consumo de energia, tornou-se uma área chave para enfrentar os problemas ambientais e de recursos. No que diz respeito ao consumo global de energia e às emissões de carbono, a construção desempenha um papel significativo, especialmente no que se refere ao problema dos resíduos de construção e demolição (RCD) gerados durante as fases de construção e demolição, bem como ao consumo de energia durante a operação dos edifícios. Assim, encontrar maneiras de reduzir o consumo de recursos, aumentar a eficiência energética e diminuir a pegada de carbono, sem comprometer a qualidade e o conforto das construções, tornou-se um desafio urgente para a indústria da construção moderna.

Nesse contexto, em resposta ao problema dos RCD gerados nas fases de construção e demolição, a reciclagem e reutilização de RCD para o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias, como betão [7–9], argamassa [10–12] e blocos [7,13,14], assume uma importância prática considerável. Para mitigar o alto consumo de energia durante a operação dos edifícios, o uso de energia solar tem recebido crescente atenção, considerando que a energia que atinge a superfície da Terra a cada ano é cerca de

5×10^{24} J, o que representa 10000 vezes a demanda global de energia. Os PCMs, que são capazes de armazenar e liberar grandes quantidades de calor latente, demonstram um enorme potencial na otimização do desempenho térmico e na economia de energia nos edifícios, tornando-se assim um material intermediário promissor para a utilização da energia solar em construções. Além disso, os agregados reciclados (AR) de RCDs, por serem porosos, podem servir como um excelente suporte para PCM. Portanto, combinar PCM com AR para criar um material compósito que combine excelente desempenho térmico e resistência estrutural pode não apenas melhorar significativamente a eficiência energética dos edifícios, mas também reduzir a quantidade de resíduos de construção e a dependência de recursos naturais.

A motivação deste estudo surge da exploração dessa fronteira tecnológica, ao integrar PCM no betão com AR, visando melhorar ainda mais a sustentabilidade do betão. A busca é por uma solução de material de construção que seja de baixo carbono, eficiente e sustentável. Essa pesquisa não só ajudará a enfrentar os desafios das mudanças climáticas globais e da escassez de recursos, mas também fornecerá suporte técnico para a transição verde na indústria da construção.

1.3. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são desenvolver um novo método de utilização de RCD, combinando-os com a tecnologia de calor latente, de forma a obter um betão térmico verde. Assim, foram definidos vários objetivos específicos:

- Selecionar e caracterizar as matérias-primas, mais adequadas, como por exemplo AR, agregados naturais, cimento e PCM;
- Otimização do teor de incorporação de PCM nos AR;
- Otimização da combinação de técnicas de incorporação de PCM nos AR e no betão;
- Otimização das formulações de betões, tendo em consideração o seu comportamento físico e mecânico;
- Otimização das formulações de betões, tendo em consideração o seu comportamento térmico, com base nas condições climáticas reais da região Norte de Portugal;
- Avaliação da durabilidade das formulações de betões com AR e PCM;
- Análise económica das soluções desenvolvidas;
- Análise do impacto ambiental das soluções desenvolvidas.

O presente doutoramento irá ter um elevado contributo quer para o desenvolvimento do estado da arte,

quer para a evolução do desenvolvimento de betões térmicos verdes, uma vez que irá:

- Reforçar a base científica no desenvolvimento de betões com incorporação de PCM e AR, sendo esta uma matéria ainda não abordada;
- Reforçar a base científica no desenvolvimento de materiais de construção com a utilização simultânea de duas técnicas de incorporação de PCM, sendo esta opção uma área ainda não desenvolvida;
- Desenvolver betões com um contributo significativo para a melhoria das condições de habitabilidade dos edifícios, com um impacto positivo do ponto de vista ambiental, através da reutilização de resíduos da própria indústria da construção e no controlo das flutuações de temperatura no interior dos edifícios;
- Fornecer informação sobre a durabilidade de betões com incorporação de PCM, área nada desenvolvida no estudo destes materiais.

1.4. ADEQUAÇÃO DOS OBJETIVOS COM A AGENDA 2030

O presente doutoramento terá uma contribuição nos seguintes objetivos de desenvolvimento sustentável da Agenda 2030 [15].

- ODS 1: Erradicar a pobreza;
- ODS 7: Energias Renováveis e Acessíveis;
- ODS 12: Produção e Consumo Sustentáveis.

Os betões desenvolvidos neste trabalho apresentam grande potencial de aplicação global, especialmente em países em desenvolvimento, devido ao seu desempenho térmico e durabilidade esperado, à obtenção de materiais de baixo custo, à reutilização de RCD, e à redução das emissões de dióxido de carbono durante a produção dos materiais e a operação dos edifícios. Além disso, a redução da dependência de sistemas de climatização durante a operação dos edifícios resultará em uma diminuição do consumo de energia. Este betão inovador pode reduzir significativamente o uso de combustíveis fósseis, promover o aumento da utilização de energias renováveis, diminuir o acúmulo de resíduos de construção em terrenos e proteger os recursos naturais, melhorando, assim, a qualidade de vida humana sem prejudicar o meio ambiente.

Em relação ao ODS 1, este trabalho terá impacto direto na meta 1.5, ao contribuir para a construção e melhoria da resiliência das populações pobres e vulneráveis, diminuindo sua exposição e vulnerabilidade às mudanças climáticas. Isso será alcançado através da melhoria da eficiência energética dos edifícios,

com base no uso de fontes de energia renováveis e gratuitas. A utilização de PCM desempenha um papel fundamental, pois esses materiais podem absorver e liberar grandes quantidades de calor latente, mantendo as temperaturas internas mais próximas dos níveis de conforto térmico, reduzindo custos de energia e aumentando a eficiência energética dos edifícios.

No que diz respeito ao ODS 7, o trabalho ajudará a alcançar as metas 7.1, 7.2, 7.3, 7.a e 7.b, garantindo o acesso a energia moderna, acessível e confiável. A adoção de fontes de energia renováveis será ampliada, e a eficiência energética dos edifícios será significativamente melhorada. A criação de betões sustentáveis, por meio da integração de PCM que operam com base na energia solar, fornecerá uma solução viável para o fornecimento de energia sustentável em países de todo o mundo, especialmente nos países em desenvolvimento.

Por fim, no que se refere ao ODS 12, esta pesquisa terá impacto positivo nas metas 12.2, 12.4, 12.5, 12.6, 12.8 e 12.a. A reutilização de RCD permitirá uma gestão mais sustentável e eficiente dos recursos naturais e reduzirá os impactos adversos desses resíduos ao longo de seu ciclo de vida sobre a saúde humana e o meio ambiente. Além disso, a redução significativa na produção de resíduos, através de reciclagem e reutilização, incentivará empresas e governos a adotarem práticas de produção e consumo mais sustentáveis, e a utilizarem a capacidade tecnológica existente para promover a sustentabilidade nos materiais de construção e nas tecnologias.

Os resultados deste trabalho fornecem um importante suporte técnico para enfrentar os desafios globais das mudanças climáticas e da escassez de recursos. A combinação de PCM e AR demonstra uma abordagem inovadora para melhorar a eficiência energética dos edifícios e, ao mesmo tempo, contribuir para a redução do impacto ambiental da indústria da construção. Isso oferece uma solução de materiais de construção sustentáveis, de baixo carbono e altamente eficiente.

CAPÍTULO

2. MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

2.1. INTRODUÇÃO

Com o contínuo crescimento da população mundial, o aumento acentuado do consumo de energia tem levado ao esgotamento progressivo de fontes não renováveis, como o petróleo e o gás natural, intensificando a crise energética [16]. Nos últimos anos, os conflitos geopolíticos internacionais têm agravado ainda mais a questão energética, impulsionando o desenvolvimento diversificado de tecnologias de armazenamento e utilização de energia. Um ponto particularmente importante é que mais de 60% da energia gerada por combustíveis fósseis é dissipada na atmosfera na forma de calor residual [17]. Essa energia, que não é aproveitada de forma eficaz, resulta não apenas em um grande desperdício, mas também na intensificação do aquecimento global. No setor da construção, o consumo de energia para arrefecimento no verão e aquecimento no inverno é significativo, representando entre 30% e 40% do consumo energético global [18]. Este consumo é predominantemente dependente da queima de recursos não renováveis, acarretando uma série de problemas ecológicos e ambientais.

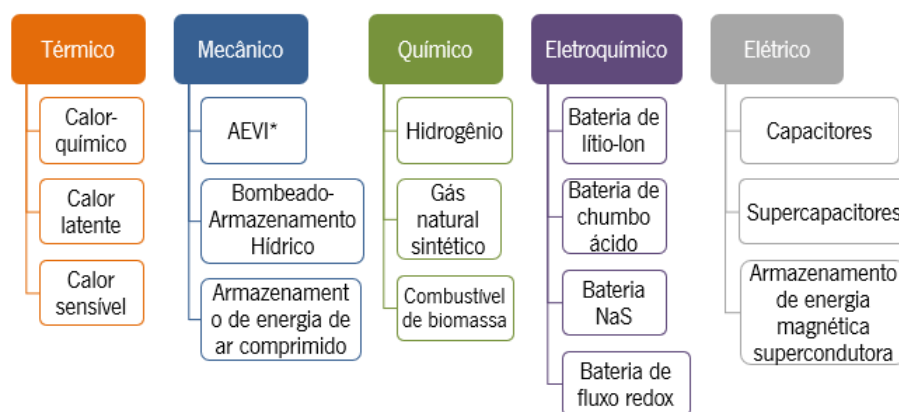
A energia solar, sendo uma fonte limpa, renovável e de fácil acesso, surge como uma solução potencial para a crise energética. A utilização eficaz da energia solar na indústria da construção pode não apenas reduzir a dependência de combustíveis fósseis, mas também mitigar a degradação ecológica e a poluição ambiental. Nesse contexto, o desenvolvimento de novos materiais de construção com capacidade de armazenamento de energia solar tem se tornado um dos principais temas de pesquisa atuais. Esses materiais visam otimizar a utilização eficiente da energia, aliviando a pressão sobre os recursos não renováveis e os impactos ambientais resultantes [19,20].

Nesse cenário, os materiais de mudança de fase (PCM, do inglês Phase Change Materials) têm ganhado grande atenção como materiais de armazenamento de energia verde [21]. Embora os PCMs não gerem energia diretamente, sua propriedade única de mudança de fase permite regular a temperatura nos edifícios ao absorver ou liberar calor latente em resposta às variações de temperatura ambiente. Os PCMs podem capturar calor excessivo quando a temperatura ambiente aumenta e liberá-lo quando a temperatura diminui, melhorando assim a eficiência energética. Por isso, a tecnologia de armazenamento de energia por mudança de fase tem sido amplamente aplicada em materiais de construção, com o objetivo de capturar e armazenar o calor do ambiente [22,23]. A aplicação dessa tecnologia pode, em parte, substituir a energia proveniente de combustíveis fósseis, reduzindo o consumo energético de edifícios e a dependência de fontes não renováveis, além de contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa e a poluição ambiental.

Pesquisas recentes indicam um grande potencial para o uso de PCMs na construção. Ao integrar esses materiais nas envoltórias dos edifícios, é possível melhorar significativamente o desempenho térmico das construções e reduzir as necessidades energéticas tanto no inverno quanto no verão. As futuras linhas de investigação incluem o desenvolvimento de materiais compósitos de PCM mais eficientes, com maior capacidade de armazenamento térmico e melhor desempenho mecânico, bem como a implementação de sistemas de controle inteligentes para melhorar a velocidade de resposta e a capacidade de regulação dos PCMs. Além disso, a reutilização e a sustentabilidade dos PCMs são áreas importantes de estudo, contribuindo para a inovação de materiais de construção sustentáveis e auxiliando na concretização de metas de economia de energia e proteção ambiental.

2.2. TECNOLOGIA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

A tecnologia de armazenamento de energia refere-se à tecnologia que armazena energia e a utiliza quando necessário, de modo a atingir o objetivo de uso eficiente de energia e “Deslocamento de Carga”. Por exemplo: aquecedores solares de água armazenam energia luminosa (radiação solar) em água quente (energia térmica), baterias armazenam energia elétrica em energia eletroquímica, etc. De acordo com a forma de armazenamento de energia, a tecnologia de armazenamento de energia pode ser dividida em tecnologia de armazenamento de energia térmica, tecnologia de armazenamento de energia eletroquímica, tecnologia de armazenamento de energia elétrica, tecnologia de armazenamento de energia química e tecnologia de armazenamento de energia mecânica (Figura 2.1) [24].



*AEVI: Armazenamento de Energia por Volante de Inércia.

Figura 2.1 - Tipos de armazenamento de energia.

Atualmente, a tecnologia de armazenamento de energia térmica, eletroquímica e mecânica encontram-se mais desenvolvidas, tendo algumas já obtido aplicações em larga escala, contudo ainda existem aspectos que podem ser melhorados e ainda necessitam de investigação [25].

Comparativamente com as tecnologias de armazenamento de energia mecânica e eletroquímica, a tecnologia de armazenamento de energia térmica tem uma vida útil maior e menor custo, o que a torna mais interessante. Especialmente em sistemas de utilização de energia distribuída, a energia excedente é armazenada na forma de energia térmica, sendo mais segura e confiável que o armazenamento de energia elétrica, e com maior potencial para desenvolvimento [26]. Segundo o relatório da revista internacional “Science”, mais de 90% da energia mundial é utilizada na forma final de energia térmica [27]. Por sua vez, a Agência Internacional de Energia (IEA) apontou que o consumo dos edifícios residenciais representa cerca de 30% do consumo final de energia mundial, dos quais cerca de 40% são utilizados para aquecimento e arrefecimento de edifícios residenciais [28]. Em Portugal, o setor habitacional é responsável por mais de 30% da energia consumida, o que se traduz em emissões de gases com efeito de estufa significativas. Para o efeito, o Fundo Ambiental disponibiliza 60 milhões de euros em 2025 [29] para melhorar a eficiência energética dos edifícios, cerca de 4 vezes mais do que em 2022 [30], principalmente nas áreas relacionadas com os painéis fotovoltaicos (38.5%), janelas mais eficientes (34.5%) e bombas de calor (27%).

De acordo com estatísticas da Aliança de Zhongguancun na China (CNESA) [31], em fevereiro de 2025, a capacidade total instalada dos sistemas de armazenamento de energia é 210 GW. A capacidade total instalada na China atinge 137.9 GW e energia de produção é 294 GWh. O armazenamento de energia por mudança de fase (PCM) é uma tecnologia inovadora de armazenamento térmico para controle de temperatura. De acordo um relatório da associação industrial chinesa, estima-se que o mercado alcance aproximadamente 2.2 bilhões de euros até 2025 [32]. Além disso, o relatório do governo chinês indica que, até 2025, será implementado um total de 1 GW em novos projetos de armazenamento de energia, incluindo sistemas baseados em mudança de fase [33].

2.3. ARMAZENAMENTO TÉRMICO

Atualmente, a principal fonte de energia térmica é baseada na combustão de combustíveis fósseis de recursos não renováveis, como o carvão, o petróleo e o gás natural. Por sua vez, a energia solar, a energia geotérmica, a energia nuclear e a energia da água do mar são atualmente fontes limpas de energia térmica, especialmente a energia solar constitui a principal fonte de energia térmica na terra. A energia total de radiação solar recebida pela superfície da Terra anualmente é de cerca de 10^{18} kWh, sendo cerca de dez vezes superior à energia de todos os combustíveis fósseis combinados. Desta forma, esta é uma fonte de energia em que vários países estão a implementar aplicações. Mas, a baixa eficiência de

utilização da energia térmica [34], o seu elevado consumo causado pelo aquecimento e arrefecimento dos edifícios [35] e o seu processo de produção industrial [36] levam a uma grande quantidade de calor residual e impactos negativos no ambiente. Portanto, para o armazenamento e utilização de energia térmica limpa e a melhoria da eficiência da utilização deste tipo de energia, a tecnologia de armazenamento de energia térmica deve ser mais desenvolvida e amplamente implementada.

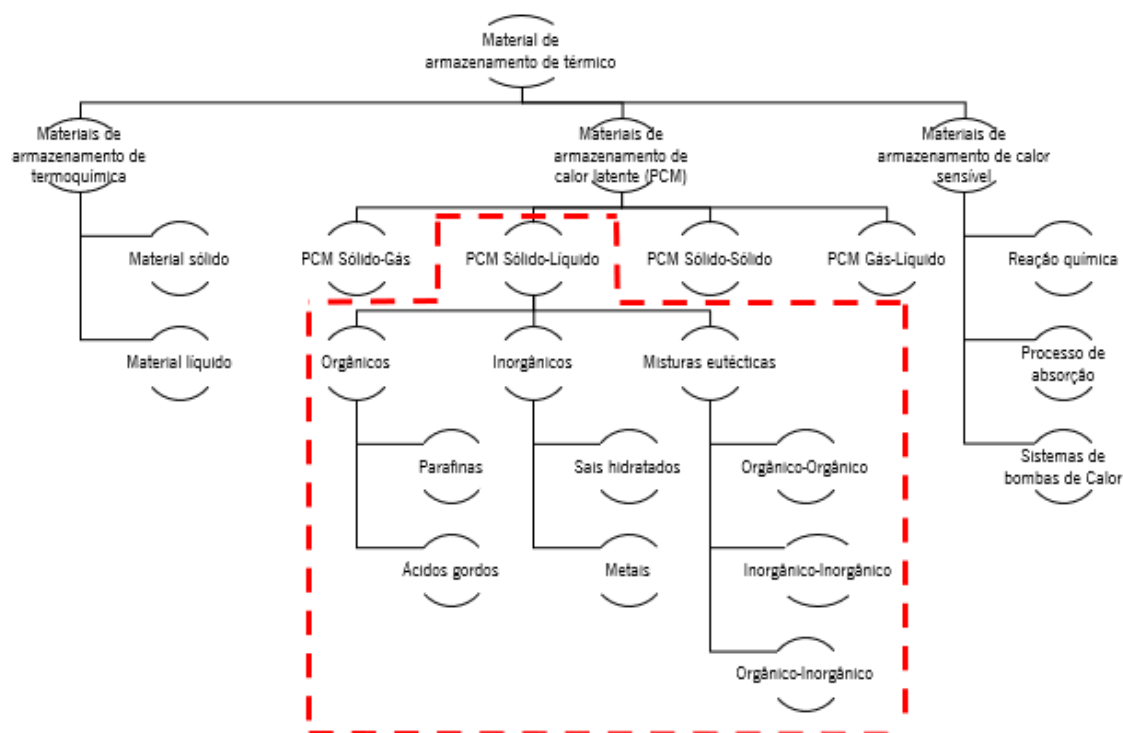


Figura 2.2 - Classificação dos materiais de armazenamento térmico e PCM [37].

A tecnologia de armazenamento de energia térmica é uma tecnologia que usa materiais de armazenamento de calor como meio para armazenar energia térmica, como energia térmica solar, calor residual, calor geotérmico e calor residual industrial, com o objetivo de reutilizá-lo quando necessário. Desta forma, os problemas intermitentes e instáveis da energia renovável podem ser resolvidos, a oferta e a procura de espaços-temporais de energia térmica podem ser combinadas e, finalmente, a eficiência de utilização da mesma pode ser melhorada. Diante de diferentes cenários de aplicação, a investigação e desenvolvimento de materiais de armazenamento térmico tornou-se a chave para o desenvolvimento da tecnologia de armazenamento de calor. De um modo geral, de acordo com as diferentes formas de armazenamento térmico, os materiais de armazenamento térmico podem ser divididos em armazenamento de calor sensível, armazenamento de calor latente e armazenamento termoquímico [38,39] sendo a sua classificação [37] apresentada na Figura 2.2, na qual se encontra assinalado a vermelho ao zona representativa dos materiais de mudança de fase (PCM) mais utilizados.

O armazenamento de calor sensível refere-se ao uso das propriedades físicas dos materiais de armazenamento de calor para armazenar e liberar calor sem alterar as propriedades químicas, e nenhuma mudança de temperatura ocorre durante esse processo (Figura 2.3 - a). Embora os materiais de armazenamento de calor sensível tenham as vantagens de baixo preço, fácil disponibilidade, tecnologia bastante desenvolvida, elevada vida útil e alta condutividade térmica, suas deficiências, como baixa massa volúmica de armazenamento de calor, curto tempo de armazenamento térmico, grande faixa de flutuação de temperatura e grande sistema de armazenamento de energia restringem o desenvolvimento de materiais de armazenamento de calor sensível [40].

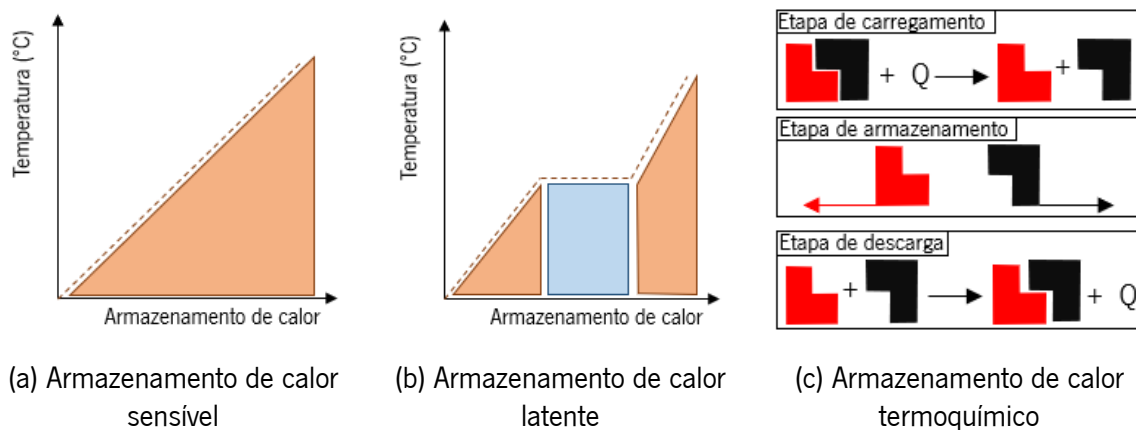


Figura 2.3 - Diferentes tipos de armazenamento de [39,41].

Relativamente ao armazenamento de calor sensível, o calor específico do material, a mudança de temperatura e a massa do material são os principais fatores que determinam a capacidade de armazenamento de calor [39,42] conforme mostrado na equação 2. 1.

$$\Delta Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad 2. 1$$

Em que:

ΔQ – Quantidade de calor armazenada (kJ);

m – Massa do material (kg);

C_p – Calor específico do material (kJ/kg.°C);

ΔT –Variação de temperatura (°C).

O armazenamento de calor latente, também conhecido como armazenamento de calor por mudança de fase, usa principalmente o comportamento endotérmico ou exotérmico de materiais no processo de mudança de fase (como sólido-sólido, sólido-líquido, sólido-gasoso, etc.) para armazenar ou liberar calor. Geralmente, estes materiais possuem elevada massa volúmica de armazenamento de calor e baixa

temperatura de fusão (Figura 2.3 - b) [43,44]. Em contraste, o armazenamento de calor latente tem uma alta massa volúmica de armazenamento de [45,46] geralmente 5 a 14 vezes [47] maior que a massa volúmica de armazenamento de energia de calor sensível. A quantidade de energia armazenada é baseada no calor latente de fusão do material ou variação da entalpia, pode ser calculada com base na expressão 2. 2.

$$\Delta Q = m \cdot a_m \cdot H \text{ ou } \Delta Q = m \cdot \Delta H \quad 2. 2$$

Em que:

ΔQ – Quantidade de calor armazenada (kJ·kg);

m – Massa do material (kg);

a_m – Fração derretida (kg);

H – Entalpia de fusão (kJ·kg⁻¹);

ΔH – Variação da entalpia (kJ).

O armazenamento de calor termoquímico consiste no uso de reações termoquímicas reversíveis para armazenar e liberar calor, e a sua fórmula da reação pode ser expressa como $A + \Delta H = B + C$. Na reação direta, o material de armazenamento de energia A absorve calor e o converte em duas formas, B e C para armazenamento. A energia térmica armazenada é libertada quando duas substâncias, B e C, entram em contato uma com a outra sob certas condições para formar A (Figura 2.3 - c). Na etapa de reação endotérmica, a energia térmica é armazenada pela quebra de ligações químicas, enquanto na etapa de reação exotérmica, a energia química é convertida em calor e libertada [48]. Desta forma, a massa volúmica de armazenamento de calor é elevada, fácil de armazenar por um longo período e verifica-se uma baixa perda de energia no processo [49]. A energia armazenada em um sistema de armazenamento de energia termoquímica é expressa pela equação 2. 3 [38]:

$$\Delta Q = m \cdot a_r \cdot \Delta h_r \quad 2. 3$$

Em que:

ΔQ – Quantidade de calor armazenada (kJ·kg);

m – Massa do material (kg);

a_r – Fração que reagiu (kg);

Δh_r – Calor endotérmico de reação (kJ·kg⁻¹).

As três formas de armazenamento de calor acima descritas possuem as suas vantagens e desvantagens. A Tabela 2.1 mostra as vantagens e desvantagens dos três métodos de armazenamento de calor.

Tabela 2.1 - Comparação de três métodos de armazenamento de calor [27].

	Calor sensível	Calor latente	Calor termoquímico
Massa volúmica de armazenamento de calor ($\text{GW}\cdot\text{m}^{-3}$)	Baixo	Médio	Alto
Ciclo de armazenamento de calor	Curto	Curto	Longo (Teórico)
Vantagem	Baixo custo e tecnologia madura	Pequeno tamanho do sistema e pequena mudança de temperatura	Pequena perda de calor
Desvantagem	Grande equipamento, grande perda de calor e grande mudança de temperatura	Problemas de embalagem e corrosão	Baixa condutividade térmica, alto custo, altos requisitos técnicos
Complexidade técnica	Fácil	Médio	Difícil

Enfrentando a meta de emissões zero de carbono no mundo e o desenvolvimento diferenciado da utilização de energia no futuro, a tecnologia de armazenamento de calor dará início a um maior espaço de desenvolvimento e oportunidades para o aquecimento e arrefecimento limpo dos edifícios, regulação de picos de energia térmica e distribuição de energia armazenada. Atualmente, o desenvolvimento de materiais de armazenamento de calor de alto desempenho e de baixo custo ainda constituem os principais focos de investigação, assim como o design de sistemas de armazenamento de calor flexíveis, eficientes e racionais. Tendo em consideração diferentes cenários de aplicação, as vantagens das diferentes formas de armazenamento de calor podem também ser combinadas para projetar um sistema de armazenamento de energia distribuído mais eficiente.

2.4. PROPRIEDADES DOS PCM

O material de mudança de fase, também conhecido como Phase change materials (PCM), é um tipo de material de armazenamento térmico, que pode absorver, armazenar e liberar calor, sendo que o seu estado físico altera, quando este atinge uma determinada temperatura, podendo transitar do sólido para o estado líquido ou do estado líquido para o estado gasoso. Contudo, os materiais de mudança de fase mais comuns, são aqueles cuja alteração de fase ocorre do estado sólido para o estado líquido e vice-versa. De facto, o PCM é um intermediário de armazenamento de calor, usando seu desempenho de calor latente elevado para regular a temperatura entre o sistema construtivo e o ambiente [50]. Estes

materiais possuem uma ampla gama de campos de aplicação, tais como aplicação na área militar, na indústria têxtil, na indústria automóvel, na indústria elétrica e ainda na indústria da construção [27,51].

O primeiro edifício com incorporação de PCM foi construído em Dover, Massachusetts em 1948, utilizando a fórmula sal de Glauber da investigadora Maria Telkes como meio de armazenamento de calor. Devido à facilidade de separação de fase do material, o sistema falhou após um curto período tempo de utilização. Assim, em 1959, quando a investigadora estava envolvida em outro projeto de um sistema de armazenamento térmico para uma área residencial em Princeton, esta adicionou silicato de sódio como espessante à composição do PCM. Desde então, muitos PCM's diferentes foram desenvolvidos [52]. Ao mesmo tempo, a NASA lançou uma investigação sobre a aplicação de materiais de mudança de fase no campo aeroespacial. Em 1982 a empresa de energia solar do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América começou a desenvolver a tecnologia para utilizar o PCM em materiais de construção, como placa de gesso cartonado e elementos de betão [53].

Em aplicação, a importância da adequação da temperatura de transição do PCM e da temperatura ambiente é um fator extremamente importante para a eficiência da solução construtiva dopada com PCM. A temperatura de transição do PCM refere-se à temperatura na qual o material muda de estado físico, geralmente entre sólido e líquido, durante o processo de armazenamento de energia térmica. Nessa temperatura, o PCM pode absorver ou liberar uma grande quantidade de calor latente sem apresentar uma variação significativa na sua própria temperatura (Figura 2.3 b). É importante compreender que o PCM é ativado com base na variação da temperatura ambiente. Assim, a seleção errada da temperatura de transição do PCM pode impedir o seu correto funcionamento [54]. De acordo com a temperatura de transição, estes podem ser divididos em PCMs de baixa temperatura ($<100\text{ }^{\circ}\text{C}$), PCMs de temperatura média ($100\text{ }^{\circ}\text{C} - 450\text{ }^{\circ}\text{C}$) e PCMs de elevada temperatura ($>450\text{ }^{\circ}\text{C}$) [37]. Shapiro [55] estudou a adequação de vários materiais de mudança de fase para incorporação em placas de gesso. Apesar de possuir grande capacidade de armazenamento térmico, o PCM selecionado não funcionou corretamente, uma vez que a temperatura de transição do PCM não coincidia com a faixa de temperatura de conforto. Assim, no que diz respeito às aplicações de PCM em edifícios, a temperatura de transição selecionada deve ser o mais próxima possível da temperatura de conforto no interior dos edifícios, de forma a obter um maior e melhor desempenho do material. Para aplicações no interior dos edifícios, a temperatura de transição de PCM ideal situa-se numa gama de temperaturas de 18 a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. A opção por esta gama de temperaturas tem como base o Decreto-Lei n.º 118/2013 [56], que indica que esta é a gama de temperatura de conforto no interior dos edifícios.

No entanto, os PCM nas suas diferentes classes e categorias e ampla gama de temperaturas de transição, possuem também diferentes entalpias. A entalpia é também uma propriedade bastante importante, uma vez que esta representa a capacidade de armazenamento do PCM. Assim, a seleção de uma entalpia adequada é crucial para aumentar o desempenho do PCM, uma vez que quanto maior a entalpia do PCM maior é a sua capacidade de armazenamento e liberação de energia para o meio ambiente. A quantidade de PCM incorporada nos materiais de construção deve ser a maior possível, sem prejuízo significativo de outras propriedades. Lai et al. [57] realizaram um estudo que permitiu avaliar o contributo de vários teores de PCM incorporados em placas de gesso. Para tal, foi necessário fazer variar a percentagem de PCM em 23%, 30% e 40%. Tendo sido possível concluir que a capacidade de armazenamento térmico aumenta com a presença de um maior teor de PCM no material de construção.

Em suma, os PCMs, como um material inovador de armazenamento de energia, tornaram-se um foco de atenção dos investigadores, pois podem reduzir de forma eficaz o consumo de energia fóssil e aumentar significativamente a eficiência energética. No entanto, a aplicação dos PCM em materiais de construção exige uma consideração cuidadosa das suas propriedades termofísicas, estabilidade química e compatibilidade com diferentes materiais de construção. O uso de materiais de mudança de fase não só promove o desenvolvimento sustentável do ponto de vista social, como também contribui para a redução de emissões de carbono no meio ambiente e oferece vantagens económicas em termos de poupança de energia e custo-benefício.

Contudo, para garantir um desempenho eficiente em aplicações específicas, é imprescindível seleccionar de forma científica o PCM mais adequado, de acordo com as exigências funcionais e condições operacionais, seguindo os critérios apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Critérios de seleção com base nas características do PCM [39,50].

Características	Requisitos
Propriedades térmicas	• Temperatura de mudança de fase adequada • Calor latente elevado • Condutividade térmica baixa
Propriedades físicas	• Massa volúmica baixa • Baixa pressão de vapor
Propriedades cinéticas	• Baixo super-arrefecimento • Taxa de cristalização suficiente

Continuar Tabela 2.2

Propriedades químicas	• Estabilidade a longo prazo • Compatibilidade com materiais de construção • Cristalização reprodutível sem degradação • Sem corrosividade • Sem toxicidade • Sem risco de incêndio
Economia	• Baixo custo • Disponibilidade

2.5. CLASSIFICAÇÃO DOS PCM

Os PCMs podem ser classificados detalhadamente com base nas suas propriedades químicas e comportamento de transição de fase, incluindo materiais orgânicos (como os parafínicos e não parafínicos), materiais inorgânicos (como os sais hidratados e metálicos) e misturas eutéticas. Esta classificação foi proposta pela primeira vez em 1983 e continua a ser amplamente utilizada (Figura 2.2) [45,58]. Tyagi et al. [23], através de seus estudos, apresentaram uma análise dos diferentes tipos de PCM utilizados (ver Figura 2.4), onde se pode observar claramente que, entre os vários PCMs, os PCM de natureza orgânica, em especial as parafinas, têm atraído um grande interesse. Isso deve-se à sua boa estabilidade química, elevado potencial de armazenamento de calor e custo relativamente baixo. Esta tendência reflete também a importância dos materiais orgânicos em aplicações de engenharia prática, sobretudo no campo da eficiência energética e controlo térmico em edifícios.

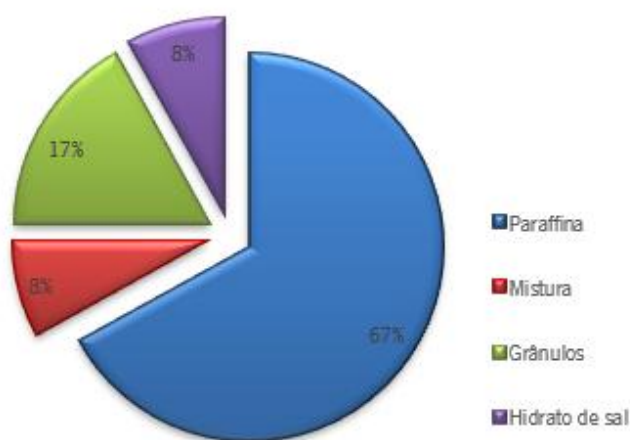


Figura 2.4 - Percentagem de cada tipo de PCM utilizado no estudo [23].

2.5.1. PCM orgânico

Os materiais de mudança de fase (PCM) de natureza orgânica incluem parafina, ácidos graxos e hidrocarbonetos alifáticos. As vantagens desses materiais incluem boa moldagem, ausência de super arrefecimento e longa vida útil, o que os torna amplamente aplicáveis em setores como construção, têxtil e transporte de cadeia fria. Pesquisas recentes indicam que os PCM orgânicos apresentam alta capacidade de armazenamento térmico e baixa condutividade térmica durante o processo de mudança de fase, o que é eficaz para retardar a liberação de calor e, assim, aumentar a eficiência energética [4]. Entretanto, os PCM orgânicos também apresentam algumas desvantagens. Por exemplo, podem ser inflamáveis em altas temperaturas, o que requer atenção especial à sua segurança quando aplicados em materiais de construção. Além disso, em comparação com os PCM de natureza inorgânica, os PCM orgânicos têm geralmente uma entalpia mais baixa, o que limita sua aplicação em ambientes de alta carga térmica [37]. Nos últimos anos, pesquisadores têm-se empenhado em desenvolver novos PCM orgânicos, como a modificação da estrutura química da parafina e dos ácidos graxos para melhorar seu desempenho térmico e segurança [59–61].

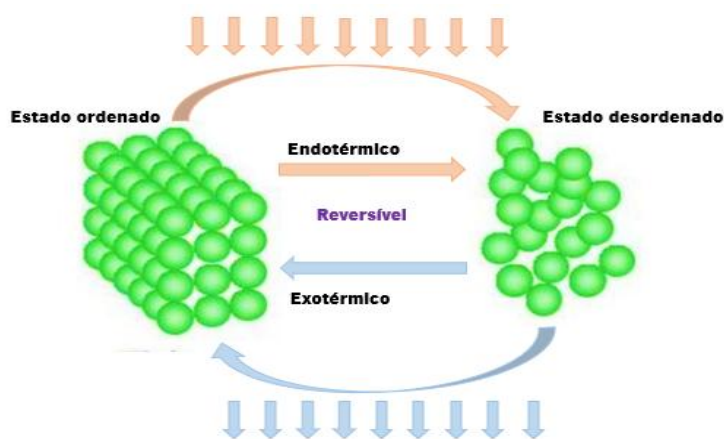


Figura 2.5 - Diagrama esquemático da transição de fase física [62].

O princípio de armazenamento de calor da maioria dos PCM orgânicos está ligado a suas propriedades físicas, o que significa que o armazenamento de energia térmica está intimamente relacionado ao estado de arranjo das moléculas. Quando as moléculas estão dispostas de forma ordenada, a vibração intermolecular é lenta, e a energia interna é relativamente baixa; por outro lado, quando as moléculas estão em estado desordenado, a vibração intermolecular acelera, e a energia interna aumenta [62]. Portanto, as propriedades macroscópicas desses materiais se manifestam de forma endotérmica e exotérmica, demonstrando um grande potencial de aplicação. As mudanças na estrutura, microestrutura e seu desempenho estão ilustrados na Figura 2.5.

A parafina é uma classe de compostos orgânicos amplamente utilizada como PCM, composta principalmente por alcanos lineares, cuja estrutura química é $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$, onde n representa o comprimento da cadeia de carbono. O princípio de armazenamento de calor da parafina baseia-se na absorção e liberação de calor latente durante seu processo de mudança de fase. Quando a temperatura atinge a temperatura de transição, a parafina passa do estado sólido para o estado líquido, ou vice-versa, armazenando e liberando energia térmica de forma eficaz. A parafina possui propriedades térmicas notáveis, como alta capacidade de armazenamento de calor latente e estabilidade química. A temperatura de transição da parafina está intimamente relacionada com o comprimento da cadeia de carbono. À medida que a cadeia carbônica aumenta, tanto a temperatura de transição quanto a capacidade de armazenamento térmico tendem a aumentar. Em geral, a temperatura de transição da parafina varia entre -12°C e 71°C , e a entalpia encontra-se entre 128 kJ/kg e 257 kJ/kg , proporcionando flexibilidade para diferentes aplicações [39,63]. Devido à sua significativa capacidade de armazenamento de calor latente e à estabilidade térmica, a parafina é amplamente considerada para aplicações em construção civil, têxteis e eletrônica. Embora a parafina apresente diversas vantagens, como ausência de superarrefecimento, boa estabilidade ao longo de ciclos térmicos e longa vida útil, também tem algumas limitações. Entre essas estão sua inflamabilidade e baixa condutividade térmica, o que pode representar desafios em determinadas aplicações. Por isso, é comum encapsular a parafina ou combiná-la com materiais de alta condutividade térmica para aumentar sua segurança e desempenho [37]. Na Tabela 2.3 encontram-se a entalpia e a temperaturas de transição de várias parafinas.

Tabela 2.3 – Temperatura de transição e entalpia de parafinas [38,50].

Nome	Número de átomos de carbono	Temperatura de transição ($^\circ\text{C}$)	Entalpia de fusão (kJ/kg)
n-Dodecano	12	-12	n.a.
n-Tridecano	13	-6	n.a.
n-Tetradecano	14	4.5-5.6	231
n-Pentadecano	15	10	207
n-Hexadecano	16	18.2	238
n-Heptadecano	17	22	215
n-Octadecano	18	28	245
n-Nonadecano	19	31.9	222
n-Eicosano	20	37	247
n-Heneicosano	21	41	215
n-Docosano	22	44	249
n-Tricosano	23	47	234

Continuar Tabela 2.3.

n-Tetracosano	24	51	255
n-Pentacosano	25	54	238
n-Hexacosano	26	56	257
n-Heptacosano	27	59	236
n-Octacosano	28	61	255
n-Nonacosane	29	64	240
n-Triacontano	30	65	252
n-Hentriacontane	31	n.a.	n.a.
n-Dotricontano	32	70	n.a.
n-Tritricontano	33	71	189

2.5.2. PCM inorgânicos

Os PCMs inorgânicos são uma classe amplamente estudada de materiais de armazenamento de energia, ganhando destaque devido ao seu alto valor de entalpia e excelente condutividade térmica. Os PCMs inorgânicos típicos incluem sais hidratados, nitratos, cloretos, sulfatos e outros compostos inorgânicos. Materiais como o sal de Glauber ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), o cloreto de cálcio hexahidratado ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), cloreto de magnésio hexahidrato ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) e hidrogenofosfato dissódico dodecahidratado ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) são amplamente aplicados e constituem uma das classes mais comuns de PCM inorgânicos. Na Tabela 2.4 é possível observar que esses materiais possuem elevado valor de calor latente e pequenas variações volumétricas, sendo especialmente adequados para aplicações em eficiência energética de edifícios e armazenamento de calor em processos industriais [39,64]. Com o rápido desenvolvimento da tecnologia de armazenamento de energia, o foco da investigação em PCM inorgânicos expandiu-se para o desenvolvimento de novos materiais inorgânicos, como sais fundidos e óxidos metálicos [65,66]. PCM à base de sais fundidos (como a mistura de nitrato de sódio e nitrato de potássio) têm sido amplamente aplicados em sistemas de energia solar termoeletrica, caracterizados por sua boa estabilidade em altas temperaturas, grande capacidade térmica e adequação para armazenamento de energia em larga escala. Óxidos metálicos, como o óxido de magnésio (MgO) e o óxido de cálcio (CaO), emergem como novos materiais inorgânicos promissores para o armazenamento de calor de alta temperatura, destacando-se pela alta condutividade térmica e resistência à corrosão.

O princípio de funcionamento dos materiais de mudança de fase inorgânicos baseia-se na quebra e reorganização das ligações intramoleculares (Figura 2.6). Durante a transição de fase, a disposição molecular dos materiais altera-se significativamente, resultando na absorção ou liberação de grandes quantidades de calor latente [62]. Nos PCM de sais hidratados, por exemplo, a presença de moléculas

de água permite a formação de uma estrutura cristalina estável, e quando essas estruturas cristalinas colapsam durante a mudança de fase, o calor latente libertado é utilizado para equilibrar a temperatura do ambiente.

Tabela 2.4 – PCM inorgânico [64,67].

Nome	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de fusão (kJ/kg)	Massa volúmica (kg/m ³)
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	32.4	251	1330 (líquido)
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	29.6	191	1562 (líquido)
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	111.0	155	1450 (líquido)
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	36.5	264	1440 (líquido)

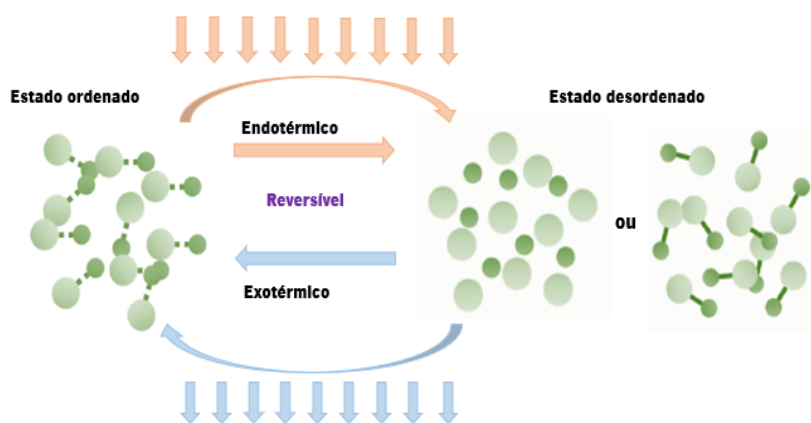


Figura 2.6 - Diagrama esquemático da transição de fase química [62].

No entanto, os PCM inorgânicos também enfrentam alguns desafios técnicos, como a separação de fase, o efeito de super-arrefecimento e a estabilidade durante ciclos térmicos [67]. Para superar esses problemas, os investigadores desenvolveram várias soluções, como a adição de nanopartículas, a modificação das interfaces e o uso de tecnologias de materiais compósitos para melhorar a estabilidade e o desempenho cíclico dos PCM inorgânicos. Por exemplo, estudos recentes mostram que a introdução de grafeno ou nanotubos de carbono em PCM de sais hidratados pode aumentar significativamente sua condutividade térmica, além de atenuar os problemas de separação de fase [64, 65]. Além disso, o desenvolvimento de materiais compósitos inorgânicos (como sais hidratados combinados com partículas metálicas) também tem mostrado resultados promissores, aumentando consideravelmente a condutividade térmica e a eficiência de armazenamento de calor.

Em resumo, os PCMs inorgânicos, com seu alto valor de entalpia, excelente condutividade térmica e

baixo custo, mostram um enorme potencial no campo do armazenamento de energia. Com o surgimento de novos materiais e tecnologias, o campo de aplicação dos PCM inorgânicos será cada vez mais ampliado, especialmente nas áreas de armazenamento de calor industrial em altas temperaturas e em sistemas energéticos de grande escala.

2.5.3. Misturas eutéticas

Misturas eutéticas, como uma classe de PCM, têm atraído ampla atenção em aplicações de armazenamento de energia devido às suas propriedades térmicas superiores e características de controle ajustáveis em comparação com PCM individuais. As misturas eutéticas são formadas pela combinação de dois ou mais PCM distintos, criando um sistema homogêneo que funde e solidifica a uma proporção específica, permitindo a otimização da temperatura de transição e do valor de entalpia. Em comparação com os materiais individuais, as misturas eutéticas apresentam uma faixa de temperatura de transição mais favorável, maior valor de entalpia e estabilidade térmica superior [70]. Com base nas propriedades dos materiais, as misturas eutéticas podem ser classificadas em três categorias: orgânico-orgânico, orgânico-inorgânico e inorgânico-inorgânico [38]. Cada categoria possui características distintas, adequadas para diferentes cenários de armazenamento de energia.

Misturas eutéticas orgânico-orgânico: Estas misturas são compostas por dois ou mais materiais de mudança de fase orgânicos, como ácidos graxos, parafinas e álcoois graxos. Estes PCMs apresentam excelente estabilidade química, reversibilidade e baixa corrosividade, sendo indicados para aplicações em materiais de construção e têxteis. Pesquisas recentes indicam que, ajustando a proporção entre ácidos graxos e parafinas, é possível obter PCM com uma ampla faixa de temperatura de transição entre 15 °C e 30 °C, tornando-os adequados para controle de temperatura em ambientes de construção [71]. Por exemplo, misturas eutéticas de ácido cáprico e ácido mirístico, assim como de ácido cáprico e ácido láurico, mostraram um comportamento de mudança de fase estável [72].

Misturas eutéticas orgânico-inorgânico: Estas misturas eutéticas combinam materiais orgânicos com sais inorgânicos hidratados, resultando em PCMs com alta capacidade de armazenamento de calor latente e melhor condutividade térmica. Esses materiais são indicados para o armazenamento de energia térmica a baixo custo, além de apresentar uma longa vida útil. Um exemplo é o polietilenoglicol (PEG) combinado com sais inorgânicos, que demonstrou grande potencial em aplicações de armazenamento térmico para indústrias [73].

Misturas eutéticas inorgânico-inorgânico: Este tipo de misturas eutéticas inorgânicas são compostas por dois ou mais sais inorgânicos, conhecidos por sua elevada temperatura de transição e condutividade térmica aprimorada. Essas misturas são amplamente utilizadas em cenários que requerem armazenamento de energia em altas temperaturas, como em sistemas de energia solar concentrada (CSP) e indústrias de tratamento térmico de alta temperatura. Misturas eutéticas comuns, como nitrato de potássio e nitrato de sódio, ou cloreto de lítio e cloreto de cálcio, demonstram excelente estabilidade térmica e alta capacidade de armazenamento térmico [74]. Estudos indicam que a mistura eutética de nitrato de potássio e nitrato de sódio ($\text{KNO}_3\text{-NaNO}_3$) possui desempenho notável em faixas de temperatura entre 300 °C e 500 °C [75]. Nos últimos anos, os trabalhos de investigação têm-se concentrado no desenvolvimento de PCM híbridos, como nanocompósitos PCM e PCM modificados, nos quais materiais nanométricos, como grafeno e nanotubos de carbono, são introduzidos em misturas eutéticas para melhorar a condutividade térmica e estabilidade. Por exemplo, a incorporação de nanotubos de carbono em sistemas de sais hidratados mostrou uma significativa redução na separação de fases e melhoria na estabilidade cíclica [65, 72].

Em suma, as misturas eutéticas como uma classe de PCM possuem grande potencial em armazenamento de energia devido às suas propriedades ajustáveis de temperatura de transição e alta capacidade de armazenamento térmico. A Tabela 2.5 apresenta algumas misturas eutéticas do tipo orgânico-orgânico e inorgânico-inorgânico.

Tabela 2.5 – Misturas eutéticas [77,78].

Designação	Composição (wt. %)	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de fusão (kJ/kg)
Álcool laurílico + álcool cetílico	80:20	20.01	191.63
Ácido oleico+Palmitato de isopropilo+ Estearato de butilo	44:33:24	5.14	104.12
Capricacido + Ácido Laurico	82:18	19-24	141
Estearato de butilo + Palmitato	50:50	20	138
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH}+\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$	45:55	21	143
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}+\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	47:53	30	136
$\text{CaCl}_2+\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}+\text{KCl}$	48:47.3:4.3:0.4	26.8	188
$\text{CH}_3\text{CONH}_2+\text{NH}_2\text{CONH}_2$	50:50	27	163
$\text{NaNa}(\text{CH}_3\text{COO})\text{H}_2\text{O}+\text{COCO}(\text{NH}_2)_2$	60:40	30-31.5	200.5-226

2.6. DESAFIOS DA APLICAÇÃO DE PCM

Conforme mencionado na seção anterior, os PCMs (materiais de mudança de fase) ainda enfrentam alguns desafios técnicos durante o processo de aplicação, como o efeito de super-arrefecimento, separação de fases, redução das propriedades mecânicas dos materiais de suporte, possíveis incompatibilidades com os materiais dos recipientes e potenciais vazamentos entre o PCM e os materiais em contacto [37,62]. Esses problemas, em certa medida, podem limitar a ampla aplicação dos PCM, especialmente nos campos de eficiência energética em edifícios e armazenamento de calor industrial. Ainda assim, a tecnologia PCM tem mostrado um grande potencial na regulação da temperatura e na melhoria da eficiência energética, tornando a pesquisa para otimizar seu desempenho cada vez mais relevante. Entre esses desafios, o efeito de super-arrefecimento e a separação de fases são fatores-chave que afetam a estabilidade e a eficiência de armazenamento térmico dos PCM. Essas ocorrências não apenas influenciam o processo de mudança de fase dos materiais, mas também podem reduzir a eficiência no armazenamento e liberação de energia. Portanto, uma investigação mais aprofundada sobre esses problemas e o desenvolvimento de soluções eficazes são fundamentais para o avanço e a ampliação do uso dos PCMs. A seguir, serão discutidos em detalhes o efeito de super-arrefecimento, o problema da separação de fases e vazamento de PCM, além de seu impacto no desempenho dos PCM, bem como os avanços recentes nesta área de investigação e as estratégias de mitigação.

2.6.1. Super-arrefecimento

Durante o processo de mudança de fase do PCM, o fenômeno do super-arrefecimento é comum e importante. O super-arrefecimento refere-se à situação em que o material, durante o arrefecimento, atinge uma temperatura abaixo da temperatura de mudança de fase teórica (PFT) sem que a mudança de fase ocorra imediatamente; em vez disso, é necessário atingir uma temperatura de mudança de fase real (PFR) mais baixa para que a mudança de fase comece (Figura 2.7). Neste ponto, existe uma diferença significativa de energia livre entre as fases líquida e sólida, e essa diferença de energia deve ser superada por meio de um arrefecimento adicional para induzir a mudança de fase [79]. Esse efeito é particularmente notável em inorgânicos PCM, especialmente em sais hidratados, onde a complexidade da estrutura cristalina e as fortes interações intermoleculares tornam o super-arrefecimento mais pronunciado [80].

Do ponto de vista termodinâmico, o super-arrefecimento está intimamente ligado aos processos de nucleação e crescimento. A nucleação, que é a formação de um núcleo estável para a mudança de fase,

exige superar uma certa barreira de energia. Para alguns PCMs, especialmente os materiais inorgânicos, como nitratos ou sais hidratados, a barreira cinética para a nucleação é alta, o que significa que mesmo que a temperatura ambiente atinja a temperatura de mudança de fase teórica, o material pode não entrar imediatamente na fase desejada, resultando em um fenômeno de super-arrefecimento [81].

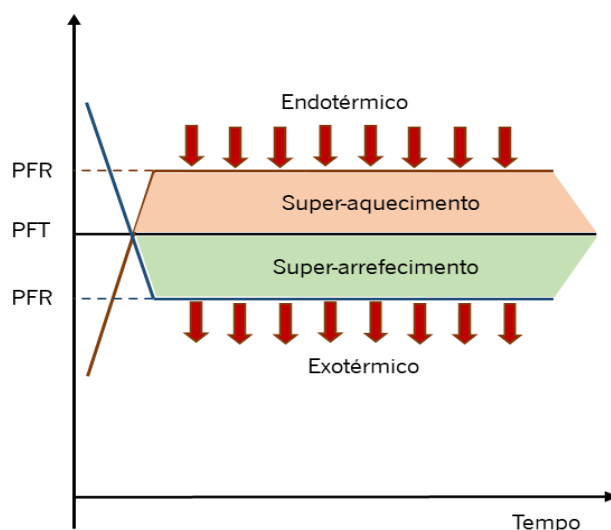


Figura 2.7 - Atraso na mudança de fase (Super-arrefecimento) [62].

Para resolver o problema do super-arrefecimento, as pesquisas recentes têm se concentrado na adição de agentes de nucleação ou na modificação de superfícies. A introdução de agentes de nucleação pode reduzir a barreira de energia necessária para a nucleação, diminuindo a probabilidade de super-arrefecimento do material. Por exemplo, a adição de nanopartículas ou óxidos metálicos como agentes de nucleação tem se mostrado eficaz na redução da faixa de super-arrefecimento dos PCM inorgânicos e na melhoria da eficiência de mudança de fase [82]. Além disso, algumas investigações indicam que a modificação de superfícies ou a utilização de técnicas de compósitos, combinando PCM com materiais de alta condutividade térmica (como nanotubos de carbono ou grafeno), não apenas pode aumentar significativamente a condutividade térmica, mas também ajudar a suprimir a ocorrência do super-arrefecimento [65, 72].

À medida que a pesquisa sobre a aplicação de PCM avança, as estratégias para resolver o super-arrefecimento continuam a evoluir. Estudos recentes demonstraram que a introdução de nanomateriais em PCM à base de sais hidratados não só pode promover o processo de nucleação, mas também manter uma boa estabilidade de mudança de fase e desempenho térmico após múltiplos ciclos térmicos [83]. Esses avanços fornecem suporte teórico e ferramentas técnicas importantes para a aplicação de PCM em armazenamento de energia e eficiência energética em edifícios.

2.6.2. Separação de fase

A separação de fases dos PCM é outro problema crítico durante a aplicação dos PCM, especialmente em sistemas de construção e armazenamento de energia. A separação de fases geralmente ocorre em sistemas multifásicos, quando diferentes fases de materiais se separam durante o processo de transição de fase devido a diferenças de massa volúmica, estrutura ou outras propriedades físicas, resultando em uma diminuição do desempenho térmico e da eficiência do material.

A base teórica da separação de fases do PCM pode ser atribuída à interação entre termodinâmica e hidrodinâmica. No PCM, à medida que a temperatura varia, a estrutura molecular do material sofre mudanças significativas. Durante a mudança de fase, a disposição e o movimento das moléculas entre os estados sólido e líquido diferem, o que pode levar a variações na massa volúmica e na viscosidade. As diferenças de massa volúmica fazem com que a fase mais leve (de baixa massa volúmica) flutue sobre a fase mais pesada (de alta massa volúmica), resultando em separação (como mostrado na Figura 2.8). Esse processo está intimamente relacionado com tensão superficial do material, características de interface e gradiente de temperatura [62]. A separação de fases não apenas reduz o desempenho térmico dos PCM, mas também pode levar ao envelhecimento do material e à diminuição da estabilidade térmica. Estudos demonstram que a separação de fases afeta a capacidade de armazenamento de energia e a liberação de calor dos materiais, impactando assim a eficiência de todo o sistema [84].

Nos últimos anos, Wong et al. [85] exploraram métodos para melhorar o desempenho térmico dos PCM através da adição de nanopartículas. As pesquisas mostram que nanopartículas (como nanotubos de carbono e grafeno) não apenas aumentam a condutividade térmica do material, mas também podem inibir a separação de fases ao aumentar a área da interface. Além disso, Dou et al. [86] modificaram quimicamente ou fisicamente a interface entre o PCM e seus materiais de matriz, melhorando a compatibilidade entre as fases e reduzindo a possibilidade de separação. Moradikazerouni [87] focou-se no desenvolvimento de novos PCMs multifásicos, combinando materiais de mudança de fase orgânicos e inorgânicos, visando a combinação das vantagens de cada um. Rufuss et al. [88] demonstraram que a adição de óxido de cobre e óxido de titânio à parafina melhorou o calor latente em 15.7% e 64.7% em comparação com a parafina básica. A razão pode ser atribuída a mecanismos que incluem os efeitos da concentração de nanopartículas, estados de carga superficial das nanopartículas, camadas na interface sólida e líquida e a vibração harmônica da rede [89]. Estudos mostram que essa combinação pode melhorar significativamente o desempenho global dos materiais de mudança de fase, embora o problema da separação de fases ainda precise ser mais desenvolvido.

Em suma, a separação de fases é um fator importante que afeta o desempenho e aplicação do PCM. Com o avanço da ciência dos materiais e da nanotecnologia, futuras pesquisas devem continuar a focar na otimização da composição e estrutura dos PCM, a fim de melhorar seu desempenho térmico e estabilidade, reduzindo a ocorrência da separação de fases. Apoiando assim a ampla aplicação dos PCMs para a eficiência energética de edifícios e em outras aplicações de armazenamento de energia.

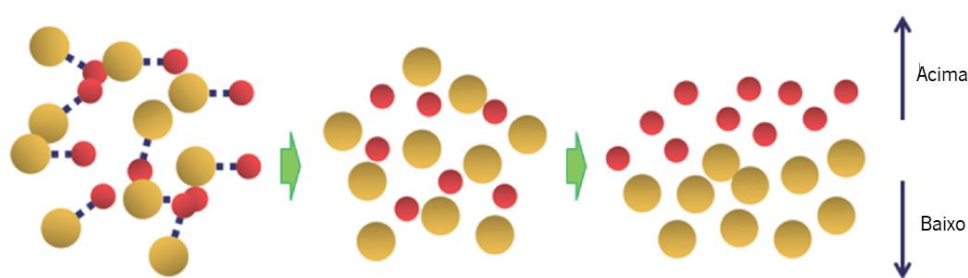


Figura 2.8 – Separação de fase [62].

2.6.3. Vazamento de PCM

Os PCMs apresentam um problema significativo de vazamento durante a transição do estado sólido para o líquido e vice-versa. Esse vazamento não só afeta o desempenho térmico e a eficiência energética do material, mas também pode levar à poluição ambiental e à deterioração das propriedades do material. O fenômeno do vazamento está intimamente relacionado ao PCM em estado líquido, pois, durante o processo de mudança de fase, o PCM líquido é suscetível a escapar de recipientes ou materiais fechados devido a fatores como tensão superficial, gravidade e diferenças de massa volúmica. Especificamente, as causas do problema de vazamento podem ser divididas em três principais categorias: (1) Mudanças nas propriedades físicas, pois durante o processo de mudança de fase, a massa volúmica e a viscosidade do PCM sofrem alterações significativas, sendo que a baixa viscosidade do PCM líquido facilita sua saída de espaços fechados sob a ação da gravidade; (2) Baixa compatibilidade Interfacial, uma vez que a incompatibilidade entre o PCM e seu recipiente ou material base pode resultar em fissuras ou pequenos poros na interface, permitindo que o PCM líquido vaze; (3) Efeito de expansão térmica, pois durante o aquecimento, o PCM se expande, e se o design do recipiente não for adequado, isso pode aumentar a pressão interna, levando a vazamentos. Portanto, é crucial encontrar soluções para esse problema.

Para resolver a questão do vazamento do PCM durante o processo de mudança de fase, as pesquisas atuais estão focadas principalmente em duas estratégias: encapsulação (microencapsulação e macroencapsulação) [59], estabilização [90] e diretamente [91,92].

2.7. TÉCNICAS DE INCORPORAÇÃO DE PCM

Baseado na compreensão aprofundada dos PCM's, sua aplicação em materiais de construção para otimizar o desempenho térmico dos edifícios tornou-se uma importante direção de pesquisa [45]. Para minimizar os efeitos adversos decorrentes das propriedades intrínsecas dos PCM, a área em questão, após extensos estudos experimentais e teóricos, sintetizou quatro métodos principais para integrar PCM em materiais de construção: incorporação direta, encapsulação (microencapsulação e macroencapsulação), imersão e estabilização [22].

A técnica de incorporação direta é o método mais direto e económico para fundir PCM com materiais de construção, permitindo uma mistura significativa durante o processo de produção, o que facilita a aplicação em larga escala. No entanto, este método pode levar à subutilização das propriedades térmicas do PCM e a problemas de compatibilidade com a matriz, o que pode impactar negativamente o desempenho geral. Por outro lado, a técnica de encapsulamento (incluindo microencapsulação e macroencapsulação), embora apresente custos mais elevados, pode otimizar significativamente o desempenho térmico e a estabilidade do PCM. Ao encapsular o PCM em materiais específicos, é possível resolver efetivamente problemas de separação de fases e vazamento, melhorando assim o desempenho global dos materiais de construção. Além disso, métodos como imersão e estabilização também oferecem novas perspectivas para a aplicação de PCM, especialmente na melhoria da compatibilidade de interface e no aumento da estabilidade térmica dos materiais ao longo dos ciclos de temperatura. Através da combinação desses métodos, é possível aprimorar de forma mais eficaz o desempenho térmico dos materiais de construção, contribuindo assim para a economia de energia e o conforto nos edifícios [59].

2.7.1. Incorporação direta

A incorporação direta é uma técnica simples e económica que consiste em misturar PCM diretamente na produção de materiais de construção em uma determinada proporção. Esta abordagem tem a vantagem de sua simplicidade no processo e de custos mais baixos, além de poder melhorar efetivamente o desempenho térmico dos materiais de construção, aumentando assim a eficiência energética e o conforto dos edifícios. No entanto, a incorporação direta também apresenta algumas desvantagens significativas, especialmente no que diz respeito ao impacto nas propriedades mecânicas do material. Durante o processo de incorporação direta, a adição de PCM geralmente resulta em uma diminuição das propriedades mecânicas do material. Isso se deve, em grande parte, ao fato de que a massa volúmica e a resistência do PCM são geralmente inferiores às dos materiais de construção

convencionais. Além disso, durante a mudança de fase, a alteração no estado físico do PCM pode causar mudanças na microestrutura do material, afetando sua resistência à compressão e tenacidade. Por exemplo, estudos recentes indicam que a incorporação de PCM no betão pode resultar em reduções significativas na resistência à compressão, especialmente quando são utilizados altos teores de adição [22]. Kemal et al. [92] selecionaram estearato de butilo como PCM, com uma temperatura de transição de 22 °C e massa volúmica de 861 kg/L. Os resultados mostraram que a resistência à compressão diminuiu cerca de 43% e 64% com a incorporação de 5% e 10% de PCM. Essa redução é atribuída principalmente às propriedades inerentes do PCM, que podem criar vazios ou pontos fracos dentro da matriz do betão, comprometendo sua integridade estrutural.

Além disso, a fluidez e a viscosidade do PCM podem variar significativamente em diferentes temperaturas, o que, durante a mudança de fase, pode levar a uma distribuição não uniforme do material, impactando ainda mais sua condutividade térmica. Investigações mais recentes demonstraram que a adição de quantidades adequadas de PCM pode melhorar consideravelmente a capacidade de armazenamento térmico do betão, mas a adição excessiva pode resultar em um aumento da fragilidade e uma diminuição significativa da resistência à compressão [92,93].

Para abordar os problemas de diminuição de desempenho mecânico associados à incorporação direta, os investigadores têm explorado a otimização da formulação do PCM ou a introdução de aditivos modificadores para melhorar a compatibilidade entre o PCM e a matriz do material. Por exemplo, estudos recentes mostraram que o uso de aditivos nanométricos, como grafeno ou nanotubos de carbono, em compósitos com PCM pode aumentar significativamente as propriedades mecânicas e térmicas do betão. Paul et al. [94] adicionaram nanocarga híbrida de grafeno-prata no PCM, os resultados mostraram que foi observado um aumento máximo de 6.7% no calor latente e 5% na eficiência de armazenamento de calor para nanocompósitos com 0.3% em peso de aditivos. Além disso, a condutividade térmica das amostras foi aumentada em um máximo de 90% (de 0,2 W/mK - 0.39 W/mK) com dispersão de 0.3% em peso de nanocargas de grafeno-prata. Lu et al. [60] desenvolveram um novo compósito de cimento endurecido por deformação, combinando materiais de mudança de fase (PCM) ultrafinos (30 µm) e óxido de grafeno, com o objetivo de melhorar suas propriedades mecânicas e térmicas. Devido ao efeito de preenchimento microscópico do compósito PCM e à utilização de óxido de grafeno, o PCM ultrafino pode ser utilizado como um agregado ultrafino, melhorando o desempenho térmico do compósito sem comprometer a sua resistência à compressão. Então, a adição destes materiais em escala nanométrica não só melhora a condutividade térmica do material, mas também reforça a integridade estrutural.

Em suma, embora a incorporação direta seja uma técnica relativamente simples, manter o desempenho mecânico dos materiais ao mesmo tempo em que se alcançam boas propriedades térmicas continua a ser um desafio. Futuras pesquisas devem se concentrar em otimizar a seleção do PCM e as formas de incorporação, a fim de maximizar o desempenho dos materiais de construção.

2.7.2. Imersão

A técnica de imersão PCM é um método eficaz que combina materiais de construção porosos com PCM. Esta técnica utiliza a ação capilar dos materiais de construção para absorver PCM líquido em materiais porosos, permitindo que o PCM desempenhe sua função de armazenamento térmico. Estes materiais incluem blocos, placas de gesso, agregados porosos, entre outros, cuja estrutura porosa pode absorver uma certa quantidade de PCM [95]. Quando a temperatura ambiente varia, o PCM dentro do material sofre uma mudança de fase, absorvendo ou liberando calor latente, o que ajuda a regular a temperatura. Comparada a outros métodos de incorporação de PCM, a técnica de imersão é simples de operar e garante uma combinação mais eficaz entre os materiais porosos e o PCM, melhorando significativamente a capacidade de armazenamento térmico dos materiais de construção. No entanto, a questão da estabilidade e do vazamento do PCM permanece um dos principais desafios tecnológicos.

Nos últimos anos, têm surgido diversos casos práticos da aplicação da técnica de imersão. Sun et al. [96] investigaram o uso da técnica de imersão para incorporar PCM microencapsulado em blocos de betão. O estudo mostrou que o PCM microencapsulado foi eficazmente absorvido na estrutura porosa do betão e manteve boas propriedades de armazenamento e liberação de calor mesmo após muitos ciclos térmicos. Este exemplo destaca o potencial da técnica de impregnação em melhorar a eficiência térmica dos materiais de construção, reduzindo ao mesmo tempo o risco de vazamento de PCM. Além disso, Lachheb et al. [97] estudaram a combinação de PCM com tijolo poroso utilizando a técnica de imersão, visando a produção de materiais de construção sustentáveis. Os resultados mostraram que a alta porosidade do tijolo permitiu a absorção de uma quantidade significativa de PCM, enquanto garantiu uma boa estabilidade sob condições de alta temperatura. Esses casos demonstram o grande potencial da técnica de imersão para melhorar o desempenho térmico dos materiais de construção.

Em resumo, a técnica de imersão oferece uma solução simples e eficaz para a integração de PCM em materiais de construção. Pesquisas recentes mostram o enorme potencial dessa técnica no campo da eficiência energética na construção. Futuras investigações podem se concentrar em otimizar a estrutura porosa dos materiais e na escolha adequada de PCM para melhorar ainda mais a sua capacidade de

armazenamento térmico e estabilidade, enquanto resolvem questões como o vazamento do material.

2.7.3. Encapsulamento

A tecnologia de encapsulamento tem sido amplamente estudada e aplicada na área dos materiais de mudança de fase. Através da tecnologia de encapsulamento, é possível resolver eficazmente os problemas de vazamento e baixa condutividade térmica do PCM durante o processo de mudança de fase. Atualmente, as tecnologias de encapsulamento são divididas principalmente em duas categorias: microencapsulamento e macroencapsulamento, cada uma delas adequada para diferentes cenários de aplicação e requisitos. Para otimizar ainda mais as técnicas de encapsulamento, pesquisas recentes têm se concentrado na melhoria dos materiais de encapsulamento, no aumento da condutividade térmica e na redução do efeito de super-arrefecimento.

A técnica de microencapsulamento envolve o encapsulamento do PCM em uma casca de polímero ou material inorgânico, formando pequenas partículas com diâmetro geralmente entre 1 - 60 μm . Esta técnica aumenta significativamente a área superficial do PCM, acelerando o processo de troca térmica durante a mudança de fase. A microencapsulação é particularmente eficaz em aplicações de pequena escala, como em materiais de construção e em têxteis controladores de temperatura [62]. Refat e Mohammed [98] observaram que o PCM microencapsulado não apenas previne eficazmente o vazamento de PCM líquido, mas também mantém a estabilidade de seu desempenho de armazenamento de energia. Além disso, devido ao pequeno diâmetro das cápsulas, o PCM microencapsulado pode ser incorporado facilmente em materiais de construção, sem comprometer significativamente suas propriedades mecânicas.

No entanto, o microencapsulamento também enfrenta o desafio do fenômeno de super-arrefecimento [99,100], que ocorre quando o PCM não consegue completar a transição de fase mesmo após atingir a temperatura de fusão, reduzindo sua eficiência térmica. Liu et al. [101] estudaram o uso de agentes de nucleação no processo de microencapsulamento para mitigar o efeito de super-arrefecimento. A pesquisa mostrou que a adição de nanopartículas como agentes de nucleação pode reduzir eficazmente o super-arrefecimento e melhorar a eficiência da mudança de fase. Além disso, estudos recentes exploraram o uso de diferentes materiais de casca para aumentar a condutividade térmica e a estabilidade térmica. Por exemplo, Cheng et al. [102] usaram 3D grafeno como material de revestimento, o que aumentou significativamente a condutividade térmica do PCM e reduziu o risco de falha estrutural devido à expansão térmica.

A técnica de macroencapsulamento é usada principalmente em cenários que requerem armazenamento de energia térmica em grande escala e gestão de energia por longos períodos, como em materiais de construção e sistemas de armazenamento de energia industrial. Diferente da microencapsulação, o tamanho das cápsulas na macroencapsulação é geralmente superior a 1 cm, podendo ter formas variadas, como placas, tubos ou outros formatos geométricos [42]. Essa abordagem permite armazenar grandes volumes de PCM, aumentando a quantidade de energia armazenada em cada ciclo de mudança de fase. Rida et al. [103] demonstraram que o design do recipiente de encapsulamento afeta significativamente a eficiência da transferência de calor. A pesquisa mostrou que aumentar a área de superfície exposta em relação ao volume pode reduzir o tempo necessário para a fusão do PCM, aumentando a eficiência do sistema. Contudo, um dos principais desafios da macroencapsulação é a durabilidade e a resistência mecânica dos recipientes. Durante os ciclos de mudança de fase, a expansão e contração do PCM podem gerar tensões que o recipiente precisa suportar. Além disso, o envelhecimento dos materiais do recipiente após repetidos ciclos térmicos pode levar à degradação ou rachaduras, causando vazamento do PCM. Para lidar com esse problema, Hohlein et al. [104] propuseram o uso de cápsulas metálicas para aumentar a resistência mecânica e a estabilidade térmica dos recipientes. Esse design foi aplicado com sucesso em sistemas industriais de armazenamento de calor de alta temperatura e mostrou um bom desempenho em ciclos térmicos de longo prazo.

Pesquisas recentes mostram que com o avanço da ciência dos materiais, cada vez mais pesquisas estão focadas na incorporação de nanotecnologia para melhorar o desempenho dos materiais de encapsulamento de PCM. Por exemplo, Paneliya et al. [105] usaram nano-silica como material de encapsulamento, o que não só melhorou a condutividade térmica do PCM, mas também aumentou significativamente sua resistência ao vazamento. Além disso, os pesquisadores estão a explorar encapsulação de PCM multifásicos para permitir armazenamento de calor em diferentes faixas de temperatura, resultando em sistemas de armazenamento de energia multifuncionais. Suraj et al. [106] mostraram que o desempenho de trabalho do PCM pode ser efetivamente melhorado com o projeto de um sistema de embalagem de PCM.

Em suma, a tecnologia de encapsulamento desempenha um papel crucial na aplicação de PCM, especialmente na prevenção de vazamentos e na melhoria do desempenho térmico. As pesquisas atuais estão focadas em otimizar os materiais de encapsulamento, resolver o problema do super-arrefecimento e aumentar a resistência mecânica e a estabilidade térmica dos recipientes. O desenvolvimento futuro deve se concentrar no uso da nanotecnologia e de materiais compósitos para melhorar ainda mais a

condutividade térmica e a estabilidade de longo prazo dos PCM encapsulados, permitindo uma aplicação mais ampla em edifícios e sistemas de armazenamento de energia industrial.

2.7.4. Estabilização

A técnica de estabilização, surge como um método chave para a aplicação de PCM, combinando PCM com materiais ou estruturas de alta condutividade térmica para manter sua forma e estabilidade térmica durante o processo de mudança de fase. O objetivo principal desta técnica é evitar o vazamento de PCM durante sua fase líquida, ao mesmo tempo em que melhora a condutividade térmica através de materiais de suporte, o que a torna amplamente utilizada em áreas como a eficiência energética dos edifícios, armazenamento de energia e arrefecimento de dispositivos eletrônicos. O princípio da técnica de estabilização baseia-se no uso de materiais porosos ou polímeros como uma estrutura de suporte para alojar o PCM. Quando o PCM passa do estado sólido para o líquido, os materiais de suporte limitam o movimento do PCM, impedindo vazamentos. A estrutura porosa ou fibrosa desses materiais retém o PCM, enquanto sua alta condutividade térmica melhora a transferência de calor, aumentando a resposta térmica do sistema. Isso permite que o PCM absorva e liberte calor de maneira mais eficaz [107]. Por exemplo, a Figura 2.9 ilustra um método inovador no qual o agregado reciclado é utilizado como um suporte poroso para a absorção de PCM, permitindo sua incorporação eficiente no betão e este técnico utiliza neste doutoramento.

Pesquisas recentes demonstram que os materiais de suporte comumente utilizados incluem polietileno de alta massa volúmica (HDPE), borracha de estireno-butadieno (SBR) e outros polímeros [45]. Esses materiais não apenas oferecem alta resistência mecânica, mas também formam estruturas estáveis com o PCM, garantindo o seu desempenho ao longo de muitos ciclos térmicos. Yan et al. [108] mostraram que o uso de materiais compostos, como parafina combinada com polietileno, pode melhorar significativamente a capacidade de condução de calor e a estabilidade estrutural dos PCM. Lv et al. [109] estudaram o desempenho de nove tipos de PCM de forma estável à base de minerais, fornecendo uma referência para a seleção de suportes. Shen et al. [110] desenvolveram uma solução que combina xisto leve (XL) e parafina utilizando a técnica de impregnação. Os resultados experimentais mostraram que o xisto leve, após impregnação, absorveu 25.8% de PCM (com base no peso do xisto leve), melhorando a entalpia do betão térmico para 27.8 kJ/kg. Este estudo demonstrou que os agregados porosos tratados por impregnação não só possuem uma excelente capacidade de armazenamento térmico, mas também mantêm uma boa estabilidade estrutural nos materiais de construção.

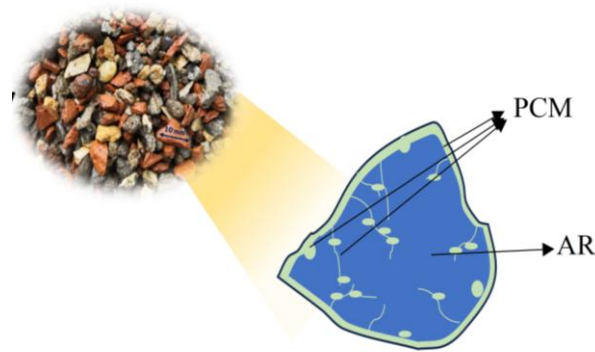


Figura 2.9 – Estabilização FCM por Agregado reciclado.

Avanços tecnológicos recentes indicam que a adição de materiais nanoestruturados melhorou significativamente o desempenho da técnica de estabilização. Pesquisas revelaram que nanopartículas como grafeno e nanotubos de carbono não só aumentam a condutividade térmica dos materiais compostos de PCM, mas também fortalecem as interfaces, reduzindo a expansão e contração durante as mudanças de fase e, assim, aumentando a estabilidade a longo prazo [80]. Por exemplo, Lu et al. [60] incorporaram folhas de grafeno em materiais compósitos de PCM não apenas reduzindo a condutividade térmica em 56.6%, mas também aumentando a capacidade de calor específica.

Em resumo, a técnica de estabilização, ao combinar PCM com materiais de alta condutividade térmica, resolve os problemas de vazamento durante a mudança de fase e aumenta a capacidade térmica e a estabilidade mecânica dos PCM. Pesquisas futuras devem focar na exploração de materiais nanoestruturados para otimizar a escolha dos materiais de suporte e o design estrutural, visando melhorar ainda mais a eficiência térmica e a confiabilidade a longo prazo.

2.8. PCM APLICADO EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Os PCMs, como uma nova forma de armazenamento de calor, despertaram ampla atenção devido ao seu potencial de aplicação na área da construção. A incorporação de PCM em materiais de construção não apenas melhora efetivamente o desempenho térmico dos edifícios, mas também aumenta significativamente o nível de eficiência energética, especialmente em projetos de construção passiva. Através das propriedades de mudança de fase do PCM, os materiais podem absorver ou liberar uma quantidade significativa de calor latente durante flutuações de temperatura ambiental, desempenhando um papel fundamental na estabilização da temperatura interna e, assim, reduzindo as necessidades de aquecimento e arrefecimento. Portanto, oferecem um importante caminho técnico para melhorar a eficiência energética dos edifícios e alcançar metas de redução de consumo de energia [51].

2.8.1. Argamassas

Cunha et al. [111,112] estudaram argamassas à base de diferentes ligantes (gesso, cal área, cal hidráulica e cimento) aditivadas com diferentes teores de microcápsulas de PCM (0%, 20%, 40% e 60%). Os estudos efetuados revelaram que relativamente às características mecânicas existiu uma diminuição no seu desempenho, devido à presença de uma maior quantidade de água nas argamassas no seu estado fresco, o que originou uma maior porosidade. Os mesmos autores realizaram um estudo relativo à durabilidade das argamassas à base de diferentes ligantes com incorporação de PCM, tendo observado que a presença do PCM tornou as argamassas mais suscetíveis de serem atacadas, o que se encontra relacionado com a facilidade que os agentes agressores possuem em penetrar na argamassa devido ao aumento da porosidade com a incorporação de microcápsulas de PCM. No entanto, durante o desenvolvimento do seu trabalho todas as argamassas apresentaram um comportamento satisfatório. Foi ainda possível verificar que as argamassas à base de cimento apresentaram um melhor comportamento quando aditivadas com PCM. Por outro lado, as argamassas à base de cal aérea apresentaram uma maior sensibilidade à incorporação de microcápsulas de PCM [113]. O comportamento térmico das argamassas foi também avaliado, baseado em leis de temperatura representativas de cada estação do ano para o clima português [114]. Com base neste estudo foi possível verificar que a utilização de microcápsulas de PCM originou uma diminuição das temperaturas máximas, um aumento das temperaturas mínimas, um desfasamento temporal significativo das temperaturas extremas e ainda uma redução das necessidades de aquecimento e arrefecimento. Sendo que na estação de primavera foi possível eliminar as necessidades de arrefecimento e na estação de outono foi possível eliminar as necessidades de aquecimento. Desta forma, foi possível concluir que a utilização de PCM em argamassas para revestimento interior permitiu não só diminuir as temperaturas extremas, assim como manteve a temperatura no interior dos edifícios estável por um período de tempo mais longo, traduzindo-se numa poupança efetiva de energia, uma vez que numa situação real o tempo de funcionamento de equipamentos de climatização seria menor.

A exposição das argamassas a elevadas temperaturas também foi avaliada pelo mesmo grupo de investigadores, tendo-se observado que a incorporação de PCM em argamassas diminui a sua resistência mecânica em todas as gamas de temperatura estudadas (20°C, 200°C e 600°C). As argamassas à base de cimento apresentaram uma menor sensibilidade à exposição a elevadas temperaturas, apresentando consequentemente um melhor desempenho. Por outro lado, as argamassas à base de cal aérea revelaram uma maior deterioração, apresentando um comportamento mais sensível. Este

comportamento foi semelhante ao identificado para as argamassas de referência, ou seja, sem incorporação de PCM [115]. Pelo que se pode concluir, que em termos de comportamento a elevadas temperaturas a incorporação de microcápsulas de PCM não prejudicou o comportamento das argamassas.

A utilização de PCM microencapsulado acarreta custos bastante elevados, devido ao tratamento que o material sofre durante o encapsulamento. Assim, a utilização PCM na sua forma livre, ou seja, não encapsulado, através da sua incorporação direta em argamassas foi alvo de estudo, uma vez que esta técnica permite desenvolver argamassas com capacidade de regulação térmica a um custo baixo. Deve notar-se que, a utilização de um PCM não encapsulado origina uma diminuição no custo de produção das argamassas, uma vez que é possível adquirir esta matéria-prima a um custo mais reduzido e o processo produtivo das argamassas pode ser simplificado. Cunha et al. [116] desenvolveram um estudo no qual aditivaram argamassas à base de cimento com PCM não encapsulado, ou seja na sua forma pura, tendo observado que a incorporação de PCM não encapsulado não causou alterações significativas nas principais propriedades das argamassas. Por outro lado, foi ainda possível observar que o PCM não se deslocou do interior da argamassa, ficando contido nos poros.

Ma et al. [117] prepararam uma mistura eutética binária de ácido esteárico (SA) e acetanilida (AA), tendo também adicionado grafite expandido na mistura, que desempenhou um importante papel no aumento da condutividade térmica. Esta mistura conduziu a uma temperatura de mudança de fase de 67.16 °C e um calor latente de mudança de fase de 176.14J/g. Por outro lado, foi ainda possível verificar que o armazenamento térmico do PCM não foi afetado mesmo após 100 ciclos térmicos. Kumar et al. [118] estudaram as propriedades físicas e mecânicas de argamassas incorporando diretamente diferentes teores de PCM. O aumento da quantidade de PCM, originou uma diminuição das propriedades físicas e mecânicas das argamassas, à semelhança do que já tinha sido reportado em outros estudos.

Antonella et al. [119] relataram que a absorção de água por capilaridade da argamassa contendo PCM foi reduzida em aproximadamente 37% em comparação com a argamassa convencional. Da mesma forma, Cunha et al. [93] investigaram a durabilidade de argamassas com 5%, 10% e 20% de PCM sob condições de baixa temperatura. Os resultados indicaram que o aumento do teor de PCM melhorou a resistência ao ciclo de gelo-degelo, sendo que a argamassa com 20% de PCM apresentou falha após 65 ciclos, enquanto a argamassa sem PCM se deteriorou após apenas 22 ciclos. Essa melhoria é atribuída à capacidade do PCM de bloquear fisicamente os poros internos da argamassa, aumentando assim sua durabilidade.

2.8.2. Betão

Alguns estudos têm vindo a ser desenvolvidos para betões com o intuito de ser aplicados em paredes. Cabeza et al. [120] utilizaram a técnica de microencapsulação para aplicação de PCM em paredes de betão, tendo obtido um betão com uma resistência à compressão de 25 MPa e uma resistência de flexão de 6 MPa. O trabalho consistiu em construir uma célula de teste com dimensões de $2 \times 2 \times 3 \text{ m}^3$ para observar o seu desempenho térmico, tendo sido possível verificar que a flutuação da temperatura no interior da célula de teste com incorporação de PCM foi mais estável, comparativamente à célula de teste de referência, ou seja, sem incorporação de PCM. Mais tarde, os mesmos autores construíram e monitorizaram o comportamento de células de teste em betão, com e sem incorporação de 5% em massa de microcápsulas de PCM. O betão com incorporação de PCM foi utilizado na cobertura e nas paredes Sul e Oeste. Durante o verão e sem ventilação, foram registados 3°C de diferença na temperatura superficial máxima da parede Oeste, com um desfasamento temporal de 2 horas [121]. Posteriormente, Bahrar et al. [122] estudaram a incorporação de microcápsulas de PCM em painéis de betão, observando um aumento na capacidade de armazenamento de calor e na inércia térmica.

A aplicações de betões com incorporação de PCM para pavimentos também foram alvo de estudo. Entrop et al. [123] efetuaram uma investigação, na qual incorporaram PCM no betão constituinte do pavimento. Para tal foram realizadas quatro células de teste totalmente isoladas, com uma janela voltada a sul através da qual a radiação solar podia entrar. O PCM selecionado para a aplicação experimental foi uma parafina, com ponto de fusão de 22°C , fornecido pela BASF, designado de Micronal DS 5008 X. As células de teste foram monitorizadas de forma contínua, sendo a recolha de dados efetuada através de termopares, com um intervalo de amostragem de 5 minutos. A realização desta investigação permitiu concluir que a aplicação de PCM no pavimento originou uma redução da temperatura máxima de cerca de 16% e um aumento da temperatura mínima de cerca de 7%.

Alguns investigadores utilizaram agregados para absorver PCM em materiais de construção, a fim de obter boas propriedades térmicas em vários projetos. Wang et al. [124] sintetizaram dois tipos de agregados de armazenamento térmico usando o método de PCM na forma estável, empregando diatomita e ceramite como materiais de suporte, respetivamente. Uma camada protetora foi formada na superfície do agregado térmico pulverizando adesivo Guerqi 901. O compósito de PCM consistia em três ácidos graxos: 55.2% de ácido láurico, 24.8% de ácido mirístico e 20% de ácido palmítico em massa, com a adição de 7% de pó de grafite para melhorar a condutividade térmica para $0.3966 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. O PCM apresentou uma temperatura de transição de 31.1°C e um calor latente de 155 J/g . Diatomita e

ceramite demonstraram tamanhos de poros médios de 187.3 nm e 647.6 nm, com porosidades de 66.88% e 66.76%, respetivamente. O betão com incorporação de 100% de agregados térmicos de ceramite ou diatomita exibiu uma redução nas flutuações de temperatura ambiente em comparação com o betão normal, com reduções de até 5.74°C e 5.94°C durante os períodos de aquecimento e arrefecimento, respetivamente.

Sukontasukkul et al. [125] desenvolveram um betão leve térmico, no qual o agregado leve apresentava uma massa volúmica de 732 kg/m³ e uma taxa de absorção de água de 17.5%. O polietilenoglicol (PEG), um tipo de PCM, com temperatura de transição em torno de 42 - 46°C e um calor latente de 155 J/g, foi impregnado nos agregados leves porosos a uma taxa de até 24% em peso. A capacidade de armazenamento de calor latente do betão aumentou em 64% com a incorporação de agregados leves térmicos, variando de 25% a 100%. Notavelmente, o betão com 100% de agregado leve térmico apresentou um teor de PCM de 7.8% do peso total do betão, resultando em um calor latente de 7722 J/kg.

Farnam et al. [5] introduziram uma abordagem inovadora para remoção de neve e gelo através do desenvolvimento de pavimentos de betão térmico utilizando PCM. Duas metodologias distintas foram empregadas: a integração de PCM em forma estável usando agregado de xisto expandido, e a encapsulação de PCM dentro de tubos metálicos embutidos durante a moldagem do betão. A eficácia dos compósitos de betão com PCM em aplicações de derretimento de neve foi comprovada através de simulações experimentais abrangentes. Especificamente, o método de encapsulamento resultou em um betão capaz de liberar calor rapidamente, enquanto o uso de PCM na forma estável facilitou a dissipação de calor ao longo de uma faixa de temperatura mais ampla, permitindo uma liberação gradual e sustentada de calor. Ambas as metodologias produziram composições de betão com notáveis capacidades de derretimento de neve, destacando a versatilidade e eficácia dos compósitos de betão com PCM em aplicações de remoção de neve.

2.8.3. Placas de gesso cartonado

Desde 1990 vários estudos têm sido desenvolvidos relativamente à incorporação de PCM em placas de gesso cartonado. Athienitis et al. [126] realizaram uma campanha experimental e numérica, com materiais de mudança de fase incorporados em placas de gesso, aplicadas nas paredes de um edifício. Demonstrando, uma diminuição da temperatura ambiente máxima em cerca de 4°C. Alguns anos mais tarde, Shilei et al. [127] também efetuaram estudos com PCM incorporado em placas de gesso, com 9.5

mm de espessura e 26% de PCM, com temperatura de transição de 17.9°C a 20.3°C. A investigação permitiu verificar uma menor oscilação de temperatura, nas células de teste tratadas com PCM. Mais tarde, os mesmos autores [128] desenvolveram também placas de gesso cartonado com incorporação de um PCM para a aplicação na superfície de uma parede comum numa sala de teste, a fim de diminuir a carga de arrefecimento. Efetuando uma comparação entre a sala construída com a parede com PCM e a sala de referência, verificaram que a aplicação de PCM foi eficaz na redução do custo de energia despendida através da redução de utilização de sistemas de arrefecimento.

2.8.4. Tijolos e Blocos

A incorporação do PCM em tijolos resultou num aumento da resistência térmica, reduzindo o fluxo de calor. O PCM atuou como armazenador térmico [95]. Os materiais de mudança de fase podem ser incorporados através de uma solução de macroencapsulamento, preenchendo as áreas vazias dos tijolos. Um estudo experimental para a aplicação de PCM macroencapsulado em tijolos convencionais e alveolares para arrefecimento passivo de edifícios foi realizado por Castell et al. [129]. Várias células de teste foram construídas e testadas com os dois materiais, com e sem incorporação de PCM. As células de teste possuem uma bomba de calor como sistema de arrefecimento e o consumo de energia foi registado para determinar a economia de energia obtida. Os resultados obtidos permitiram observar que o PCM pode reduzir as temperaturas máximas até 1°C e suavizar as flutuações diárias. Além disso, no verão de 2008, o consumo de energia elétrica foi reduzido nos compartimentos com PCM em cerca de 15%. Saxena et al. [130] estudaram o impacto da incorporação de PCM em tijolos para as condições climáticas de Delhi. Neste estudo foram avaliados dois tipos de PCM (Eicosano e OM35). Foi possível observar uma redução de temperatura entre 5 - 6 °C nos tijolos aditivados com PCM, comparativamente com um tijolo convencional e uma redução no fluxo de calor em 8% e 12% para o Eicosano e o OM35, respetivamente.

Mohamed et al. [97] resumiram as diferentes técnicas utilizadas para integrar PCM em tijolos. Além disso, investigaram o impacto de fatores específicos, como o tipo, a localização e a quantidade de PCM integrado nas paredes de tijolos, no aumento da eficiência energética dos edifícios e no conforto térmico interior. Os resultados demonstraram que o uso de materiais de mudança de fase em paredes de tijolos é uma tecnologia promissora, capaz de reduzir as flutuações de temperatura interior e economizar energia.

CAPÍTULO

3. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

3.1. INTRODUÇÃO

O rápido desenvolvimento da urbanização global, como por exemplo a taxa de urbanização da China que aumentou de 17.92% em 1978 para 63.89% em 2020 [131], os Estados Unidos da América e a União Europeia que também apresentaram uma elevada taxa de urbanização, cerca de 82.67% e 74.96% em 2020 [54], tem vindo a também contribuir para o rápido desenvolvimento da indústria da construção e, ao mesmo tempo, para uma elevada produção de resíduos de construção e demolição (RCD). Desta forma, a quantidade de RCD aumenta ano após ano. Do ponto de vista da sua composição os RCD, incluem principalmente misturas betão, argamassa, metal, cerâmicos, agregados, tijolos, vidro, plástico, etc. Os três principais países ou regiões produtores de RCD incluem a China, que produz aproximadamente 2.3 bilhões de toneladas por ano [132], os Estados Unidos, que produziram 600 milhões de toneladas em 2018 e os 28 países da União Europeia, totalizando 807 milhões de toneladas em 2020 [13]. De acordo com as estatísticas da Agência portuguesa do ambiente [133], a quantidade de resíduos de construção e demolição gerados em 2023 foi cerca de 4 milhões toneladas. É de notar que a disposição em aterro de RCD não só ocupa uma grande área de terra, mas também causa danos ecológicos. Por outro lado, a simples deposição ao ar livre dos RCD leva à infiltração de substâncias nocivas no solo, acelera a erosão do solo, causa efeitos químicos e físicos adversos, prejudica a qualidade do solo e polui as fontes de água próximas [134]. Assim, a gestão e a reutilização dos RCD apresentam desafios significativos tanto para o meio ambiente quanto para a sociedade.

Nesse contexto, a reciclagem e reutilização dos RCD surge como uma estratégia importante para mitigar os problemas associados aos resíduos de construção. A transformação dos RCD em recursos reutilizáveis permite não só reduzir a extração de materiais naturais, como também minimizar a ocupação de aterros sanitários e seu impacto ambiental. Em particular, a reciclagem de betão [135–138] destaca-se como uma aplicação promissora no setor de materiais de construção. Através de um tratamento adequado, os RCD podem ser utilizados na produção de argamassa [139–141], tijolos [142,143], blocos [144,145], paisagismo em montanhas [146], etc., revelando o potencial diversificado desses resíduos.

O processo de reciclagem dos RCD geralmente envolve etapas como coleta, triagem, britagem e peneiramento. Inicialmente, os resíduos de construção são transportados para centrais de processamento, onde passam por uma separação para identificar os materiais reutilizáveis. Posteriormente, o betão e outros resíduos são triturados para produzir agregados reciclados (AR) de diferentes tamanhos. Esses agregados são então utilizados no fabrico de betão ou em obras de pavimentação, dependendo da sua composição e características granulométricas [147]. Estudos indicam

que a utilização de agregados reciclados pode reduzir a necessidade de materiais naturais e aliviar a pressão sobre os aterros. No entanto, a taxa de reciclagem dos RCD varia consideravelmente entre países. Enquanto na União Europeia e nos Estados Unidos as taxas de reciclagem superam 90% e 76% [13,148], respetivamente, na China, um dos maiores produtores de RCD, a taxa de reutilização ainda é relativamente baixa, cerca de 10% [149]. Portanto, aumentar a taxa de reciclagem destes resíduos torna-se uma prioridade para o setor da construção em várias regiões.

Apesar de seu potencial de reciclagem, os RCD apresentam certas limitações em termos de desempenho físico e químico em comparação com os materiais naturais. Os agregados reciclados tendem a apresentar maior absorção de água e porosidade, o que pode impactar as propriedades do betão, como sua trabalhabilidade e durabilidade. Além disso, a forma irregular dos grãos pode comprometer a fluidez e a compactação do betão. Para superar essas limitações, grupo de investigação têm desenvolvido métodos de tratamento para melhorar a qualidade dos agregados reciclados, como técnicas de limpeza e o aumento da proporção de materiais cimentícios. Mesmo com essas restrições, estudos mostram que, quando corretamente processados, os RCD podem substituir parcialmente ou completamente os agregados naturais na produção de betão, argamassa e outros materiais de construção. Em aplicações como camadas de base de estradas ou elementos não estruturais, o uso de RCD tem demonstrado viabilidade econômica e vantagens ambientais.

As principais aplicações dos RCD estão concentradas no fabrico de materiais de construção e em obras de infraestrutura [136,150–153]. Agregados reciclados são amplamente utilizados como matéria-prima na produção de betão, sendo empregados em estradas, pontes e edifícios. Além disso, os RCD podem ser incorporados em tijolos, materiais de pavimentação e muros de contenção. Em projetos de infraestruturas rodoviárias, o uso de betão reciclado como base de pavimentos tem mostrado vantagens em termos de custo e durabilidade [154]. Nos últimos anos, com o crescente enfoque no desenvolvimento sustentável, o uso de RCD no setor da construção tem ganho imenso destaque. Muitos países implementaram políticas que incentivam a substituição de materiais convencionais por RCD, promovendo a redução de resíduos e a reutilização de recursos. Nações como Portugal, China e os Estados Unidos têm desenvolvido sistemas de reciclagem mais sofisticados, impulsionando o reaproveitamento dos RCD em larga escala.

Os RCD, quando tratados como recursos reutilizáveis, possuem um enorme potencial de aplicação. Embora suas propriedades de desempenho precisem ser aprimoradas, com técnicas adequadas de processamento, esses resíduos podem substituir materiais naturais em diversas obras de construção. À

medida que o setor da construção avança em direção a práticas mais sustentáveis, a reciclagem e reutilização dos RCD irá desempenhar um papel fundamental na preservação ambiental e na economia de recursos naturais.

3.2. RECICLAGEM RCD

Atualmente, existem vários edifícios com diferentes formas, estruturas e materiais em diferentes regiões e países, resultando na geração de um grande número de diferentes tipos de resíduos de construção. Estudos realizados por pesquisadores em todo o mundo mostraram que muitos resíduos de construção e demolição são compostos principalmente por betão, argamassa, tijolos, plástico, vidro, papel, madeira e metal [155–158]. Com o contínuo crescimento das atividades de construção em todo o mundo, a gestão eficaz e a reciclagem desses materiais de resíduos tornaram-se o foco de atenção tanto da academia quanto da indústria da construção. Para transformar os RCD em recursos reutilizáveis, atualmente são aplicados dois processos principais de reciclagem: o uso de máquinas de reciclagem RCD móveis e as instalações de reciclagem RCD fixas. Esses dois métodos são capazes de transformar os materiais de construção demolidos em agregados de menor tamanho [137,159].

3.2.1. Reciclagem RCD móveis

A maquinaria de reciclagem móvel é um método eficaz para o tratamento no local de RCD, capaz de transformá-los em agregados reciclados para utilização posterior na construção (Figura 3.1). Este método não só reduz a necessidade de transporte, diminuindo assim os custos gerais da obra, mas também melhora, em certa medida, a eficiência do uso de recursos. No entanto, estudos mostram que a qualidade desses agregados reciclados geralmente não é satisfatória, pois os agregados separados costumam conter diversos resíduos não totalmente processados, o que afeta seu desempenho nas aplicações de engenharia [13,160]. O processo de tratamento de agregados reciclados pela maquinaria de reciclagem móvel é tipicamente dividido em três etapas principais [161]:

Primeiro, secção de entrada: Nesta fase, os RCD são primeiramente pré-separados para retirar aqueles resíduos que não podem ser processados mecanicamente ou que contêm elementos contaminantes. Este processo é crucial, pois garante a qualidade e a adequação dos materiais que entrarão nas etapas de tratamento subsequentes. Os materiais utilizáveis são então encaminhados para a entrada, preparando-os para os próximos passos.

Segundo, secção de trituração: Esta etapa envolve a trituração e a separação magnética, visando reduzir

o tamanho dos agregados e remover as impurezas ferrosas. O processo de trituração ajuda a converter resíduos de grande porte em agregados de menores dimensões adequados para aplicações futuras, enquanto a tecnologia de separação magnética é empregue para remover eficazmente materiais ferromagnéticos, aumentando ainda mais a pureza dos agregados.

Terceiro, secção de triagem e saída: Finalmente, os agregados tratados por trituração e separação magnética passam por uma plataforma de triagem abrangente, onde são classificados em diferentes tamanhos. Especificamente, os agregados são tipicamente divididos em pequenas dimensões (0-5 mm), dimensões médias (5-20 mm) e grandes dimensões (20-40 mm). Os agregados que excedem 40 mm devem ser submetidos a um tratamento adicional de trituração nesta etapa, até que atendam aos requisitos específicos de tamanho de partícula. Este processo assegura que diferentes tipos de agregados reciclados possam ser adequadamente alocados conforme as demandas das aplicações práticas.

Através dessas etapas, a maquinaria de reciclagem móvel não apenas oferece uma solução viável para o tratamento eficaz dos RCD, mas também estabelece uma base para promover o desenvolvimento sustentável e a reutilização de recursos na indústria da construção. Apesar dos desafios enfrentados, melhorar a qualidade e a gama de aplicações dos agregados reciclados continua a ser uma direção importante da pesquisa atual.

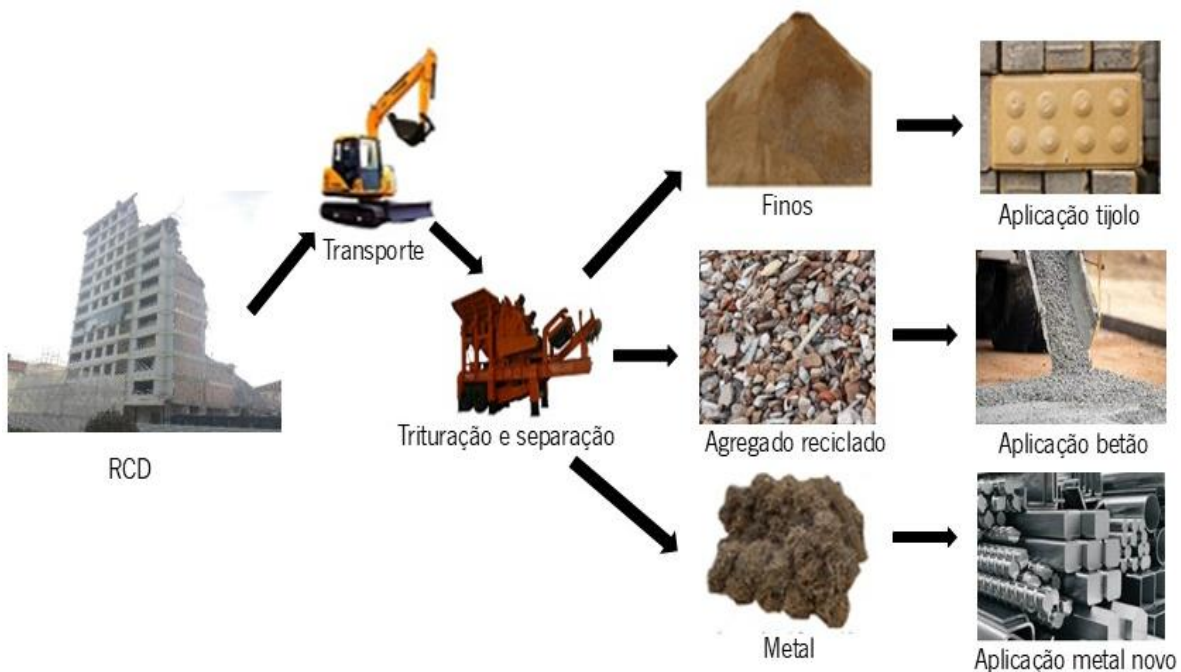


Figura 3.1 – Estações móveis de reciclagem e processamento de RCD.

3.2.2. Reciclagem RCD fixas

Em comparação com os equipamentos de reciclagem móveis, as instalações de reciclagem fixas apresentam capacidades de processamento superiores no tratamento de resíduos de construção e demolição (RCD). Após múltiplas etapas de classificação, trituração e separação, os agregados processados nas instalações fixas apresentam qualidade significativamente superior em relação àqueles processados por máquinas móveis. Essa diferença se manifesta em vários aspectos: em primeiro lugar, os agregados reciclados produzidos nas plantas fixas têm um teor de impurezas menor, o que contribui para melhorar o desempenho dos materiais de construção, tais como o betão. Em segundo lugar, os agregados processados demonstram melhor estabilidade, apresentando maior durabilidade e resistência à compressão, atendendo assim às rigorosas exigências do setor da construção. Além disso, estes agregados satisfazem melhor as exigências de distribuição de tamanho de partículas, mostrando uma maior adaptabilidade. A Figura 3.2 ilustra o processo de trabalho de uma instalação de reciclagem fixa, que é composta por quatro etapas principais:

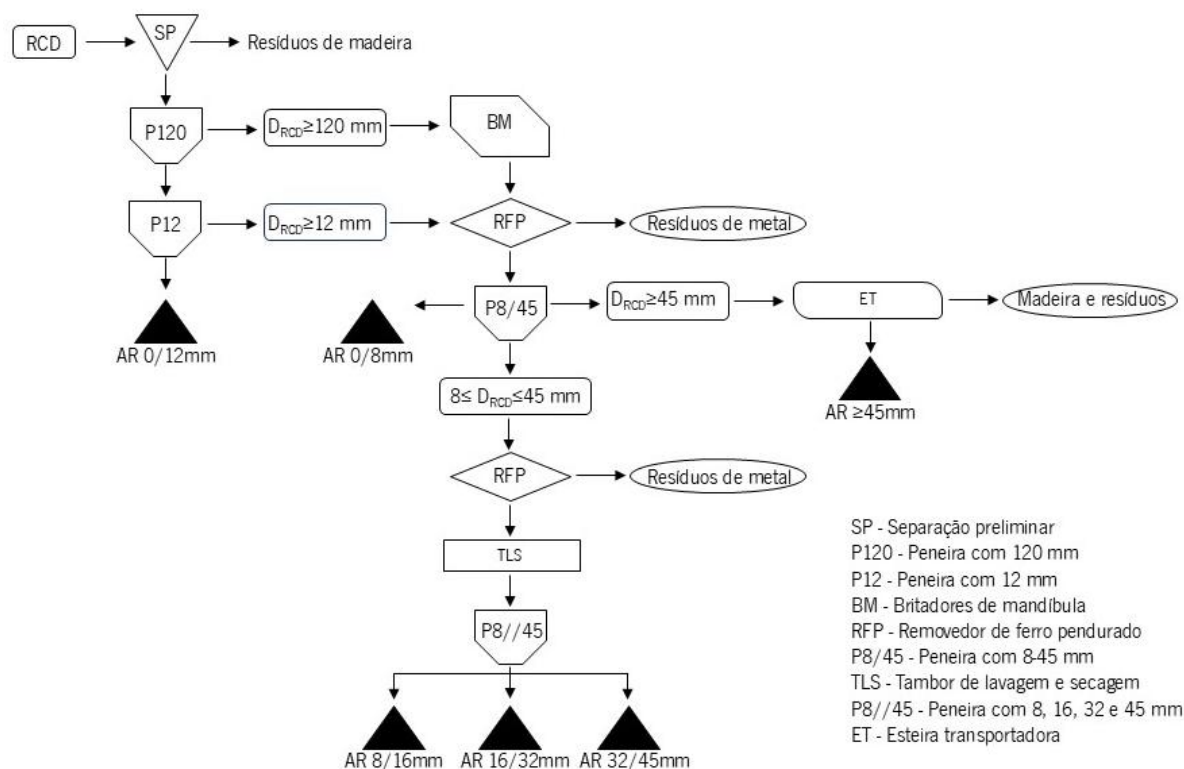


Figura 3.2 – Processo de reciclagem RCD fixas.

Primeiro, tratamento preliminar: esta fase inclui o processo de entrada de resíduos, remoção de solo, trituração preliminar e separação magnética. Neste processo, os resíduos são tratados sistematicamente para remover pequenas partículas e metais, enquanto se reduz o tamanho dos resíduos.

Segundo, separação manual: nesta etapa, a remoção de grandes peças de metal, madeira, plásticos ou papel que podem afetar a qualidade do agregado reciclado é realizada principalmente por meio de separação manual, garantindo que os agregados obtidos apresentem um desempenho adequado.

Terceiro, trituração secundária: nesta fase, os resíduos passam por trituração secundária para reduzir ainda mais o seu tamanho e remover o ferro remanescente, garantindo a consistência e pureza do produto.

Quarto, triagem de produtos finais: finalmente, o sistema separa os agregados processados conforme as diversas aplicações: pequenas dimensões (0-8 mm), dimensões médias (8-16 mm, 16-32 mm, 32-45 mm) e grandes dimensões (superiores a 45 mm). É importante notar que os agregados com dimensões superiores a 45 mm devem ser triturados novamente (terceira etapa) para garantir que atendam aos requisitos de tamanho de partículas, aumentando assim seu valor em aplicações de construção [162].

A Tabela 3.1 apresenta uma comparação entre os dois processos de reciclagem de RCD, oferecendo uma base útil para investigadores e intervenientes da indústria da construção para a seleção das estratégias de reciclagem. Através da análise comparativa, as plantas de reciclagem fixas, devido à sua capacidade de processamento e à qualidade do produto, estão cada vez mais a tornarem-se a escolha predominante na gestão de resíduos de construção, proporcionando um suporte eficaz para a realização dos objetivos do desenvolvimento sustentável.

Tabela 3.1 – Comparação de dois métodos de reciclagem RCD.

	Reciclagem RCD móveis	Reciclagem RCD fixas
Nível do processo de reciclagem	Simples	Completo
Tipos de equipamentos incluídos	Pouco	Muito
Formas de produção do produto final	Único	Variação
Nível de custo de produção	Moderado	Alto
Qualidade dos agregados reciclados	Baixa	Alta
Âmbito de aplicação	Restrito	Amplo

Além disso, com base na comparação dos dois processos de tratamento de resíduos de construção mencionados anteriormente, fica claro que tanto os métodos de reciclagem móveis quanto os fixos envolvem múltiplos processos complexos de trituração, separação e remoção de impurezas. Pesquisas anteriores demonstram que cada uma dessas etapas pode influenciar significativamente a qualidade final

dos agregados reciclados [163,164]. Especificamente, o processo de trituração afeta diretamente o tamanho das partículas e a forma dos agregados, enquanto a eficácia da separação e remoção de impurezas determina a pureza e as características de desempenho do agregado. Won et al. [165] demonstraram que com o aumento das etapas de trituração e separação, o teor de partículas de tamanho reduzido nos agregados reciclados aumenta, a massa volúmica do agregado aumenta e a taxa de absorção de água diminui, o que indica que os agregados reciclados passam a apresentar melhores propriedades físicas. No entanto, em comparação com os agregados naturais, os agregados reciclados ainda apresentam qualidade inferior, caracterizando-se por uma massa volúmica menor e maior capacidade de absorção de água [166–168]. Essa discrepância de qualidade tornou-se um ponto de foco na academia, incentivando pesquisadores a investigar suas causas subjacentes.

Uma das principais razões para a baixa qualidade dos agregados reciclados é a presença persistente de argamassa original aderida à superfície do agregado, mesmo após várias etapas de trituração e separação [169]. Estudos revelam uma forte correlação negativa entre a presença dessa argamassa aderida e as propriedades físicas do agregado, especialmente em termos de absorção de água e massa volúmica, o que tem sido amplamente reconhecido e utilizado como base para pesquisas que visam melhorar o desempenho dos agregados reciclados.

Para aprimorar a qualidade desses agregados, diversos investigadores têm proposto métodos inovadores para remover a argamassa aderida. Essas técnicas incluem métodos mecânicos, como atrito térmico, moagem excêntrica rotativa, moagem em espiral e moinhos de tambor rotativo [170], bem como métodos químicos e biológicos, como lavagem ácida, moagem com esferas [171], tratamento com microrganismos [172] e a carbonatação dos agregados reciclados [173]. Kim et al. [174] desenvolveram uma abordagem que combina métodos mecânicos e químicos, utilizando esferas de aço para a remoção mecânica da argamassa e ácido para a remoção química. Os resultados experimentais mostraram que a massa volúmica dos agregados tratados foi de 2.51 g/cm^3 e a taxa de absorção de água de 2.3%, atendendo aos critérios de qualidade de massa volúmica superior a 2.2 g/cm^3 e absorção inferior a 5%. Cho et al. [175] investigaram o efeito da precipitação microbiana de carbonato em agregados finos reciclados, descobrindo que a superfície dos agregados foi coberta com precipitado de carbonato de cálcio, o que contribuiu para o aumento da massa volúmica e a redução da absorção de água dos agregados reciclados sob as condições propostas.

Em resumo, o processo de reciclagem afeta diretamente a qualidade dos agregados reciclados, e é essencial que os equipamentos e métodos de reciclagem sejam aprimorados no futuro. É importante

destacar que, no processo de reciclagem de RCD, seja por meio de instalações fixas ou móveis, o tratamento dos resíduos exige um procedimento rigoroso que inclui etapas detalhadas de triagem, trituração e peneiramento. Dentro desse quadro processual, emerge um fenômeno importante: o aumento de fissuras, que resulta na elevação da porosidade ou da capacidade de absorção de água dos agregados.

3.3. AGREGADO RECICLADO

Após o RCD passar por uma série de processos de trituração, são obtidos agregados de diferentes tamanhos de partículas. Existem diferenças óbvias no desempenho e nos efeitos de aplicação dos agregados reciclados.

3.3.1. Propriedades do Agregado Reciclado

3.3.1.1 Forma e Distribuição do Agregado Reciclado

A forma dessas partículas do agregado reciclado difere significativamente dos agregados naturais. Normalmente, os agregados naturais apresentam uma forma mais arredondada e menos pontiaguda, enquanto o agregado reciclado (AR) contém uma menor quantidade de partículas em formato de agulha ou lamela, em comparação com os agregados naturais. Essa diferença de forma é principalmente influenciada pela colisão e pelo descascamento ocorridos durante o processo de trituração, bem como pela localização da superfície de fratura. Nos agregados naturais, a superfície de fratura geralmente está localizada dentro da rocha, enquanto, nos agregados reciclados, a fratura ocorre na camada de argamassa, o que dispersa os pontos de tensão dentro da rocha. Isso facilita a formação de partículas com uma forma mais arredondada, resultando em um menor conteúdo de partículas em formato de agulha [155].

A superfície dos AR geralmente apresenta uma forma rugosa e irregular, caracterizada por diversos cantos e um perfil ligeiramente achatado. Além disso, o impacto da trituração mecânica causa danos aos ARs, levando à formação de múltiplas microfissuras internas dentro do agregado (Figura 3.3) [176,177]. A formação dessas microfissuras nos agregados não é apenas atribuída à compressão e colisão durante o processo de trituração do betão, mas também pode ser influenciada por vários outros fatores. Um exemplo é a possível reação álcali-agregado ocorrida dentro das estruturas ou componentes do betão original antes de sua demolição [176]. Essas microfissuras podem afetar significativamente as suas propriedades mecânicas e a durabilidade, uma vez que aumentam sua porosidade e capacidade

de absorção de água, o que pode impactar negativamente o desempenho do betão reciclado.

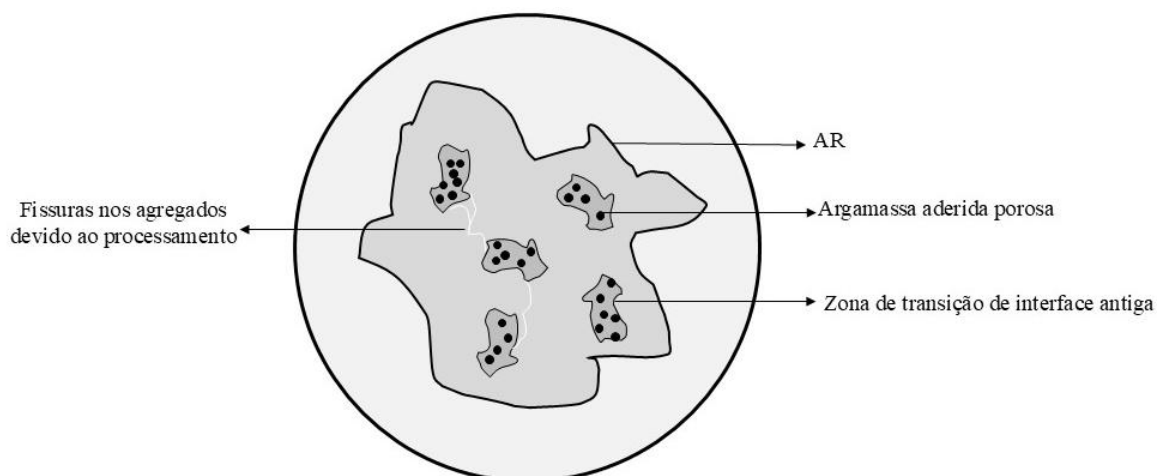


Figura 3.3 – Representação pictórica de AR no betão.

Gorjina et al. [178] obtiveram AR a partir de vigas de betão armado submetidas a ensaios de compressão em laboratório. A estrutura superficial dos agregados naturais e reciclados foi observada, sendo a estrutura microscópica examinada sob um microscópio eletrónico. Os resultados demonstraram que a rugosidade superficial dos ARs é superior à dos agregados naturais, devido à presença de cimento hidratado antigo ou de argamassa não hidratada em sua superfície, que estão não rigidamente aderidos. Além disso, foram observados vazios significativos e grandes poros no agregado reciclado, resultando em um aumento da porosidade. Por exemplo, durante o processo de britagem de RCD, a separação entre o agregado e a argamassa leva à formação de poros na superfície do agregado.

Em comparação com o AR grosso, o AR fino possui um tamanho de partícula menor, abrigando assim uma maior proporção de argamassa cimentícia desgastada e fissuras. Consequentemente, sua microestrutura torna-se mais intrincada em comparação à do AR grosso, exercendo inevitavelmente uma influência sobre a microestrutura e o desempenho geral do betão com AR. Uma vez que a estrutura do AR, como a porosidade, a argamassa aderida, a zona de transição de interface e as fissuras, tornam o betão mais complexo. Além disso, esses são fatores importantes que influenciam as propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade do betão.

3.3.1.2 Massa volúmica e absorção de água do Agregado Reciclado

A massa volúmica refere-se à massa por unidade de volume de um material, sendo uma característica física fundamental que influencia diretamente o desempenho mecânico, as propriedades físicas e a durabilidade dos materiais. A massa volúmica de um material não só determina seu comportamento

estrutural, como também impacta aspetos como capacidade de carga, estabilidade e requisitos de durabilidade em projetos de construção. Estudos demonstram que, em comparação com os agregados naturais, os agregados reciclados geralmente apresentam massa volúmica inferior, principalmente devido à sua estrutura porosa, o que aumenta a sua porosidade interna e, consequentemente, reduz a sua massa volúmica. Além disso, a massa volúmica dos agregados reciclados é influenciada por fatores diretamente relacionado com o betão original, tais como: classe de resistência, composição, tempo de vida, ambiente de aplicação e região geográfica onde foi aplicado [6].

Gorjinia et al. [178] apresentaram que a massa volúmica do agregado reciclado é aproximadamente 20% menor do que a dos agregados naturais, fenómeno atribuído à camada de argamassa antiga que adere aos agregados naturais. Essa camada, que geralmente possui alta porosidade, contribui para a massa volúmica reduzida dos agregados reciclados. Observou-se ainda que a massa volúmica dos agregados reciclados tende a diminuir à medida que a resistência do betão original se reduz ou que aumenta o número de ciclos de reciclagem do agregado. Xu et al. [179] estudaram a massa volúmica de agregados reciclados e constataram que a sua massa volúmica não atinge o padrão dos agregados naturais. No entanto, devido à baixa massa volúmica, os agregados reciclados podem contribuir para a redução do peso de estruturas, o que apresenta uma vantagem potencial para o design sísmico em regiões sujeitas a terremotos. Zhu et al. [180] investigaram o desempenho de agregados reciclados ao longo de múltiplos ciclos de reciclagem e identificaram que a qualidade do agregado reciclado de terceira geração era significativamente inferior à dos agregados naturais, com uma deterioração progressiva à medida que o número de ciclos aumentava. Este fenómeno pode ser explicado pelo aumento da quantidade de argamassa aderida à superfície dos agregados reciclados com o avanço dos ciclos de reciclagem, o que resulta em uma maior porosidade e, consequentemente, afeta as propriedades físicas do agregado reciclado. Além disso, o aumento da camada de argamassa aderida eleva a taxa de absorção de água e reduz a massa volúmica do agregado, impactando o desempenho do betão reciclado, especialmente no que se refere à durabilidade a longo prazo.

A absorção de água é um importante indicador para avaliar a quantidade de água absorvida por unidade de área e unidade de tempo, e exerce uma influência profunda nas propriedades dos materiais. A superfície dos agregados reciclados geralmente apresenta uma camada de argamassa antiga aderida, o que aumenta sua rugosidade. Além disso, durante o processo de reciclagem e britagem, surgem numerosas microfissuras no interior dos agregados reciclados, resultando em uma absorção de água significativamente maior do que a observada nos agregados naturais [181]. Chen et al. [182] realizaram

um estudo sobre a absorção de água em agregados reciclados com tamanhos de partículas entre 4.75 e 31.5 mm, e os resultados indicaram que a absorção de água aumenta à medida que o tamanho das partículas dos agregados diminui. Esse fenômeno pode ser explicado pelo aumento da área superficial específica com a diminuição da distribuição de tamanho dos agregados reciclados. Zhu et al. [180] exploraram a absorção de água de agregados reciclados de diferentes gerações e verificaram que sua capacidade de absorção diminui com o aumento do número de ciclos de reciclagem. Além disso, Gorjinia et al. [178] revelaram que a absorção de água de agregados reciclados, de pequenas e grandes dimensões, extraídos de betões com resistência à compressão de 30 MPa, é significativamente superior em comparação com os agregados comuns, sendo cerca de 11.5 vezes maior para agregados de grande dimensões e 3.5 vezes maior para agregados de pequenas dimensões.

De forma geral, a massa volúmica e a absorção de água dos agregados reciclados estão estreitamente relacionadas à sua estrutura porosa, sendo que as fissuras formadas durante o processo de britagem intensificam ainda mais a absorção de água. Essa característica de elevada absorção e baixa massa volúmica torna o betão reciclado mais absorvente e menos denso em comparação com o betão, afetando negativamente as propriedades físicas globais do betão. A Tabela 3.2 apresenta a massa volúmica e a absorção de água de agregados reciclados em diferentes estudos.

Tabela 3.2 – Massa volúmica e absorção de água do AR em alguns estudos

Autores	Tipo de AR	Dimensão (mm)	Massa volúmica (kg/m ³)	Absorção de água (%)
Majhi et al. [183]	Betão	20	2530	4
Simsek et al. [184]	Betão	4-11.2	2420	4.79
		11.2-22.4	2380	4.96
Bogas et al. [185]	Betão	4-11.2	1735	15.7
	Betão leve		878	24.9
Bendimerad et al. [186]	Betão	4-10	2340	5.3
		10-20	2320	4.9
Kazmi et al. [187]	Mix	max. 20	1414	6.85
Evangelista et al. [188]	Betão	0-4	1913	13.1
Revilla et al. [189]	Betão	0-4	2370	7.6

3.3.2. Aplicação de Agregado Reciclado no betão

O betão, como um dos materiais de construção mais consumidos globalmente, desempenha um papel essencial no desenvolvimento socioeconômico e na construção de infraestruturas. No entanto, para alcançar a sustentabilidade no setor da construção, é imperativo promover soluções construtivas que possibilitem a reutilização de resíduos industriais, especialmente aqueles gerados pelo próprio setor da construção, visando à redução da dependência de recursos naturais. Essa abordagem não só alivia a escassez de recursos como também diminui o impacto ambiental no processo de produção de materiais. Contudo, a promoção e aplicação dessas soluções dependem de uma pesquisa aprofundada e da validação experimental, sendo necessário combinar a exploração teórica com a prática para assegurar sua viabilidade científica e técnica.

Nesta secção, é discutida a aplicação de agregados reciclados no betão, com uma análise detalhada de seu impacto nas propriedades físicas (como trabalhabilidade, massa volúmica e absorção de água), propriedades mecânicas (como resistência à compressão e flexão) e durabilidade (como resistência à penetração de íões cloreto, ciclos de gelo-degelo e resistência à carbonatação). Através de um estudo sistemático sobre as alterações nas estruturas micro e macroscópicas do betão com agregados reciclados, pretende-se desta forma fornecer informações científicas e orientações práticas para o setor da construção, visando à reciclagem eficaz de resíduos de construção e promovendo o desenvolvimento de edifícios mais sustentáveis e ambientalmente responsáveis. A Tabela 3.3 mostra alguns estudos sobre betão com AR.

Tabela 3.3 – Alguns trabalhos sobre betão com AR.

Autores	Agregado reciclado	Dimensão (mm)	Massa volúmica (kg/m³)	Absorção de água (%)	Substituir (%)	Cimento	Abaixamento (cm)	Resistência à Compressão (MPa)		
								7 d	28 d	90 d
Majhi et al. [183]	Betão	20	2530	4	0	OPC	70	28.37	37.77	46.1
					25		75	27	36.5	45
					50		85	25	33.5	41.85
					100		95	22.5	30.5	37.68
Simsek et al. [190]	Betão	4-11.2	2420	4.79	20	CEM I 42.5R	80	22	27	34
		11.2-22.4	2380	4.96	40		75	23	25	33
					60		70	22	24	33
					80		65	21	23	29
					100		60	18	23	27
Delsaute and Staquet [191]	Betão	4-10	2340	/	0	CEMII/A-L 42.5 R	29	40	/	/
		10-20	2320		30		27	26	/	/
					100		23	25	/	/
Pedro et al. [192]	Betão no Lab.	/	2300	3.6	0	CEM I 42.5R	13.5	65.4	72.6	74.3
					25		13.2	59.8	68.2	72.1
					50		13.5	58.8	66.5	69.0
					100		12.8	55.5	61.2	64.3
					100F		12.7	53.9	65.4	68.3
	Betão na obra	/	2400	3.9	100C		13.2	59.3	68.7	71.8
					25		13.8	58.7	68.9	72.3
					50		13.6	54	63.8	67.2
					100		13	52.9	61.0	64.7
					100F		13.7	50.9	61.5	64.8
					100C		13.4	58.9	66.9	70.0

Continuar Tabela 3.3.

Autores	Agregado reciclado	Dimensão (mm)	Massa volúmica (kg/m³)	Absorção de água (%)	Substituir (%)	Cimento	Abaixamento (cm)	Resistência à Compressão (MPa)		
								7 d	28 d	90 d
Bogas et al. [193]	Betão estrutural	4-11.2	1735	15.7	0	CEM I 42.5 R	13	32.8	38.4	39.3
					20		12	33.9	40.4	41.3
					50		13	34.4	43.1	46.8
					100		12.5	36.1	43.7	48.5
	Betão leve		878	24.9	0		12.5	16	19.2	20.7
					200		13	21.6	25.1	26.5
					50		13	23.8	27.7	30.5
					100		12.5	27.7	33.4	34.6
Kou et al. [194]	RCD	RAI: 5/10	2263	6.25	0	OPC	/	32.5	43.4	47.8
					20			29.3	39.4	44.2
					50			28.4	37.8	42.4
					100			20.4	27.9	33.8
		RAII: 5/10	2315	5.81	0			32.5	43.4	47.8
					20			30.4	39.7	43.6
					50			26.2	33.9	39.6
					100			24.5	32.3	36.8
		RAIII: 5/10	2490	4.26	0			32.5	43.4	47.8
					20			29.1	45.3	49.1
					50			27.6	42.5	47.5
					100			24.4	38.1	45.5
Bendimerad et al. [186]	Betão	4-10	2.34	5.3	0	CEM II/A-L	195	23	31.4	/
					30		193	22.1	28.5	/
		10-20	2.32	4.9	0	42.5	204	19.4	29	/
					100		222	12.2	24	/

Continuar Tabela 3.3.

Autores	Agregado reciclado	Dimensão (mm)	Massa volúmica (kg/m³)	Absorção de água (%)	Substituir (%)	Cimento	Abaixamento (cm)	Resistência à Compressão (MPa)		
								7 d	28 d	90 d
Güneyisi et al. [152]	Betão	/	2360	/	0	OPC	70	/	/	/
		/	2310	/	50		72	/	/	/
		/	2260	/	100		71.5	/	/	/
Singh and Singh [195]	Betão	Módulo de finura 6.88	/	5.65	0	OPC	68.5	40	42.5	43.8
					25		68.5	36.9	40	42
					50		68.8	34.8	37	40
					75		68.4	33	35	35.2
					100		68	33	34	35.3
Rao et al. [196]	Betão na obra com 15 anos	4.75-20	1413	/	0	OPC	57.5	/	50	/
					25		55		46	
					50		50		44	
					100		50		42	
Suhaib et al. [197]	Demolição da ponte	/	/	6.05	0	OPC	77	16.25	29.3	/
					30		67	14.64	26.2	
					50		59	15.21	27.31	
					70		46	14.67	23	
Kazmi et al. [187]	Betão	max. 20	1414	6.85	0	OPC	/	/	18.92	/
					10		/	/	17.65	/
					20		/	/	16.01	/
Evangelista [198]	Betão	0-4	2000	10.43	0	CEM I 42.5R	S3	/	33.6	/
					10			/	32.1	/
					30			/	32.7	/
					50			/	32.8	/
					100			/	30.7	/

3.3.2.1 Propriedades físicas do betão com Agregado Reciclado

A trabalhabilidade é um parâmetro importante na avaliação da facilidade com que o betão pode ser manuseado, colocado e compactado. A incorporação de agregados reciclados, tanto graúdos quanto miúdos, influencia a trabalhabilidade do betão. Vários trabalhos investigaram o impacto dos agregados reciclados na trabalhabilidade do betão fresco. Por exemplo, Rao et al. [196] estudaram a trabalhabilidade do betão com a adição de agregados reciclados. Agregados naturais com um tamanho variando de 4 a 20 mm foram substituídos por agregados reciclados com a mesma granulometria, em proporções de 25%, 50% e 100%. Os resultados mostraram que o abaixamento diminuiu com o aumento do teor de agregados reciclados. Quando o teor de agregados reciclados atingiu 100%, o abaixamento de betão fresco diminuiu em cerca de 13%. Esse comportamento foi justificado pela superfície rugosa dos agregados reciclados. Zega et al. [199] estudaram betões frescos com diferentes percentagens de agregados reciclados finos (0%, 20% e 30%). Foi utilizado um agregado reciclado com um módulo de finura de 3.15 e uma absorção de água de 8.5%. Os resultados mostraram que o abaixamento do betão diminuiu com o aumento do teor de agregados reciclados finos, sendo que o abaixamento do betão com 30% de agregado reciclado fino foi significativamente menor, embora a superplastificante tivesse aumentado. Este pode ser explicado pela irregularidade da forma dos agregados reciclados. Além disso, a presença de mais partículas finas na superfície do agregado reciclado também aumentou o atrito entre os agregados. Portanto, o abaixamento do betão fresco diminuiu com o aumento do teor de agregados reciclados. Por outro lado, os agregados reciclados apresentam uma alta absorção de água e, durante a preparação do betão, mantiveram-se em um estado não saturado, absorvendo efetivamente a água da amassadura, o que afetou o abaixamento do betão fresco.

Para melhorar a trabalhabilidade do betão com AR, os investigadores propuseram várias estratégias, incluindo a otimização da granulometria dos agregados reciclados, o ajuste da relação de água/cimento e a adição de aditivos químicos. Por exemplo, Zheng et al. [200] estudaram a curva granulométrica dos agregados reciclado e melhoraram a massa volúmica aparente e a resistência à compressão através do ajuste da distribuição granulométrica do agregado reciclado. Além disso, quando a taxa de substituição de agregado reciclado fino aumentou de 0% para 30%, a trabalhabilidade do betão também aumentou. Cartuxo et al. [201] ajustaram a relação de água/cimento para otimizar a diminuição de consistência do betão fresco com a adição de agregados reciclados. O ajuste da relação de água/cimento visava alcançar um abaixamento de 125 ± 15 mm em betão com diferentes percentagens de agregados reciclados. Quando 100% do agregado reciclado foi substituído pelo agregado natural no betão, a relação de

água/cimento aumentou em 17.6% em comparação com o betão referência. Sasanipour e Aslani [202] investigaram o efeito de um superplastificante no abaixamento de betão fresco com a adição de agregados reciclados. À medida que a proporção de agregados reciclados aumentava de 0 para 100%, a quantidade de superplastificante aumentava em 11%. Além disso, foi avaliada a substituição do agregado natural por agregado reciclado no betão. Quando o betão incorporou 100% de agregado reciclado, o abaixamento de betão fresco aumentou em 4 mm e a quantidade de superplastificante diminuiu em 16.7%, devido à adição do superplastificante, que tornou a disposição entre as moléculas de água e as moléculas de cimento mais ordenada, aumentando assim o abaixamento de betão fresco.

A massa volúmica e a absorção de água são indicadores-chave para avaliar as características físicas do betão, tendo um impacto significativo no desempenho geral e na aplicação do material. Os agregados, como componentes principais do betão, geralmente ocupam de 70% a 80% do seu volume, e, portanto, as propriedades dos agregados influenciam substancialmente a massa volúmica e a absorção de água do betão. De acordo com as revisões apresentadas nas Tabela 3.2 e Tabela 3.3, os agregados reciclados, devido às suas características físicas, exibem uma elevada absorção de água e uma baixa massa volúmica, um facto que foi validado em vários estudos.

Bendimerad et al. [186] efetuaram um estudo evidenciando que à medida que a proporção de substituição dos agregados reciclados aumenta, a massa volúmica do betão diminui, enquanto a sua absorção de água aumenta. Esse fenómeno pode ser explicado pela estrutura porosa interna e pela maior rugosidade da superfície dos agregados reciclados, o que aumenta significativamente a sua capacidade de absorver água. Bogas et al. [203] confirmaram também que a introdução de agregados reciclados no betão aumentou consideravelmente a porosidade, diminuiu a massa volúmica e aumentou a absorção de água. Shi et al. [204] também apontaram que a substituição de agregados naturais por agregados reciclados resultou em uma correlação significativa entre a porosidade dos agregados reciclados e a absorção de água em estágios iniciais do betão, sugerindo a importância dos agregados reciclados na gestão da humidade. Nedeljkovi et al. [205] enfatizaram que a absorção de água e a massa volúmica dos agregados reciclados são parâmetros essenciais no design de argamassa e betão. O trabalho registou a variação da absorção de água ao longo do tempo e mediu a capacidade total de absorção de água dos agregados reciclados. Ao observar a evolução do teor de água da pasta de cimento, descobriu-se que a absorção de água dos agregados reciclados na pasta era menor do que na água, o que pode ser explicado pela forte afinidade das partículas de cimento pela água, dificultando que os agregados reciclados atinjam a sua capacidade máxima de absorção durante a mistura.

Por outro lado, a absorção de água por capilaridade é um aspeto específico da infiltração de água que está relacionado à estrutura porosa do betão. Cartuxo et al. [201] descobriram que a absorção de água por capilaridade em um teste de 72 horas aumentou em até 45%. A absorção de água capilar aumentou com a incorporação de agregados reciclados. Pedro et al. [192] observaram que, com o aumento do teor de agregados reciclados, a absorção inicial de água por capilaridade aumentou rapidamente, e a quantidade final de água absorvida foi maior. Bao et al. [206] indicaram que a absorção de água por capilaridade em um betão com incorporação de agregados reciclados aumenta com o aumento do teor de substituição dos agregados reciclados. Gao et al. [207] investigaram o comportamento de absorção capilar do betão com agregados reciclados, utilizando diferentes proporções de substituição de agregados reciclados grossos, a saber, 0%, 33%, 66% e 100%. Os resultados revelaram que a quantidade de água absorvida aumenta com o tempo de contato com a água; o coeficiente de absorção capilar aumentou em 19% à medida que o teor de agregados reciclados grossos aumentou de 33% para 100%. Este comportamento deveu-se ao facto do betão com agregados reciclados conter argamassa antiga em zonas de transição na interface, resultando em uma maior porosidade do betão.

Em resumo, em comparação com os agregados naturais, os agregados reciclados apresentam maior rugosidade superficial e uma morfologia mais irregular, o que resulta em um impacto negativo na trabalhabilidade do betão fresco sob as mesmas condições de dosagem. Os estudos acima confirmam ainda mais que os fatores que afetam a massa volúmica e a absorção de água do betão com AR são principalmente a baixa massa volúmica e a alta absorção de água dos agregados reciclados. Uma compreensão abrangente do desempenho do betão com agregados reciclados pode ajudar a desenvolver estratégias para otimizar o design do betão e melhorar sua sustentabilidade e durabilidade, promovendo assim o desenvolvimento e a aplicação de materiais de construção ecológicos.

3.3.2.2 Propriedades mecânicas do betão com Agregado Reciclado

A resistência à compressão é um indicador crucial da integridade estrutural do betão e é um fator central na avaliação da viabilidade da incorporação de agregados reciclados. Normalmente, os testes de resistência à compressão são realizados em amostras cúbicas ou cilíndricas utilizando uma prensa universal. No contexto do betão, diversos fatores influenciam a resistência à compressão, incluindo a dosagem de cimento, a relação de água/cimento, a qualidade dos agregados e o design do betão. A Tabela 3.3 apresenta alguns resultados de trabalhos sobre a aplicação de agregados reciclados no betão, apoiando ainda mais a complexidade e a interação desses fatores.

Thomas et al. [208] investigaram o efeito da resistência à compressão do betão em relação ao teor de agregados reciclados, diferentes relações água/cimento e dosagem de cimento. Os resultados mostraram que, mantendo a relação água/cimento e conteúdo de cimento, a resistência à compressão diminui com o aumento do teor de agregados reciclados. Em contrapartida, quando a relação água/cimento diminui dosagem de cimento aumenta, a resistência à compressão é otimizada. Por exemplo, quando a relação água/cimento foi reduzida em 20% e a dosagem de cimento aumentou em 50%, a resistência à compressão do betão com 100% de agregado reciclado aumentou em 34%. Hamadand et al. [209] realizaram ensaios de resistência à compressão em betão de alta resistência com a incorporação de agregados reciclados grossos. Os resultados indicaram que o teor de agregados reciclados em betão de alta resistência causou uma redução média de 9.8% na resistência à compressão. Esse comportamento pode ser explicado pelo aumento da porosidade do betão devido à presença de agregados reciclados. Farah et al. [210] avaliaram a substituição da areia natural por agregados reciclados finos no betão, sob taxas de substituição de 0%, 10%, 20%, 30% e 40%. Os resultados mostraram que a utilização de 20% de agregados reciclados no betão poderia alcançar uma resistência à compressão superior em comparação com betão referência, evidenciando que a aplicação adequada de agregados reciclados pode melhorar as propriedades do betão.

Adicionalmente, investigadores estudaram a influência do pré-tratamento e da cura dos agregados reciclados na resistência à compressão do betão. Taner et al. [211] estudaram o impacto da cura interna no desempenho do betão com agregados reciclados, utilizando agregados reciclados finos em estado semi-saturado e saturado. Os resultados demonstraram que a utilização de agregados reciclados saturados ou semi-saturados teve um efeito positivo na durabilidade do betão, melhorando suas propriedades de cura interna. Haghighatnejad et al. [212] relataram que a resistência à compressão do betão feito com agregados reciclados finos foi afetada por diferentes condições de cura (cura em água contínua, cura ao ar livre contínua e cura laboratorial contínua). Os resultados mostraram que a cura em água contínua é a condição de cura mais adequada para betão com a incorporação de agregados reciclados, uma vez que essa condição resulta em maior porosidade. Além disso, Li et al. [213] estudaram a utilização de resíduos de poliestireno expandido (EPS) como agregado no betão. Para obter compósitos de geopolímero leves com maior resistência, foi utilizada uma nova resina epóxi reforçada com fibra, revestida de poliestireno expandido, como agregado leve para melhorar a resistência do betão.

A resistência à flexão do betão com incorporação de agregados reciclados é geralmente também um importante indicador das propriedades mecânicas, do betão.

Diversos estudos realizaram testes de resistência à flexão em provetes com proporções variáveis de agregados reciclados, revelando uma tendência semelhante à observada nos testes de resistência à compressão: a resistência à flexão diminui com o aumento do teor de substituição de agregados naturais por agregados reciclados. Por exemplo, Rao et al. [196] investigaram a resistência à flexão do betão com diferentes teores de agregados reciclados. Os resultados indicaram que a resistência à flexão tende a diminuir à medida que o teor de agregado reciclado aumenta; com uma taxa de substituição de 25%, a resistência à flexão foi reduzida em 20% em comparação ao betão de referência. Adicionalmente, Topçu e Sengel [214] prepararam misturas de duas séries com diferentes níveis de resistência (C16 e C20). Os resultados demonstraram que, em diferentes níveis de resistência, a resistência à flexão do betão diminui à medida que o conteúdo de agregado reciclado aumenta. Zhao et al. [215] realizaram ensaios de resistência à flexão em betão com agregado reciclado fino, e os resultados mostraram uma redução de até 29.6% na resistência à flexão com uma taxa de substituição de 100%. Bogas et al. [203] investigaram a resistência à flexão de betões com agregado reciclado. Os resultados indicaram que, com uma taxa de substituição de 100%, a resistência à flexão do betão de classe C30 foi reduzida em 34%, enquanto a do betão de ultra-alto desempenho reduziu em 36%. O estudo demonstra que a incorporação de agregado reciclado tem um impacto negativo na resistência à flexão dos betões, e essa redução torna-se mais pronunciada à medida que a taxa de substituição de agregado reciclado aumenta.

Nem só resíduos de construção e demolição tem sido utilizado como substitutos dos agregados naturais em betões. Jia et al. [216] otimizaram o betão leve utilizando agregados reciclados provenientes da indústria de fundição em substituição dos agregados leves. Os resultados mostraram que a resistência à flexão do betão leve aumentou com o aumento do teor de agregados reciclados, devido à maior massa volumica e resistência dos agregados reciclados em comparação aos agregados leves, o que aprimora as propriedades mecânicas do betão leve. Além disso, Amjad et al. [217] exploraram os benefícios potenciais de incorporar a bactéria *Lysinibacillus boronitolerans* em um betão biomimético autorregenerativo feito com agregado reciclado de tijolo. Os resultados revelaram que o betão com esporos imobilizados nos agregados mostrou uma melhora significativa na resistência à flexão em comparação com o betão de referência. Em betão com agregados reciclados de tijolos, a resistência à flexão aumentou em 22% para agregados de pequenas dimensões e 15.5% para agregados de grandes dimensões. Esse efeito pode ser explicado pela densificação e aumento da ductilidade da matriz proporcionados pela biomineralização [218,219].

3.3.2.3 Durabilidade do betão com Agregado Reciclado

A durabilidade do betão é um indicador essencial para avaliar a qualidade estrutural e a confiabilidade, refletindo sua capacidade de manter a integridade estrutural e a estabilidade de desempenho sob a ação de diversos fatores externos. Há muitos fatores que influenciam a durabilidade do betão, como a corrosão por cloretos e ácidos, a resistência à carbonatação, a resistência aos ciclos de gelo-degelo, e a resistência à permeabilidade a água e a elementos prejudiciais [192,220,221]. Os métodos de avaliação incluem técnicas de ensaio não destrutivo (como o teste ultrassônico e o esclerômetro), bem como a análise direta de amostras com propriedades materiais específicas [222,223]. Este estudo foca principalmente nos efeitos dos íons cloreto, do dióxido de carbono e dos danos causados pela gelo-degelo na durabilidade do betão.

A penetração de íões cloreto é uma das principais questões que afetam a durabilidade a longo prazo e causam a deterioração das estruturas de betão [224]. Esse processo começa quando os íões cloreto atravessam os poros interconectados do betão e penetram em sua estrutura interna. Uma vez que os íões cloreto reagem com a matriz cimentícia do betão, formando cloretos, ocorre a dissolução dos minerais presentes na matriz cimentícia, o que enfraquece a estrutura interna do betão e reduz suas propriedades mecânicas. Além disso, os íões cloreto podem induzir a corrosão das armaduras, resultando na formação de óxidos, como o óxido de ferro, que causam a expansão do aço e provocam microfissuras na estrutura do betão, levando a rachaduras mais amplas e a danos estruturais mais significativos, comprometendo seriamente a estabilidade e a vida útil da estrutura [138,225–227]. Yu e Lin [228] desenvolveram um modelo para prever o mecanismo de difusão de íões cloreto no betão com agregados reciclados. Os resultados mostraram que, com o aumento da quantidade de agregados reciclados, a resistência do betão à penetração de cloretos diminui. Bao et al. [225] confirmaram esse comportamento e observaram que o aumento dos agregados reciclados eleva significativamente a porosidade total do betão, o que aumenta a profundidade de penetração dos íões cloreto. Além disso, Zhu et al. [229] estudaram a difusão de íões cloreto no betão com agregados reciclados em ambientes complexos e concluíram que o coeficiente de difusão de íões cloreto aumenta significativamente com o número de ciclos de gelo-degelo, indicando que fatores ambientais aceleram a penetração de cloretos.

Para melhorar a resistência do betão com agregados reciclados à penetração de cloretos, foram propostas técnicas inovadoras de tratamento de agregados. Sasanipour et al. [226] usaram um método de modificação onde agregados reciclados absorvem sílica ativa, o que aumentou significativamente a resistência do betão à penetração de íões cloreto. Esse pré-tratamento preencheu os poros e defeitos de

interface dos agregados reciclados, reduzindo a sua porosidade e aumentando a massa volúmica do betão. Por outro lado, Liang et al. [220] trataram os agregados reciclados com absorção de hidróxido de cálcio e carbonatação. O estudo mostrou que, com o aumento do teor de agregados reciclados ou do tempo de cura, a capacidade do betão de resistir à penetração de cloretos aumentou significativamente. Esse tratamento reduz a porosidade e cria uma camada protetora de carbonato de cálcio densa na superfície dos agregados, melhorando a durabilidade e o desempenho a longo prazo do betão reciclado em ambientes agressivos.

A carbonatação é um processo químico significativo que exerce um impacto profundo na durabilidade das estruturas de betão, especialmente em ambientes onde a concentração de dióxido de carbono (CO_2) é elevada. O betão, por sua natureza, é um material alcalino, rico em compostos alcalinos contidos no cimento. Quando o CO_2 interage com as substâncias alcalinas no betão, forma carbonatos. Essa reação química leva à neutralização das substâncias alcalinas no betão, reduzindo o ambiente alcalino e, conseqüentemente, enfraquecendo a camada protetora ao redor do aço de reforço, aumentando assim o risco de corrosão do aço. Para avaliar a resistência do betão à carbonatação, o teste de profundidade de carbonatação é um método eficaz. O estudo realizado por Sagoe-Crentsil et al. [230] revelou que, ao utilizar agregados reciclados, a profundidade de carbonatação do betão aumentou em 10%. Além disso, foi observado que há uma relação parabólica entre a profundidade de carbonatação e a raiz quadrada do tempo de exposição, a qual se aplica tanto ao betão com AR como ao betão tradicional. Bosque et al. [231] investigaram a profundidade de carbonatação do betão com AR e os resultados mostraram que a profundidade média de carbonatação do betão com AR é de 1.07 a 1.2 vezes maior do que a dos betões normais.

O estudo de Limbachiya et al. [232] descobriu que a profundidade e a taxa de carbonatação aumentam com a quantidade de agregados reciclados. Por outro lado, Lovato et al. [233] observaram um aumento proporcional na profundidade de carbonatação com as quantidades de agregados reciclados, tanto grossos quanto finos. No entanto, Tang et al. [234] exploraram a reutilização da carbonatação de agregados e a carbonatação do betão permeável, revelando que a carbonatação do betão pode melhorar a resistência à compressão enquanto mantém a permeabilidade aceitável do betão permeável, sendo a carbonatação do betão mais eficaz do que a carbonatação dos agregados.

O gelo-degelo é amplamente utilizado na avaliação da durabilidade do betão em regiões frias, especialmente quando exposto a ciclos de gelo-degelo, sendo essa capacidade um indicador-chave de desempenho. A resistência ao congelamento é avaliada principalmente com base no comportamento do

betão durante a exposição a múltiplos ciclos de gelo-degelo. Alguns estudos demonstraram que o betão com agregado reciclado (BAR) geralmente apresenta menor desempenho em resistência ao gelo-degelo do que o betão com agregado natural (BAN) [229,235,236]. Os investigadores enfatizaram os mecanismos de deterioração do BAR durante os ciclos de gelo-degelo, destacando a importância da qualidade dos agregados reciclados na resistência ao congelamento.

Os fatores que afetam a resistência ao gelo-degelo do BAR incluem vários aspetos, como o tipo de agregado reciclado, as propriedades do betão, a taxa de substituição do agregado reciclado e o estado de humidade do BAR [237–239]. Por exemplo, Sun et al. [240] constataram que o BAR com substituição apenas de agregado reciclado fino apresentou uma resistência ao gelo-degelo significativamente inferior à do BAN. O principal motivo para este comportamento foi a elevada porosidade do agregado reciclado fino, que resultou num aumento da taxa de absorção de água e saturação do BAR durante os ciclos de gelo-degelo, levando à intensificação do destacamento superficial.

Ao mesmo tempo, investigadores têm procurado constantemente métodos eficazes para melhorar a resistência ao gelo-degelo do BAR, assim como otimizar a previsão da resistência ao gelo-degelo, por meio de modelos que preveem a evolução da durabilidade do BAR em ambientes agressivos. Zhi et al. [241] propuseram um modelo de dano probabilístico baseado na distribuição Weibull de dois parâmetros para estabelecer a relação entre os ciclos de gelo-degelo e parâmetros-chave: a taxa de substituição do agregado reciclado fino, a relação água/cimento e a absorção de água do agregado reciclado fino. Os resultados do trabalho demonstraram claramente que o resultado da previsão deste modelo está basicamente em concordância com os resultados experimentais: a resistência ao gelo-degelo do betão com agregado reciclado fino diminuiu significativamente com a taxa de substituição do agregado reciclado fino e os outros fatores mencionados. Esses resultados enfatizam a importância da resistência ao gelo-degelo na avaliação da durabilidade do betão com AR e fornecem uma base teórica e orientações práticas para a otimização da resistência ao gelo-degelo do betão com AR no futuro.

Em suma, os estudos indicam que a aplicação de agregados reciclados no betão tem um impacto significativo nas suas propriedades mecânicas e de durabilidade. Devido à elevada porosidade e à presença da antiga pasta de cimento aderida à superfície dos agregados reciclados, um aumento na sua taxa de substituição pode levar à redução do desempenho mecânico do betão, incluindo a resistência à compressão, à flexão e o módulo de elasticidade. No entanto, este efeito adverso pode ser mitigado através da otimização da dosagem do betão, como a redução da relação água/cimento, o aumento do teor de ligantes ou a incorporação de adições minerais, como sílica ativa, cinzas volantes e escória de

alto-forno, que melhoram a compactação da matriz cimentícia. Além disso, tratamentos prévios nos agregados reciclados, como a ativação alcalina ou a carbonatação acelerada, podem aumentar a densidade da zona de transição interfacial, contribuindo para o aprimoramento da resistência à compressão e da durabilidade do betão. Por outro lado, diversos estudos indicam que a incorporação de agregados reciclados pode comprometer o desempenho do betão em termos de resistência à cloretos, carbonatação e ciclos de gelo-degelo. Esse efeito está fortemente relacionado com a alta porosidade e capacidade de absorção de água do agregado reciclado, que facilitam a migração de humidade e a penetração de iões prejudiciais, acelerando os processos de degradação. Assim, ao utilizar agregados reciclados, é fundamental considerar fatores como a origem, a granulometria, a taxa de substituição e a modificação superficial, bem como a adoção de materiais cimentícios suplementares, para otimizar a resistência do betão à deterioração e garantir sua durabilidade e segurança estrutural a longo prazo.

De maneira geral, com um design de mistura adequado e técnicas avançadas de modificação do agregado reciclado, o betão com agregado reciclado demonstra viabilidade técnica e pode atingir um equilíbrio entre desempenho mecânico, durabilidade e sustentabilidade ambiental. Com os avanços na funcionalização dos agregados reciclados, a aplicação do betão com AR apresenta um grande potencial, contribuindo significativamente para o desenvolvimento sustentável da indústria da construção.

CAPÍTULO

4. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

4.1. METODOLOGIA

Este doutoramento desenvolveu um betão verde com desempenho térmico, utilizando resíduos de construção e demolição (RCD) e integrando tecnologia de armazenamento de calor latente. A investigação adotou uma abordagem experimental, abrangendo várias fases para caracterizar e otimizar o material produzido. Inicialmente, foram analisadas as propriedades dos agregados reciclados, incluindo granulometria, massa volúmica, absorção de água, variação volúmica do PCM, e as propriedades térmicas do PCM. Compararam-se os métodos de imersão do PCM em pressão atmosférica e a vácuo condição. Depois, as composições de betão foram preparadas. Posteriormente, avaliaram-se as propriedades físicas, mecânicas, térmicas e de durabilidade do betão produzido, com base em ensaios normalizados segundo normas europeias e nacionais. A Figura 4.1 apresenta um resumo do trabalho desenvolvido.

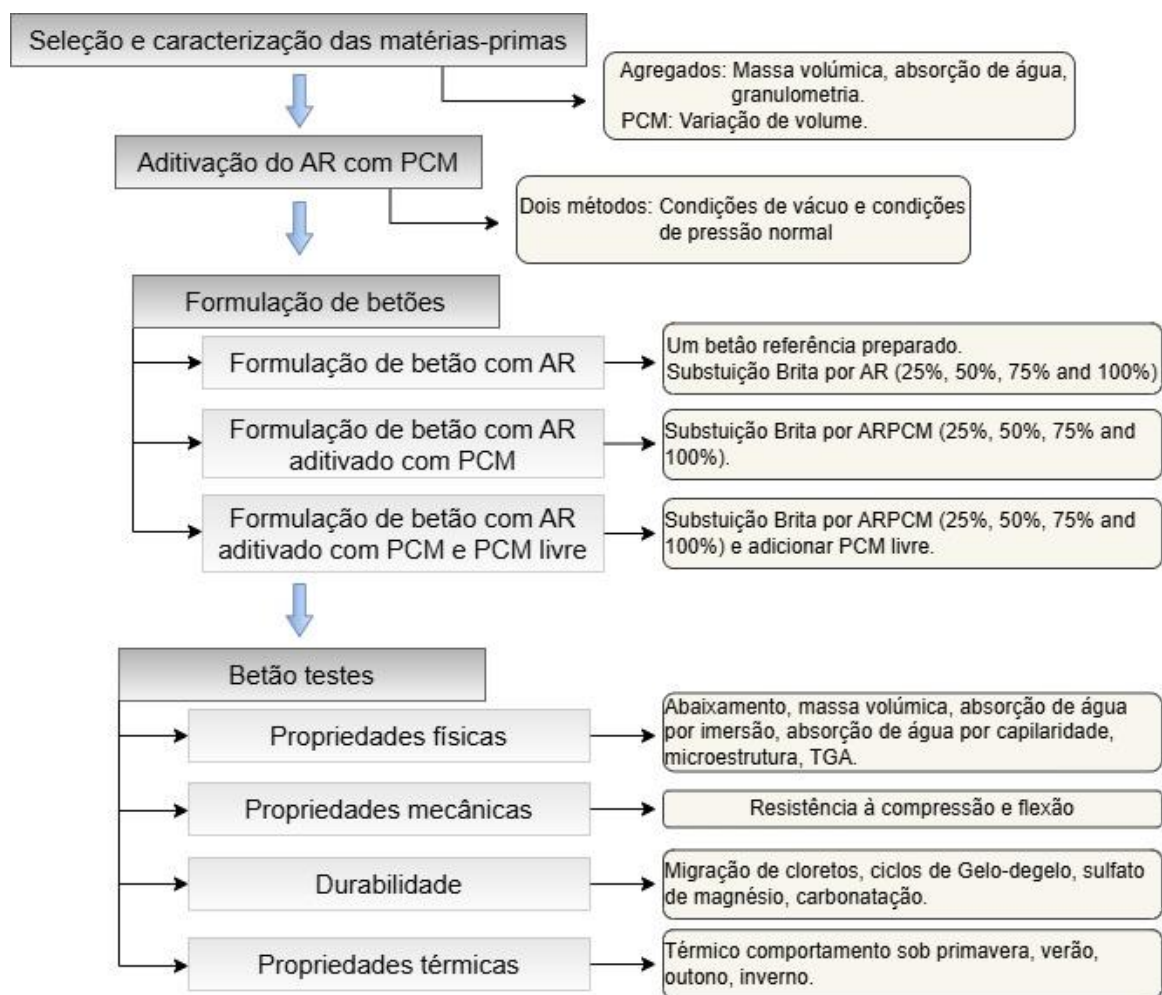


Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia de investigação.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DE MATÉRIAS-PRIMAS

4.2.1. Massa volúmica

No que diz respeito à massa volúmica, neste trabalho foi determinada a massa volúmica aparente das partículas (ρ_a), a massa volúmica real das partículas secas (ρ_{rd}) e a massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca (ρ_{ssd}).

A absorção de água (WA_{24}) é a quantidade de água que um material pode absorver sob pressão atmosférica, expressa em percentagem. No entanto, diferentes tamanhos de partículas de agregados devem respeitar diferentes especificações para obter a sua massa volúmica e absorção de água. Relativamente à massa volúmica e absorção de água esta foi determinada com base na especificação NP 581 [242] e NP 954 [243].

Inicialmente uma amostra de agregado foi submersa em água durante 24 horas até à estabilização da massa do provete. De seguida a água em excesso foi retirada e a superfície do agregado foi seca (podendo este estado ser testado de acordo com a Figura 4.2). Posteriormente, com recurso a uma proveta graduada registou-se a massa e o volume da mesma sem a amostra. De seguida, retirou-se uma certa quantidade de amostra saturada, e colocou-se no balão, tendo-se registado a massa e o volume do mesmo com a amostra. Por último, a amostra e água foram retiradas do balão e colocadas em estufa durante 24 horas a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ tendo-se registado a massa seca da amostra.



(a) Colocação do cone no tabuleiro

(b) Preenchimento do cone com a amostra em camadas

(c) Remoção do cone

Figura 4.2 – Ensaio de massa volúmica e absorção de água da areia.

De acordo com norma NP 954 [243], a massa volúmica e a absorção de água são determinadas com base nas seguintes expressões:

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_3}{M_3 + M_4 - M_2} \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)} \quad 4.1$$

$$\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_3}{M_1 + M_4 - M_2} \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)} \quad 4.2$$

$$\rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 + M_4 - M_2} \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)} \quad 4.3$$

$$WA_{24} = \frac{100 * (M_1 - M_3)}{M_3} \text{ (\%)} \quad 4.4$$

Onde:

M_1 : Massa do provete com as partículas saturadas sem água superficial (g);

M_2 : Massa do balão com o provete e água (g);

M_3 : Massa do provete seco (g);

M_4 : Massa do balão com água (g);

ρ_w : Massa volúmica da água;

ρ_a : Massa volúmica das partículas aparentes (kg/m³);

ρ_{rd} : Massa volúmica das partículas secas (kg/m³);

ρ_{ssd} : Massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca (kg/m³);

WA_{24} : Absorção de água (%).

4.2.2. Determinação da granulometria

O ensaio de determinação da curva granulométrica dos diferentes agregados utilizados neste doutoramento, foi realizado com base na norma portuguesa NP EN 933-1 [244]. O ensaio consiste na separação através da peneiração de uma amostra de material em diversas classes granulométricas. Neste estudo, tendo em consideração os diâmetros dos agregados de 0 a 10mm, foram preparados 2 kg cada amostra, tendo sido utilizados diferentes peneiros (#0.063; #0.125; #0.25; #0.5, #1, #2; #4; #8 e #10mm).

Inicialmente uma amostra de agregado foi colocada em estufa a uma temperatura de 110±5 °C até atingir a massa constante. Posteriormente, cada amostra de agregado foi misturada uniformizando-a, sendo dividida igualmente em 4 partes, duas das quais foram selecionadas como amostras e depois misturadas uniformemente (Figura 4.3), sendo o processo repetido sucessivamente até que o peso da amostra fosse de aproximadamente de 2 kg. De seguida, a amostra de cada agregado foi colocada na

coluna de peneiros, começando pelo peneiro de maior abertura e agitando os vários peneiros sem risco de perda de material. A massa de material retido em cada peneiro foi registada.

O ensaio foi considerado válido sempre que a equação 4.5 foi verificada:

$$\text{Ensaio válido} = \frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} < 1\% \quad 4.5$$

Em que:

M_2 - Massa seca após lavagem, (g);

R_i - O peso do agregado retido em cada peneiro, (g);

P - O peso do agregado no fundo, (g).



Figura 4.3 – Processo de preparação da amostra para o ensaio de granulometria.

4.3. PROPRIEDADES FÍSICAS DOS BETÕES

4.3.1. Abaixamento

O ensaio de abaixamento do betão é o método mais comum para avaliar o comportamento em freso do betão, referindo-se principalmente à plastificação e ao bombeamento do betão. Os fatores que afetam o abaixamento incluem a dimensão dos agregados, teor de água, adjuvantes, temperatura, entre outros. O abaixamento deve ser ajustado de acordo com a seção estrutural do edifício, o tamanho e volume das armaduras, o método e distância de transporte, o método de vazamento, a capacidade de vibração e as condições climáticas, sendo assim um parâmetro a ser considerado na fase de projeto da mistura de betão.

As classes do abaixamento do betão encontram-se divididas em cinco, como definidas na norma NP EN 206-1 de 2007 [245], tal como apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Classes de abaixamento do betão.

Classe	Abaixamento (mm)
S1	10 a 40
S2	50 a 90
S3	100 a 150
S4	160 a 210
S5	≥ 220

Para a execução do ensaio de abaixamento foram utilizados diversos equipamentos, nomeadamente um cone, o tabuleiro, a barra de aço e a régua (Figura 4.4 a).

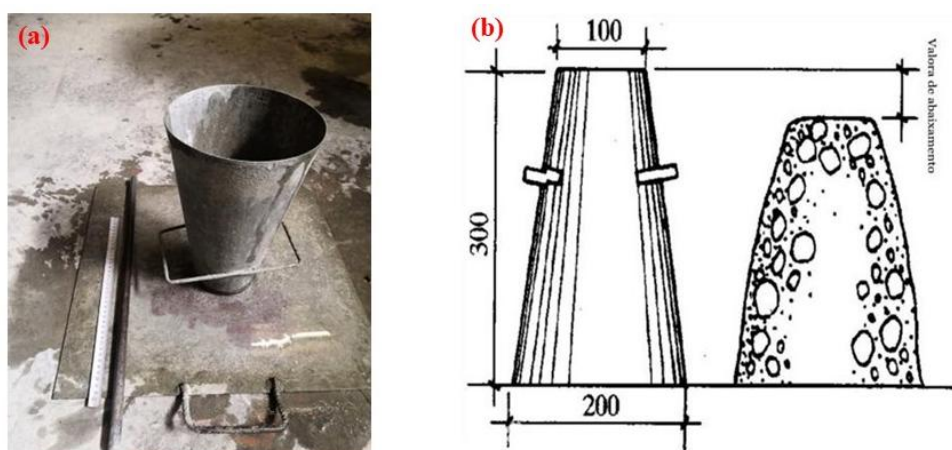


Figura 4.4 - Os equipamentos usados no ensaio de abaixamento (a) e Medição do valor (b).

A realização do ensaio seguiu as seguintes etapas:

1. Molhou-se o cone e o tabuleiro com água para reduzir o atrito no estado seco;
2. O processo foi efetuado com o enchimento de betão em três camadas no cone, apiloando cada camada com uma barra de aço, no qual se realizou a compactação com 25 vezes dentro do cone. Após essa compactação, nivelou-se o topo do betão;
3. Efetuou-se o levantamento do cone durante um intervalo de tempo de 5 a 10 segundos;

Após o processo, usou-se uma régua para medir a distância entre o topo do betão e a altura do cone no qual se aferiu o valor de abaixamento, como observamos na (Figura 4.4 b).

4.3.2. Massa volúmica

A determinação da massa volúmica do betão endurecido aos 28 dias foi realizada de acordo com a norma EN 12390-7 [246]. Cinco provetes com dimensão de 50x50x50 mm³ foram utilizados. Inicialmente os provetes foram secos em estufa a uma temperatura de 60 °C [247] até atingir uma massa constante (variação de massa entre pesagens consecutivas com um intervalo de 24 horas inferior a 0.1%). Após o arrefecimento em temperatura ambiente, a amostra foi pesada em uma balança de precisão, determinando-se a sua massa. A massa volúmica do betão endurecido foi determinada com base na seguinte equação:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad 4.6$$

Onde:

ρ : Massa volúmica do betão endurecido (kg/m³);

m: Massa do provete seco (g);

V: Volume do provete (m³).

4.3.3. Absorção de água por imersão

A absorção de água por imersão do betão é um indicador importante para analisar a durabilidade. O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado segundo a especificação do LNEC E 394 [248].

Foram utilizados 3 provetes prismáticos com dimensões 50x50x50 mm³, os quais foram curados por 28 dias em água e posteriormente ensaiados. As massas dos provetes foram determinadas de acordo com a norma NP EN 12390-7 [246].

O procedimento de ensaio foi realizado de acordo com as seguintes etapas:

1. Os provetes curados foram colados numa estufa a uma temperatura de 60 °C. Com diferentes ciclos de medições de massas intercalares de 24h, até à obtenção da massa contante, ou seja, uma variação de massa inferior a 0.1%;
2. Registou-se a massa constante seca (m_s), em gramas.
3. Os provetes num recipiente cheio de água, no qual ficaram submersos até à obtenção da massa saturada (m_i), ou seja uma variação de massa inferior a 0.1% em medições consecutivas de 24 horas;

4. Pesagem do provete saturado imerso em água, como podemos observar na Figura 4.5, determinando-se a sua massa hidrostática (m_2), em gramas.



Figura 4.5 - Pesagem do provete saturado imerso em água.

A absorção de água por imersão (A) em percentagem, foi determinada através da equação (4.7):

$$A_i = \left(\frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \right) * 100 \quad 4.7$$

Onde:

m_1 – Massa do provete saturado no ar, em g;

m_2 – Massa do provete saturado dentro de água, em g;

m_3 – Massa do provete seco, em g.

4.3.4. Absorção de água por capilaridade

A absorção por capilaridade é um indicador do transporte de água por canais interligados no material. No ensaio, foram utilizados provetes prismáticos com dimensões de 40x40x80 mm³, curados por 28 dias, seguindo o procedimento determinado pela especificação do LNEC E 393 [247].

A realização do ensaio seguiu as seguintes etapas:

1. Secou-se os provetes na estufa a uma temperatura de 60°C até a massa constante (erro $\leq 0.1\%$);

2. Colocou-se os provetes num recipiente com água até uma altura de aproximadamente 10 mm dos provetes. Deve-se manter a distância entre os provetos, além disso, os provetes e a caixa plástica não podem estar em contato direto. Sendo assim, deve-se assegurar uma distância entre o fundo do provete e do recipiente com uma malha de borracha colocada entre os provetes e a caixa plástica, Figura 4.6;



Figura 4.6 - Os provetes na caixa plástica.

3. Deve-se iniciar a cronómetro quando se verifica o primeiro contato da água com o provete, além desse fato também é importante manter a tampa fechada para que não ocorra evaporação da água assim como manter o ensaio numa temperatura constante;
4. As pesagens dos provetes, devem ocorrer segundo a norma nos seguintes períodos: 3, 6, 24, 72 horas, no entanto optou-se por efetuar um plano de pesagem mais pormenorizado, efetuando pesagens aos 10 min, 20 min, 30 min, 60 min, 90 min, 120 min, 180 min, 240 min, 300 min, 360 min, 21h, 24h, 27h, 44h, 47h, 50h, 67h, 72h, 115h, 120h, 138h, 146h, 162h, 169h, 186h, 193h, 209h, 216h, de forma a obter uma curva de absorção de água mais detalhada.

A absorção de água por capilaridade foi determinada através da seguinte equação:

$$A_c = \left(\frac{m_i - m_0}{A} \right) * 1000 \quad 4.8$$

Onde:

A_c – absorção de água por capilaridade (kg/m^2).

m_i - massa do provete num determinado tempo i (g);

m_0 - massa do provete seco (g);

A – área da superfície inferior em contacto com a água (mm^2).

O coeficiente de absorção por capilaridade é determinado através do declive da reta para um determinado intervalo de valores de absorção por capilaridade em relação a um determinado intervalo de tempo. O coeficiente de absorção por capilaridade é apresentado em $\text{kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$.

4.3.5. Microestrutura dos betões

As observações microscópicas foram realizadas com recurso a um microscópio eletrónico de varrimento de alta resolução (FEI Nova 200). As amostras utilizadas foram cilíndricas com 1 cm de diâmetro e 1 cm de altura, tendo sido revestidas com recurso a uma câmara de revestimento por sputter 208HR da Cressington, com espessura de deposição controlada pelo MTM-20 de alta resolução. O material de revestimento utilizado foi ouro-paládio (Au/Pd). A microestrutura das amostras foi observada com ampliações de $\times 1000$, $\times 2000$, $\times 5000$, $\times 10000$ e $\times 15000$ em condições de 20 °C.

4.3.6. Análise termogravimétrica

O ensaio de TGA foi realizado utilizando o analisador térmico Themys (empresa Setaram, Caluire, França). Analisando as curvas de TGA e DTG, determinou-se o teor de cimento não hidratado do betão com incorporação de agregado reciclado ou agregado reciclado funcionalizado (sem cura). Foram feitas amostras com um diâmetro de 1 cm e uma altura de 1 cm, e após 2 meses, as amostras foram moídas e homogeneamente misturadas. O ensaio foi realizado pesando aleatoriamente amostras de 10 g. Vale destacar que as amostras selecionadas foram obtidas a partir do material particulado resultante da moagem do betão. O equipamento operou a uma taxa de aquecimento constante de 10 °C/min, desde a temperatura ambiente até 1000 °C, em atmosfera de argónio, com uma taxa de fluxo de 100 ml/min.

4.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS BETÕES

4.4.1. Resistência à compressão

No ensaio de resistência à compressão do betão foram utilizados provetes cúbicos (50x50x50 mm³) que ficaram numa cura por 28 dias. De acordo com a norma NP EN 12390-3 [249], deve-se colocar os provetes na máquina de compressão devidamente centrados, tal como na Figura 4.7, foi definida uma velocidade de 2.9 kN/s. O ensaio foi concluído quando ocorreu rotura do provete, anotando a força máxima em kN.

Por fim, efetuou-se uma análise dos resultados, comparando as suas médias dos valores de cada tipo

dos provetes para cada tipo de mistura. A resistência à compressão é determinada através da seguinte equação, com uma exatidão de 0.1MPa:

$$f_{cu,k} = \frac{F}{A} \quad 4.9$$

Em que:

$f_{cu,k}$ – Resistência à compressão (N/mm²);

F – Valor da carga máxima aplicada ao provete (N);

A – Área de aplicação da carga (mm²).



Figura 4.7 - Ensaio de resistência à compressão.

4.4.2. Resistência à flexão

O ensaio de resistência à flexão foi realizado de acordo com a norma NP EN 12390-5 [250]. Utilizaram-se provetes com dimensões de 40x40x160 mm³ curados com 28 dias. Estes foram colocados no equipamento de ensaio devidamente centrados, o suporte inferior foi a localizado um terço do provete, e o eixo de pressão superior foi centrado no centro do provete (Figura 4.8). Definiu-se a velocidade de ensaio de 50 N/s tendo o provete sido submetido a uma carga gradualmente crescente até à rotura.

A resistência à flexão foi determinada através da equação seguinte:

$$f_{tf} = \frac{3F \cdot L}{2Bh^2} \quad 4.10$$

Em que:

f_{f} – Resistência à flexão (MPa);

F – Força de rotura à flexão (N);

L – Distância entre os apoios (mm);

B – Largura do provete (mm);

h – Espessura do provete (mm).



Figura 4.8 - Ensaio à flexão de um provete de betão.

4.5. DURABILIDADE DOS BETÕES

4.5.1. Migração de cloretos em regime não estacionário (CTH)

O ensaio de migração de cloretos foi realizado de acordo com a norma LNEC E 463 [251], esta determina o coeficiente de difusão de cloretos no betão. Foram utilizados para este tipo de ensaio provetes cilíndricos com dimensão 100 de diâmetro e 200 mm de altura, curados durante 28 dias em água. Sendo que cada provete foi cortado em 3 peças com 100 mm de diâmetro e 50 ± 2 mm de altura. As soluções dos reagentes utilizadas foram realizadas numa determinada proporção $\text{NaCl}:\text{H}_2\text{O}$ - 1:9 e $\text{NaOH}:\text{H}_2\text{O}$ - 3:250.

A realização do ensaio seguiu as seguintes etapas:

1. Os provetes foram colocados numa câmara de vácuo até uma pressão de 10-50 Mbar durante 15 minutos e em seguida continuou-se o processo de vácuo durante cerca de 3 horas;
2. A solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ foi adicionada aos provetes em vácuo;
3. A bomba de vácuo foi desligada e os provetes mantiveram-se submersos por 24h para permitir que a solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ entra-se totalmente nos poros do betão;

4. Preparou-se uma solução de 10%NaCl em massa (Solução catódica) e preencheu-se o recipiente catódico;
5. Colocou-se uma manga de borracha no provete de modo a impermeabilizar as paredes do provete e garantir que a solução anódica e catódica penetrasse num só sentido da secção do provete.
6. Preparou-se a solução do NaOH 3643,2g (NaOH:H₂O é 3:250), de seguida colocou-se cerca de 300ml por cada provete a ensaiar, tal como indicado na Figura 4.9 (b- anólito);
7. Conectou-se o polo positivo na solução anódica e o polo negativo na solução catódica;
8. Foi utilizado uma diferença de potencial de 30V, no qual foi registado a intensidade da corrente inicial que passa pelo provete;
9. Sempre que necessário, efetuou-se um ajuste da diferença de potencial registando a corrente inicial e a temperatura inicial em cada solução anódica;
10. No final do tempo de ensaio registou-se a intensidade da corrente final e a temperatura final;

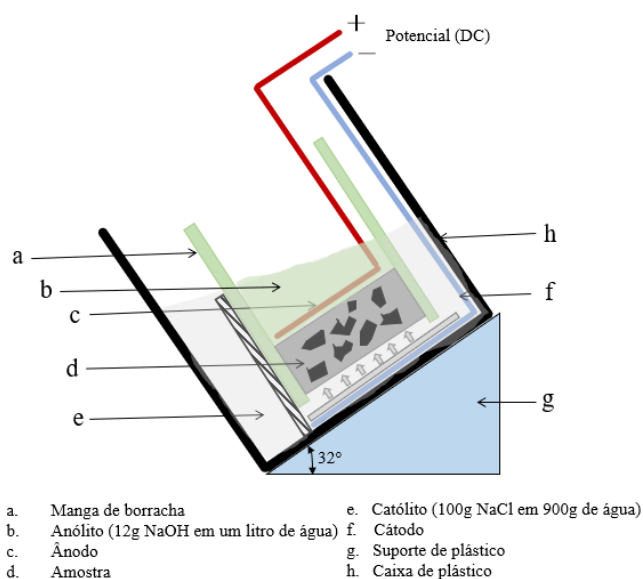


Figura 4.9 - Ensaio migração de cloretos com a indicação dos polos elétricos (+ e -) a conectar e a parte anódica e catódica das soluções.

11. Após a etapa anterior submete-se os provetes na prensa à compressão diametral, obtendo duas metades do provete;
12. Às partes obtidas pulveriza-se com uma solução de nitrato de prata (AgNO₃);
13. Após 20 minutos da pulverização, começa a aparecer um precipitado branco de AgCl.
14. Mede-se a profundidade de penetração do lado ao centro (usando um paquímetro digital) até obter 7 profundidades e a distância de cada ponto deve ser de 10mm.

15. O coeficiente de difusão em regime não estacionário é calculado pela seguinte equação simplificada:

$$D = \frac{0,0239(273 + T) \cdot L}{(U - 2) \cdot t} \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T) \cdot L \cdot x_d}{U - 2}} \right) \quad 4.11$$

Onde:

D – O coeficiente de difusão no estado não estacionário, $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$;

U – O valor absoluto da voltagem aplicada, V;

T – O valor médio das temperaturas inicial e final no anólito, °C;

L – A espessura do provete, mm;

x_d – O valor médio da profundidade de penetração, mm.

4.5.2. Gelo – degelo

Considerando a resistência do betão em condições de baixa temperatura, o ensaio de gelo-degelo é um dos testes mais importantes. De acordo com a Norma EN 12371 (2006) [252], este trabalho realizou observação de danos e medição de variação do volume aparente nas amostras. Um ciclo é composto por 24 horas. A temperatura foi controlada entre -10 a 15 °C. Figura 4.10 mostra um ensaio de gelo degelo em curso, sendo que existe circulação de água durante o ciclo de aquecimento e inexistência de água durante o ciclo de arrefecimento.

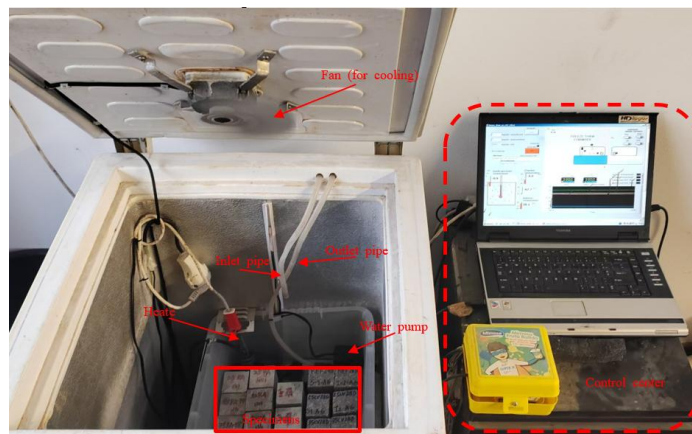


Figura 4.10 - Ensaio de gelo-degelo em curso.

O procedimento de ensaio adotado compreende as seguintes etapas:

1. Inicialmente, os provetes foram moldados com dimensões de $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ e curados durante 28 dias em água.

2. Os provetes foram colocados no interior da câmara. O ciclo térmico foi definido com uma variação de compreendida de -10°C a 15°C, com uma duração de 24 horas, sendo 12 horas para aquecimento e 12 horas para arrefecimento. A Figura 4.11 mostra a variação de temperatura de um ciclo. Esse processo foi repetido durante um determinado número de ciclos, que pode variar conforme o objetivo do ensaio, geralmente entre 30 e 100 ciclos, para simular o comportamento do betão em diferentes exposições climáticas. Durante o ensaio, os provetes foram inspecionados visualmente para identificar sinais de degradação, como fissuras ou destacamento superficial.

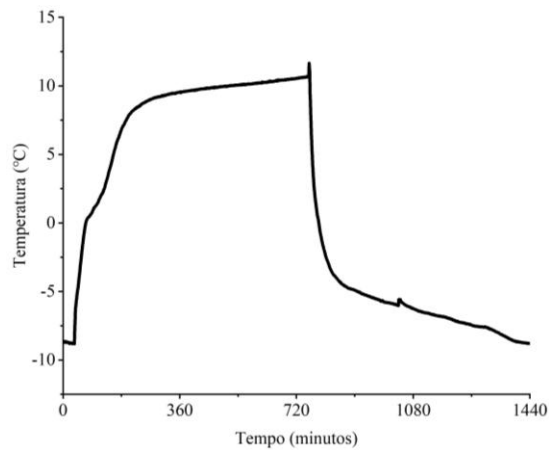


Figura 4.11 - A variação de temperatura real de um ciclo.

3. Após os ciclos 14, 28, 42, 56, 67, 70, 80, 90 e 100, registou-se a massa e determinou-se a variação do volume aparente dos provetes de acordo com a equação 4.12.

$$\Delta V_b = \frac{((M_{s0} - M_{h0}) - (M_{sn} - M_{hn})) \times 100}{(M_{s0} - M_{h0})} \quad 4.12$$

Em que:

ΔV_b : A variação do volume aparente, %;

M_{h0} : A massa do provete imerso em água no inicial, grama;

M_{s0} : A massa do provete saturado com superficial seco no inicial, grama;

M_{hn} : A massa do provete imerso em água no n ciclos, grama;

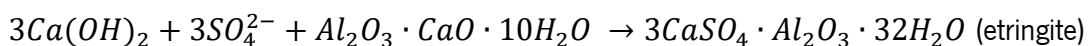
M_{sn} : A massa do provete saturado com superficial seco no n ciclos, grama;

5. O ensaio foi considerado concluído quando os provetes mostram sinais de degradação significativa ou após a conclusão do número de ciclos inicialmente definido. Desta forma, os provetes foram retirados da câmara e foram submetidos a ensaios de determinação de resistência à compressão para avaliar a variação da resistência mecânica devido aos ciclos de gelo-degelo.

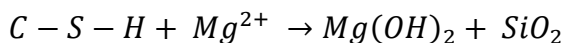
4.5.3. Sulfato de magnésio

A deterioração do betão por sulfatos é uma forma comum e grave de degradação. O princípio básico é que os sulfatos penetram na estrutura porosa do betão e reagem quimicamente com os materiais à base de cimento. Essas reações produzem compostos expansivos, como a etringite e o gesso, o que leva à fissuração e ao descascamento do betão. Além disso, os sulfatos podem dissolver e decompor os componentes da pasta de cimento, como o hidróxido de cálcio (CH) e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), resultando na perda de resistência e de capacidade de adesão do material cimentício. Como resultado, a durabilidade do betão é significativamente reduzida, especialmente quando exposto a ambientes com sulfatos por longos períodos, onde a taxa de deterioração é mais rápida e perigosa. O sulfato de magnésio é uma das substâncias sulfáticas mais prejudiciais à durabilidade do betão. Seu mecanismo de ataque inclui não apenas a ação dos íons sulfato, mas também o efeito corrosivo dos íons magnésio sobre o C-S-H. O mecanismo químico dessa reação é o seguinte.

Ação dos íons sulfato



Ação dos íons magnésio



Este ensaio foi realizado de acordo com a norma Europeia EN 1367-2 [253], os provetes foram preparados com uma dimensão 50x50x50 mm³ e curados durante 28 dias em água. A Figura 4.12 apresenta uma representação esquemática do ensaio de resistência do betão ao sulfato de magnésio. O betão foi colocado na solução de sulfato de magnésio no estado seco, e após 17 horas, os provetes foram removidos da solução e colocados em condição laboratoriais, durante duas horas. Em seguida, os provetes foram secos com recurso a uma estufa com temperatura de 105±5°C durante 24 horas. Por fim, os resíduos resultantes da desagregação superficial do provete foram limpos e a massa do provete foi determinada. Cada ciclo de ensaio teve a duração de 48 horas.

Os passos e procedimentos específicos do ensaio são detalhados a seguir.

1. Preparação dos provetes: Os provetes foram secos em estufa e a sua massa foi determinada, sendo registada como M_0 .
2. Preparação da solução: A solução de sulfato de magnésio foi preparada por 1500 g de sal cristalino e um litro de água. A massa volúmica de solução foi controlou em 1292 ± 0.008 g/ml. Além disso, a cada

3 ciclos, a massa volúmica da solução foi verificada de forma a garantir que a concentração da solução permaneça dentro da faixa exigida.

3. Execução dos ciclos: Após a primeira pesagem, as amostras foram colocadas na solução, enquanto uma bomba foi de forma a garantir a circulação da solução e reduzir o risco de precipitação de cristais de magnésio. Conforme mostrado na Figura 4.12, após um ciclo, a amostra é pesada novamente e registrada como M_n ($n \geq 1$).

4. Medições: Após cada ciclo, foi efetuado um registo da degradação ocorrida em cada provete, assim como da sua massa. A variação da massa dos provetes nos diferentes ciclos foi obtida de acordo com a equação 4.13.

$$\Delta m = \frac{M_0 - M_n}{M_0} \quad 4.13$$

Em que:

Δm : A variação da massa de provete, %;

M_0 : A massa do provete no inicial, grama;

M_n : A massa do provete no n ciclos, grama.

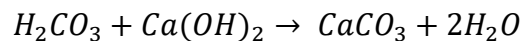
5. O ensaio foi considerado concluído quando os provetes apresentaram sinais evidentes de degradação ou após a conclusão de 30 ciclos.



Figura 4.12 - Diagrama esquemático do ensaio de resistência do betão ao sulfato de magnésio.

4.5.4. Carbonatação

A penetração do CO_2 no betão é a causa de carbonatação. O principal responsável pela despassivação das amaduras é o dióxido de carbono. Sendo assim, a carbonatação é um processo que se desenvolve ao longo do tempo, em que o CO_2 presente num ambiente reage com a presença de humidade e com os minerais do cimento hidratado [254]. O CO_2 proveniente da atmosfera reage nomeadamente com o material hidratado, particularmente o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) formando carbonato de cálcio (CaCO_3):



No âmbito geral, a carbonatação penetra para além da camada superficial muito lentamente, à medida que a humidade libertada da reação acima descrita, difunde-se para fora para preservar o equilíbrio da humidade entre a atmosfera e o interior do betão. Ferreira et al. apresentou [254] quanto à durabilidade, que o interesse da carbonatação reside objetivamente na redução do pH da água no betão endurecido, inicialmente partindo de valores de 12.6 a 13.5 para um valor inferior a 9.0.

No processo da carbonatação, quando todo Ca(OH)_2 disponível no sistema estiver carbonatado, significa que o valor de pH está na ordem dos 8 na estrutura, assim, o aço quando se encontra no meio alcalino do betão, cria uma camada fina de óxido, conhecida como camada de passivação que adere fortemente ao aço protegendo-o da reação com o oxigénio e a água. Para que não ocorra dano na camada protetora é necessário que a água presente no betão tenha um pH elevado, caso contrário, o pH baixa devido à carbonatação, a camada protetora é eliminada e ocorre a corrosão. O conhecimento da carbonatação no betão é importante, isto porque é necessário conhecer a profundidade da carbonatação.

O ensaio foi realizado de acordo com a norma EN 12390-12 [255], os provetes foram preparados com uma dimensão 100x100x425 mm. A concentração de CO_2 na câmara de carbonatação foi de $5 \pm 1\%$, e a profundidade de carbonatação do betão foi determinada nas seguintes datas: 30, 56, 63, 70, 90, 120, 150 e 180 dias.

A reação de carbonatação ocorre primeiro na superfície do betão e, em seguida, desenvolve-se gradualmente para o interior com a difusão de CO_2 no betão. A Equação 4.14 apresenta a relação entre a profundidade de carbonatação e o tempo.

$$x = k\sqrt{t} \quad 4.14$$

Em que:

x – A profundidade de carbonatação, em mm;

t – Tempo, em ano;

k – Um coeficiente, apresenta a caracterização de betão, em $\text{mm/ano}^{0.5}$.

Os passos e procedimentos específicos do ensaio são detalhados a seguir:

1. Previamente os provetes foram mantidos numa cura de 28 dias em água e posteriormente colocados no ambiente normal de laboratório durante 14 dias;
2. Duas faces laterais dos provetes foram revestidas com parafina, de forma a evitar a exposição ao CO_2 , deixando as outras duas faces expostas aos CO_2 , os topos dos provetes foram também impermeabilizados impedindo que ocorra carbonatação nessas faces;
3. A câmara de carbonatação foi ajustada de acordo com as condições normalizadas, concentração de CO_2 de $5\% \pm 1\%$, temperatura de $23\text{ }^\circ\text{C} \pm 3\text{ }^\circ\text{C}$ e uma humidade relativa de $60\% \pm 5\%$;
4. Ao 30, 56, 63, 70, 90, 120, 150 e 180 ciclos, retirou-se uma parte do provete e pulverizou-se com uma solução de fenolftaleína. Após uma hora realizou-se a medição da profundidade de carbonatação de cada lado do provete em 9 pontos.

4.6. DESEMPENHO TÉRMICAS DOS BETÕES

O consumo de energia durante a fase de operação dos edifícios tem aumentado ano após ano, sendo que os sistemas de climatização (aquecimento e arrefecimento) representam a maior parte desse consumo. Assim, torna-se crucial encontrar métodos eficazes que permitam reduzir o consumo de combustíveis fósseis. A energia solar, por sua vez, é uma fonte limpa e sustentável com grande potencial de aplicação. Este estudo visa melhorar o desempenho térmico do betão através da incorporação de agregados reciclados funcionalizados com materiais de mudança de fase (PCM). O desempenho térmico de betões com diferentes teores de agregado com PCM foi avaliado com base nas características climáticas da cidade de Guimarães, em Portugal.

A avaliação das propriedades térmicas do betão foi realizada em uma câmara climática controlada. Para isso, foram desenvolvidas Caxias de teste com formato cúbico, utilizando placas de betão de $200 \times 200 \times 50\text{ mm}^3$ como topo e base, e materiais isolantes de poliestireno expandido com 2.5 cm de espessura nas laterais (Figura 4.13). Em cada Caixa, um termopar do tipo K foi instalado na região central, a uma altura de 10 cm do fundo, para registrar a temperatura interna. Os termopares foram conectados a um sistema de aquisição de dados de alta sensibilidade (Agilent 34970A), garantindo que os dados de temperatura tanto da câmara climática quanto das células de teste fossem registados a

cada minuto de forma automática.



Figura 4.13 – Caixa de testes.

Os dados meteorológicos utilizados no ensaio foram obtidos a partir das estatísticas do Weather Underground [256] para a região de Guimarães. As leis de temperatura para cada estação do ano estão representadas na Figura 4.14. A simulação de cada estação foi realizada com base em três ciclos de ensaio, cada um com uma duração de 24 horas. A gama de temperaturas simuladas para a primavera variou entre 12°C e 29°C, para o verão entre 11°C e 44°C, para o outono entre 17°C e 34°C, e para o inverno entre 5°C e 22°C.

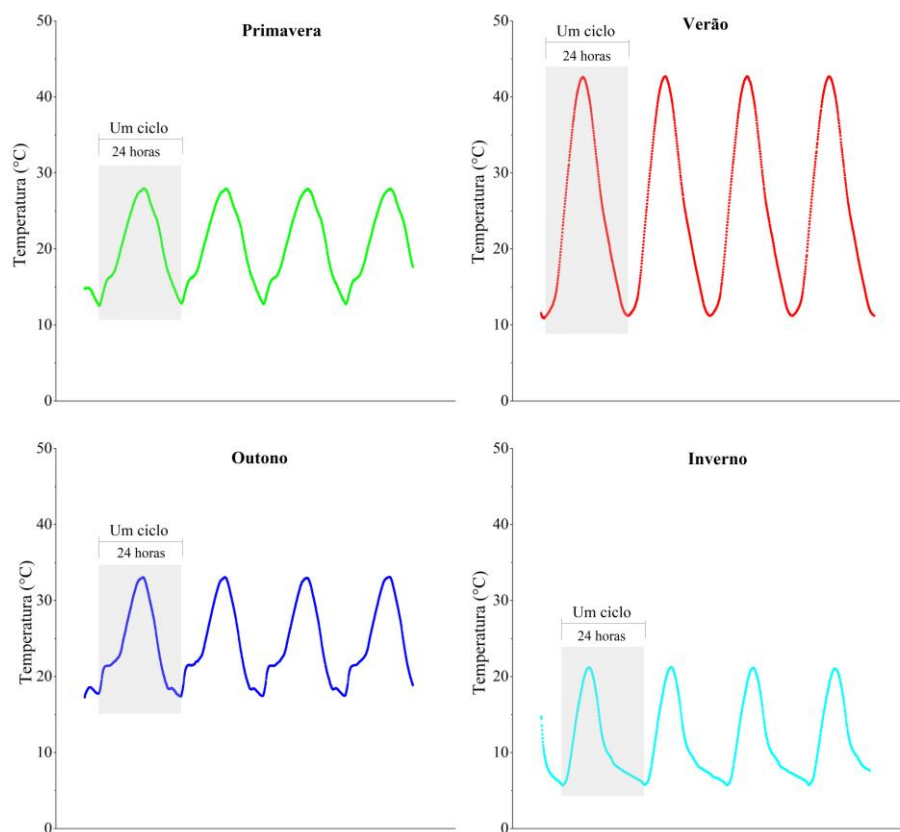


Figura 4.14 - Configurações de temperatura que simulam quatro estações.

CAPÍTULO

5. MATERIAIS E FORMULAÇÃO DO BETÃO

5.1. INTRODUÇÃO

O trabalho apresentado foi desenvolvido no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho. Numa fase inicial, foram selecionadas as matérias-primas a utilizar e determinadas as suas principais propriedades. Foram ainda desenvolvidas várias composições de betão ativados com agregado reciclado e com agregado reciclado funcionalizado com PCM, avaliando as suas principais propriedades físicas, mecânicas, térmicas e durabilidade. Os resultados aqui apresentados constituem uma base para os trabalhos futuros, permitindo adaptar metodologias e obter sensibilidade ao material, o que terá implicações importantes para aplicação na prática da construção.

5.2. MATERIAIS UTILIZADOS

5.2.1. Cimento

O cimento Portland é um material aglutinante inorgânico e hidráulico amplamente utilizado em obras de construção civil e engenharia civil. Devido ao seu bom desempenho mecânico e durabilidade, ele é o principal ligante em argamassas e betões. O cimento Portland é produzido a partir do clínquer de cimento, que é formado pela calcinação a 1450 °C de matérias-primas como calcário, argila e pequenas quantidades de minerais ricos em ferro e sílica. Geralmente, adiciona-se uma quantidade adequada de gesso para controlar o tempo de endurecimento durante o processo de hidratação. Quando em contato com a água, este material reage rapidamente, formando uma estrutura sólida e resistente, com características de alta resistência inicial, endurecimento rápido e excelente durabilidade.

Os principais componentes químicos do cimento Portland incluem silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferrita de aluminato tetracálcico (C_4AF), sendo o C_3S e o C_2S os principais responsáveis pela formação de resistência após a hidratação. Uma alta concentração de C_3S proporciona um aumento rápido na resistência inicial, enquanto a hidratação do C_2S é relativamente lenta, influenciando o crescimento da resistência a longo prazo. A quantidade de C_3A influencia significativamente a resistência do cimento ao ataque de sulfatos.

O processo de hidratação do cimento Portland envolve uma complexa série de reações químicas, principalmente entre o C_3S e o C_2S com a água, formando gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e cristais de hidróxido de cálcio (CH). O gel C-S-H é a principal fonte de resistência na pasta de cimento, fornecendo alta aderência e resistência à compressão. Os cristais de CH, devido à sua alta alcalinidade,

criam uma camada de passivação que protege o aço de reforço, aumentando a resistência da estrutura de betão armado à corrosão. No entanto, em determinados ambientes corrosivos, os cristais de CH podem se dissolver, afetando potencialmente a durabilidade do material.

O cimento Portland apresenta elevada resistência inicial, geralmente atingindo a resistência projetada em 28 dias de cura padrão. Devido à sua rápida taxa de endurecimento, é adequado para obras que exigem desenvolvimento de resistência inicial rápida, como peças pré-moldadas e reparações de emergência. Além disso, o cimento Portland possui boa resistência ao desgaste e durabilidade, suportando condições como ciclos de congelamento e descongelamento, e alternância entre humidade e secagem. Sua excelente trabalhabilidade e plasticidade permitem que seja combinado com diferentes tipos de agregados e aditivos, adaptando-se a variadas demandas de engenharia. Devido ao seu desempenho mecânico superior e durabilidade, o cimento Portland é amplamente aplicado em várias estruturas de construção, como estradas, pontes, túneis e obras hidráulicas. Ele apresenta vantagens notáveis em áreas que requerem alta resistência à compressão e resistência ao desgaste, como edifícios altos e pistas de aeroportos. Além disso, ajustando a composição mineral e a finura, é possível controlar a taxa de liberação de calor de hidratação, tornando-o adequado para projetos de diferentes escalas e em diferentes condições de temperatura ambiente.

Neste trabalho, foi selecionado um cimento CEM I 42.5R, produzido pela SECIL em Portugal. Seguindo a especificação do LNEC E 64 [257] determinou-se: massa volúmica real do cimento obtendo-se o valor de 3142 kg/m³. A Tabela 5.1 apresenta as características do cimento declaradas pelo produtor [258].

Tabela 5.1 – Características de CEM I 42.5R [258].

Propriedades		Método de ensaio	Valor Especificado
Perda ao Fogo		NP EN 196-2	≤ 5.0%
Resíduo Insolúvel		NP EN 196-2	≤ 5.0%
Teor de Sulfatos (em SO ₃)		NP EN 196-2	≤ 4.0%
Teor de Cloretos		NP EN 196-21	≤ 0.10%
Princípio de Presa		NP EN 196-3	≥ 60 mm
Expansibilidade		NP EN 196-3	≤ 10 mm
Resistência aos primeiros dias (MPa)		Resistência de referência (MPa)	
2 dias	7 dias	28 dias	
≥20	-	≥42.5 e ≤62.5	

5.2.2. Areia natural

A areia de rio desempenha um papel fundamental no betão, sendo um agregado miúdo essencial que contribui para melhorar a trabalhabilidade, durabilidade e propriedades mecânicas do material. A areia utilizada é composta principalmente por dióxido de silício (SiO_2). Apresenta uma forma de grão adequada e uma distribuição granulométrica uniforme, permitindo preencher os vazios entre o cimento e os agregados graúdos, aumentando assim a densidade e homogeneidade do betão. Devido à superfície relativamente lisa das partículas de areia de rio, contribui para a trabalhabilidade do betão, reduzindo a fricção durante a mistura do betão e facilitando a aplicação. Além disso, o tamanho moderado das partículas e a forma arredondada ajudam a minimizar a sua retração e o risco de fissuração, melhorando a durabilidade a longo prazo do betão [259].

No betão, a areia de rio, como parte da estrutura esquelética, não apenas eleva a resistência geral do material, mas também aumenta sua resistência à compressão e à flexão, conferindo maior capacidade de carga à estrutura sob esforços. A areia de rio contém uma quantidade adequada de minerais naturais em proporções finas, que podem preencher os microporos gerados durante o processo de hidratação do betão, melhorando sua impermeabilidade e resistência ao gelo-degelo. Em comparação com outros materiais alternativos, a areia de rio apresenta alta estabilidade e inércia química, exercendo, portanto, um impacto mínimo nas reações de hidratação do cimento e contribuindo para a uniformidade e desempenho mecânico do betão [260]. Foi adotado como agregado fino uma areia natural, comercial (empresa de Braga mat), com dimensões compreendidas entre 0 a 4 mm (Figura 5.1 a)).

De acordo com norma NP 954 (1973) [243], foi determinada a massa volúmica e absorção de água tendo-se obtido os valores de 2563 kg/m^3 e 1.19%, respetivamente. A massa volúmica é um parâmetro crucial que está relacionado com a massa volúmica do material. Uma absorção de água de 1.19% sugere uma baixa capacidade da areia em reter humidade, o que é favorável para garantir a estabilidade das misturas de betão, minimizando o risco de retração e fissuração. A granulometria afeta não apenas a trabalhabilidade e a compactação da mistura, mas também a resistência e durabilidade do betão endurecido. Uma distribuição granulométrica ideal permite um melhor preenchimento dos vazios entre as partículas, resultando em um betão mais denso e resistente [259].

A granulometria da areia natural foi caracterizada de acordo com a norma EN 933-1, e os resultados são apresentados na Figura 5.1 b), onde se observa a distribuição granulométrica das partículas de areia.

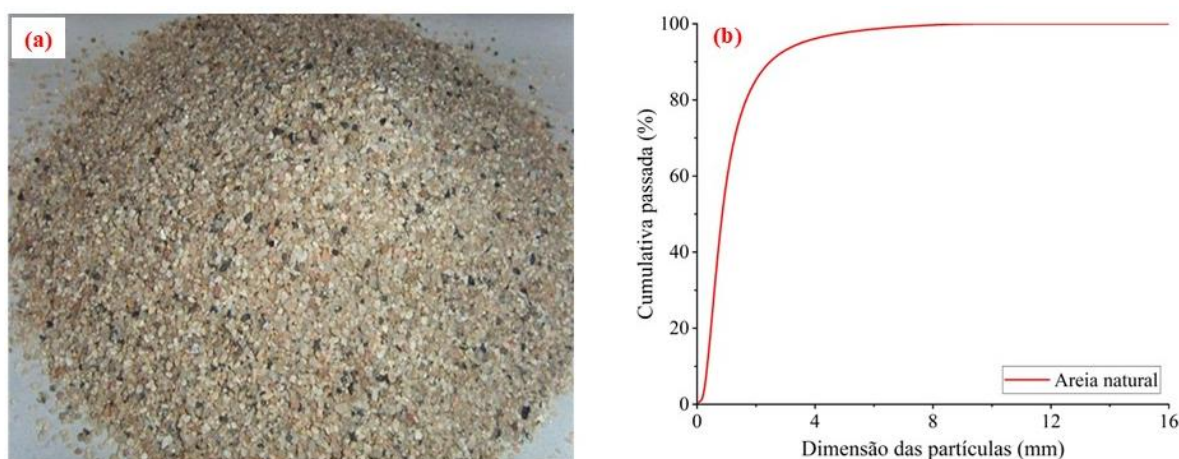


Figura 5.1 – Areia natural 0-4 mm (a) e Granulometrias de areia natural (b).

5.2.3. Brita

A brita desempenha um papel crucial no betão, atuando como agregado graúdo e sendo responsável por fornecer volume, resistência e durabilidade ao material. Como um dos principais componentes do betão, os agregados graúdos geralmente representam entre 60% a 80% do volume total do betão [261]. As características físicas do agregado graúdo, como tamanho de grão, forma e rugosidade da superfície, têm um impacto direto nas propriedades mecânicas do betão. Normalmente, brita de tamanho de grão moderado pode aumentar a densidade do betão, melhorando, assim, a sua resistência à compressão. Além disso, a resistência dos agregados graúdos deve atender aos requisitos de resistência do betão, garantindo a segurança durante a carga [262].

Em segundo lugar, a brita também exerce uma influência significativa na durabilidade do betão. A composição química e as propriedades físicas dos agregados determinam o desempenho do betão sob diferentes condições ambientais. Por exemplo, o uso de agregados graúdos com baixa absorção de água e baixa permeabilidade pode aumentar a resistência do betão à penetração de água e substâncias nocivas, melhorando sua durabilidade. Além disso, as britas afetam a trabalhabilidade do betão. Diferentes tipos de agregados graúdos influenciam a plasticidade e a segregação do betão. Agregados graúdos adequados podem otimizar a proporção de mistura do betão, proporcionando boa fluidez durante o processo de vibração e moldagem, facilitando a execução [263].

Em resumo, a brita como agregado graúdo no betão não se limita a fornecer suporte estrutural; ela também desempenha um papel decisivo nas propriedades mecânicas, durabilidade e desempenho de aplicação do betão. A granulometria, a forma das partículas, a porosidade e a resistência da brita

influenciam diretamente a trabalhabilidade, a resistência à compressão e a durabilidade do material. Portanto, compreender e otimizar as características dos agregados graúdos é de grande importância prática para melhorar o desempenho geral do betão. Para a elaboração deste trabalho, foi selecionada uma brita natural comercial, de origem granítica, com dimensões compreendidas entre 4 mm a 10 mm (Figura 5.2).

A brita utilizada neste estudo provém da região norte de Portugal (empresa Braga mat). De acordo com norma de NP 581 [242], os resultados da massa volúmica e a absorção de água são 2179 kg/m^3 e 0.51%, respetivamente. Essas propriedades físicas indicam que a brita possui uma capacidade relativamente baixa de absorção de humidade. A Figura 5.2 b) apresenta a distribuição granulométrica da brita.

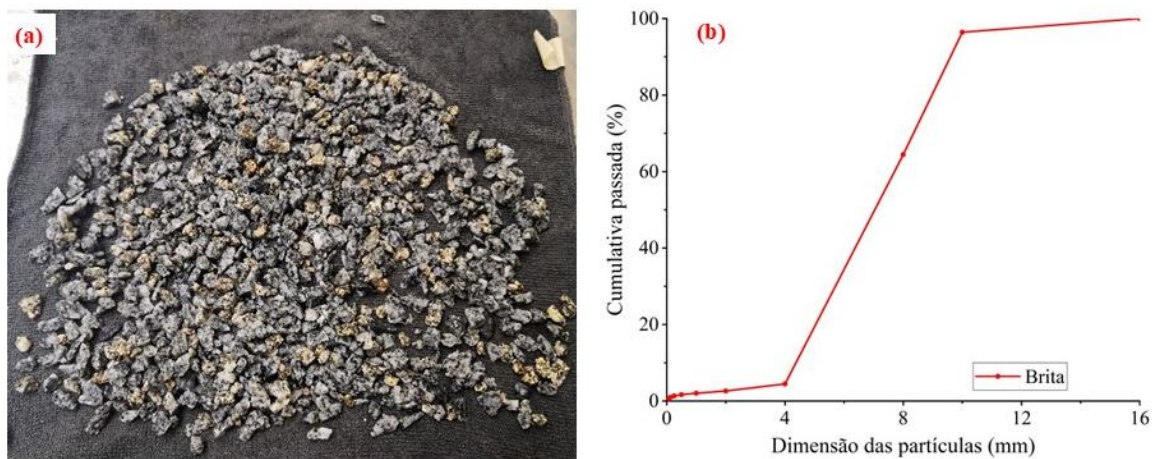


Figura 5.2 – A brita natural 4-10 mm (a) e Granulometrias de brita (b).

5.2.4. Agregado reciclado

A reciclagem de resíduo de construção e demolição (RCD) é uma prática cada vez mais importante na construção civil, contribuindo para a sustentabilidade e a preservação dos recursos naturais. Neste estudo, utilizou-se como material de base o agregado reciclado (AR), um resíduo de construção e demolição fornecido por uma empresa especializada no tratamento de RCD, localizada em Figueira da Foz, na região central de Portugal. O AR utilizado é um produto comercial com uma distribuição de tamanho compreendida entre 0 e 10 mm. Após uma seleção cuidadosa, foram selecionados AR com um tamanho entre 4 e 10 mm como o foco principal deste trabalho, visando garantir a homogeneidade e a adequação do material. A Figura 5.3 apresenta a distribuição granulométrica do AR. A comparação das distribuições de partículas AR e Brita permite verificar que a sua curva granulométrica é muito

semelhante, indicando que AR pode de fato substituir a brita. De acordo com a norma NP 581 (1969) [242], a massa volúmica e a absorção de água do AR foram determinadas, tendo-se obtido o valor de 2134 kg/m^3 e 7.82 %, respetivamente.

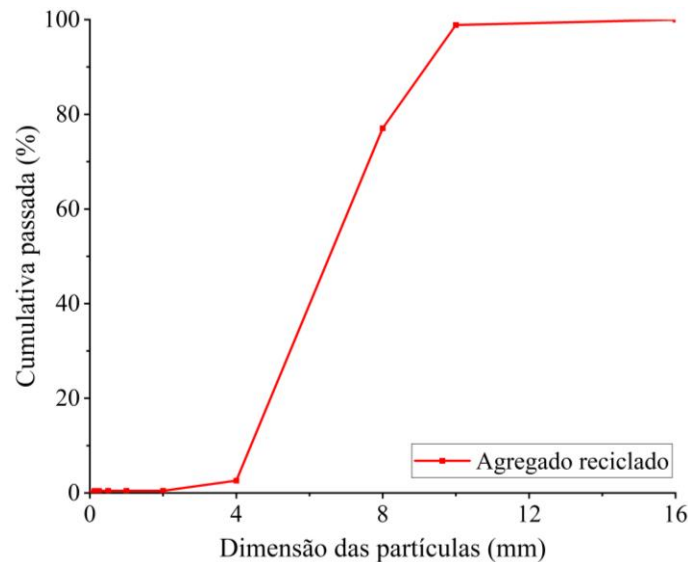


Figura 5.3 – Granulometrias de agregado reciclado.

Através de uma observação e análise detalhadas das estações de reciclagem de RCD, foram identificados os principais materiais constituintes e suas respetivas fontes. Os resíduos de argamassa provêm principalmente da camada de ligação dos tijolos nas paredes, geralmente compostos por uma mistura de cimento e areia, o que pode influenciar suas propriedades após a reciclagem. Os resíduos de tijolo, por sua vez, representam uma parte significativa das paredes não estruturais e parcialmente estruturais, e a integridade estrutural desses resíduos deve ser cuidadosamente considerada no processo de reciclagem. Além disso, os resíduos cerâmicos originam-se principalmente de revestimentos de fachadas, pavimentos e paredes interiores, apresentando geralmente baixa absorção de água e alta resistência ao desgaste, o que os torna adequados para a reutilização em materiais de construção, como betão. Os resíduos de betão, são provenientes de elementos estruturais, como lajes e pilares, são fundamentais para melhorar o desempenho geral do betão com agregado reciclado. Outros resíduos de argamassas são predominantemente provenientes das camadas de isolamento ou nivelamento das paredes, e suas características influenciam significativamente o desempenho do AR. É importante observar que os resíduos de pedra natural costumam ser oriundos da fachada ou das fundações dos edifícios, e as propriedades físicas desses materiais têm um impacto considerável na eficácia do AR. Assim, esses materiais representam os tipos mais comuns de resíduos de construção e demolição, e, após um tratamento adequado, podem ser eficazmente reciclados e reutilizados em diversas aplicações. Vale

ressaltar que os resíduos classificados como "plásticos" não são plásticos puros, mas sim uma mistura de partículas de pedra ou cerâmica, que se encontram parcialmente ou completamente envolvidas. Essa mistura pode impactar as propriedades físicas e químicas dos materiais reciclados.

Por meio da colheita de amostras em laboratório e da seleção manual, obtivemos a composição dos AR com um tamanho de 4 a 10 mm, calculando a proporção de cada material na massa total da amostra. Os resultados, apresentados na Figura 5.4, revelam a seguinte composição: 39.4% de argamassa, 20.6% de tijolo, 15.8% de cerâmica, 7.1% de resíduos de argamassas pintadas, 6.3% de pedra natural, 5.8% de betão, 2.5% de plástico, 1.7% de solo, 0.1% de vidro e vestígios de outros materiais. Essas descobertas são consistentes com a investigação de Bravo et al. [262], mostrando uma correlação próxima com a composição dos agregados reciclados produzidos nas cidades de Leiria, Sintra e Faro, em Portugal. Esta similaridade reforça a ideia de que esse tipo específico de agregado reciclado representa uma das principais fontes de materiais reutilizados no setor da construção em Portugal.



Figura 5.4 – A proporção de cada material na massa total de AR.

Além disso, a resistência dos principais agregados do AR foi testada com recurso a uma prensa universal. Começou-se por misturar minuciosamente e uniformemente o AR. Em seguida, foram selecionados aleatoriamente 20 partículas como amostras, cada uma de argamassa, tijolo, cerâmica, pedra e betão. A Figura 5.5 apresenta os resultados obtidos. As pedras apresentam os valores mais elevados de valor esmagamento, seguidas pela cerâmica e pelos tijolos. Por outro lado, o betão e a argamassa exibem menores valores de esmagamento, o que está diretamente relacionado à presença de uma maior quantidade de zonas de fraqueza em sua estrutura [136].

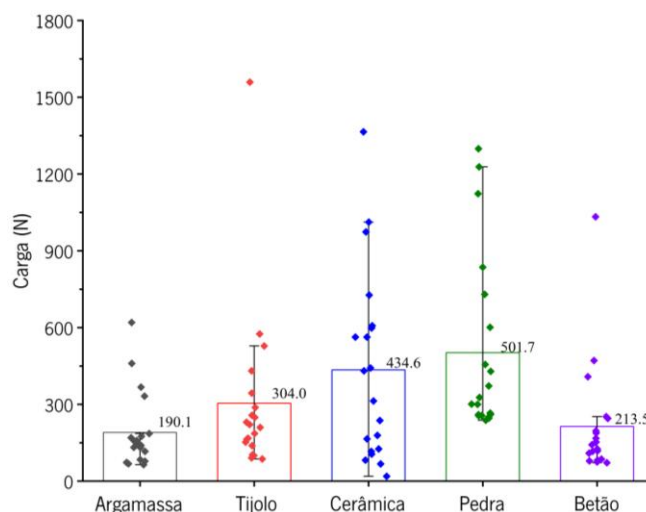


Figura 5.5 – Carga de esmagamento das partículas de AR.

5.2.5. Material de Mudança de Fase (PCM)

A parafina é um tipo de PCM, composta por uma mistura de hidrocarbonetos sólidos de cadeia longa, principalmente na forma de alcanos de cadeia linear ($\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$). O processo de fabricação da parafina libera uma quantidade significativa de energia térmica, especialmente quando o comprimento da cadeia de alcanos aumenta, o que geralmente resulta em um aumento na capacidade de armazenamento de calor (entalpia) e temperatura de transição [39]. Especificamente, a temperatura de transição da parafina está diretamente relacionada com número de átomos de carbono em sua estrutura, com uma faixa típica de temperatura de transição entre -12°C e 71°C , e entalpias que podem variar entre 128 kJ/kg e 257 kJ/kg [63]. Além disso, a parafina possui excelentes características de armazenamento de energia térmica; o armazenamento e a liberação de calor ocorrem a uma temperatura relativamente constante, sem efeito de super-arrefecimento. Isso confere à parafina uma alta eficiência de armazenamento de energia térmica. Quimicamente, a parafina é inerte e pode manter uma vida útil prolongada através de ciclos de mudança de fase, com temperaturas de fusão variando entre -9°C e 100°C , o que a torna adequada para aplicações em diversas condições de temperatura, adequadas às condições existentes no interior dos edifícios.

A parafina pura (PP), comercialmente conhecida como RT22HC e fabricada pela empresa RUBITHERM® (Berlim, Alemanha), foi selecionado para este estudo como material de mudança de fase para armazenamento térmico. A PP utiliza o processo de transição de fase entre os estados sólido e líquido (fusão e solidificação) para armazenar e liberar energia térmica a uma temperatura praticamente constante. A PP selecionada apresenta uma faixa de temperatura de transição de fusão e solidificação

entre 20°C e 23°C, com um pico principal em 22°C (Tabela 5.2) [264]. Estas características fazem da parafina um material com grande potencial de aplicação para a melhoria da eficiência energética e controlo térmico no interior dos edifícios.

Tabela 5.2 – As características do Material de Mudança de Fase [264].

Característica	Resultados	Unidades
Temperatura de fusão	20-23	(°C)
Temperatura de solidificação	23-22	(°C)
Capacidade de armazenamento de calor	190	(kJ/kg)
Capacidade de calor específico	2	(kJ/kg·K)
Massa volúmica no estado sólido (20 °C)	0.76	(kg/L)
Massa volúmica no estado líquido (50 °C)	0.7	(kg/L)
Condutividade térmica	0.2	(W/(m·K))
Ponto de degradação (inflamação)	>150	(°C)
Temperatura máxima de operação	50	(°C)

É importante considerar que neste trabalho se pretende incorporar PCM no AR, através da técnica de imersão, assim é necessário avaliar a variação volumétrica que o PCM pode sofrer se esta poderá afetar negativamente o AR. É sabido que a variação de volume da água no betão é suficiente para o danificar em ciclos de gelo-degelo, o que se encontra relacionado com a expansão volumétrica da água, que é cerca de 9% [265]. Para melhor observar a mudança de volume do PCM, foi utilizada uma proveta de vidro fina e longa, com volume total de 25 ml e uma escala mínima de 0.1 ml. O teste foi realizado sob condições de temperatura controlada e o PCM no estado líquido foi injetado na proveta (Figura 5.6).

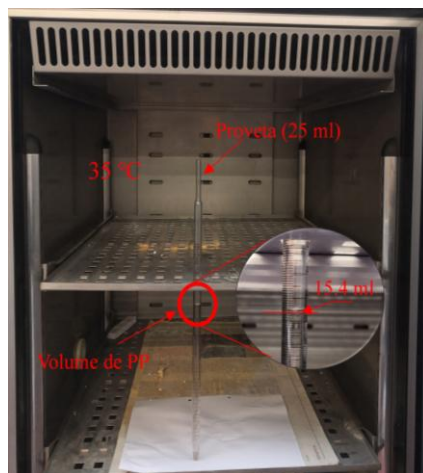


Figura 5.6 – O provete na câmara com 35 °C.

A Figura 5.7 apresenta a curva de variação de volume do PCM com a temperatura. Sendo possível observar, que temperaturas inferiores a 20°C e superiores a 20°C têm associada uma maior variação de volume cerca de 2.7%. Contudo, importa referir que esta variação de volume não é muito elevada, principalmente dentro da gama de temperaturas que se fará sentir no interior de um edifício e que será utilizada para a funcionalização do agregado reciclado com PCM.

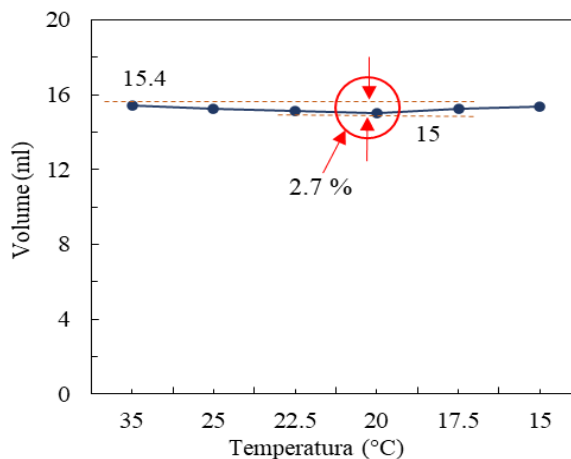


Figura 5.7 – Variação de volume da PP com o efeito da temperatura.

5.3. Preparação de ARPP

A absorção de PCM pelo agregado reciclado foi avaliada segundo dois métodos distintos, sendo estes: i) absorção à pressão atmosférica (Figura 5.8 - a); ii) absorção a vácuo (Figura 5.8 - b).

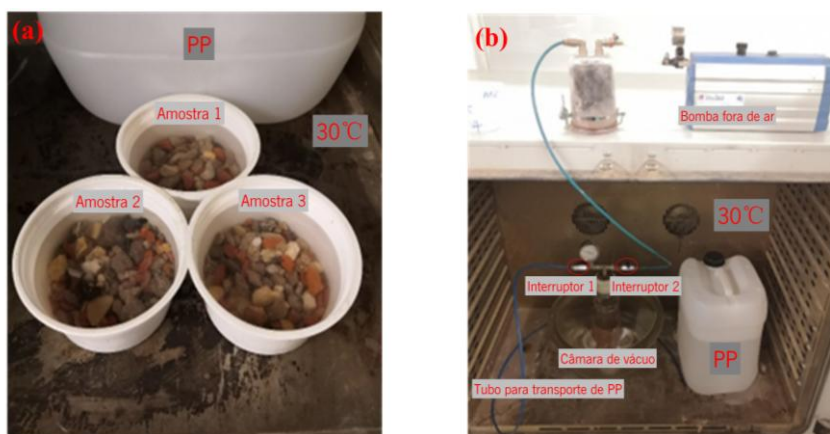


Figura 5.8 – Absorção de PCM pelo agregado reciclado: (a) sem vácuo; (b) com vácuo.

Para garantir a absorção máxima de PP pelo AR, as amostras de AR foram secas previamente em estufa a 105°C durante 24 horas. De forma a garantir uma correta absorção de PP pelo agregado reciclado, tornou-se necessário garantir a forma líquida da PP, pelo que este foi colocado numa estufa, a uma

temperatura controlada de 30°C, sendo a temperatura selecionada superior à temperatura de transição do PCM, cerca de 22°C e selecionada com base no exposto no subcapítulo 5.2.5. Em seguida, as amostras de AR foram imersas no PCM líquido por períodos distintos: i) uma hora; ii) quatro horas. As amostras foram mexidas regularmente com recurso a uma barra de ferro em intervalos de 15 minutos, de forma a garantir uma absorção adequada. Após os diferentes períodos e métodos de absorção de PCM pelo AR, este foi retirado com o auxílio de uma peneira e arrefecido em ambiente laboratorial, de forma os agregados térmicos (ARPP). Como mostrado na Figura 5.9, a superfície do agregado ARPP tornou-se lisa e húmida após o processo.

Para a absorção em condições de vácuo (Figura 5.8 – b), a câmara de vácuo foi posicionada dentro da estufa, enquanto a bomba de vácuo ficou fora da estufa. Inicialmente, as amostras de AR foram colocadas em caixas individuais, sendo que um total de três amostras foram posicionadas dentro da câmara de vácuo. Em seguida, a parte responsável pela liberação da PP, localizada no topo da câmara de vácuo, foi conectada às caixas de amostra de AR por meio de um tubo de transporte. Após a selagem adequada da câmara de vácuo, o “interruptor 2” foi aberto enquanto o “interruptor 1” foi fechado. A bomba de vácuo foi então ativada para se atingir uma condição de vácuo, sendo a pressão do ar dentro da câmara monitorizada pelo manômetro. A câmara foi mantida em funcionamento durante 3 horas de forma a garantir a remoção completa do oxigénio contido nos poros do agregado. Após a conclusão desta etapa, o “interruptor 2” e a bomba de vácuo foram fechados. Em seguida, o tubo conectado ao “interruptor 1” foi imerso no PCM líquido. Ao abrir o “interruptor 1”, O PCM na forma líquida foi transportado para as amostras de AR até que as mesmas estivessem completamente submersas. Neste estado, a absorção de PCM pelas amostras de AR foi testada durante uma e quatro horas, respetivamente.



Figura 5.9 –Agregado reciclado aditivado com PCM (ARPP).

A Tabela 5.3 apresenta os resultados de absorção de PP pelo AR após períodos de imersão de 1 hora e 4 horas, sob condições de pressão atmosférica e sob condições de vácuo. Foi possível observar que o

AR possui uma capacidade significativa de absorção de PP, sugerindo que a otimização da proporção de AR na mistura de materiais pode aumentar a eficiência do uso de PP em betão ou outros materiais de construção.

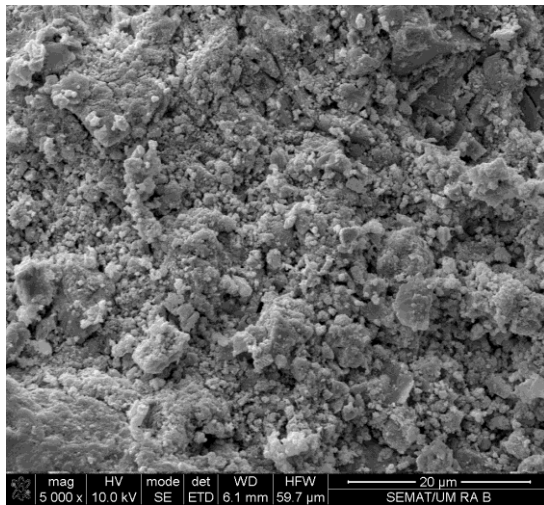
Tabela 5.3 – Absorção de PCM pelo agregado reciclado (%).

Método	1 hora	4 horas
Sem vácuo	7.47	8.02
Com vácuo	8.50	8.77

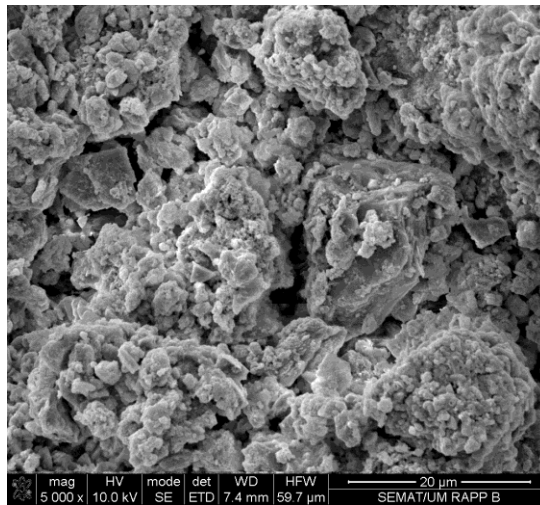
Os resultados obtidos indicam que, após 1 hora de imersão, a absorção de PP pelo AR em condições de vácuo é 1.03% superior àquela sob pressão atmosférica; após 4 horas, essa diferença é de 0.75%. Esses dados indicam que a aplicação de condições de vácuo tem um impacto limitado na melhoria da absorção de PP, sugerindo que, nas condições experimentais selecionadas, o ambiente de vácuo não aumentou significativamente a penetração do PP nos poros do AR. Esse resultado pode estar relacionado à estrutura porosa do AR. Simultaneamente, em condições de pressão atmosférica, a extensão do tempo de imersão de 1 para 4 horas aumenta a absorção de PP pelo AR em 0.55%, enquanto, sob vácuo, esse aumento é de apenas 0.27%. Isso sugere que, após 4 horas de imersão, a diferença na absorção de PP entre os métodos de pressão atmosférica e vácuo se torna mínima. É importante notar que a absorção a vácuo requer consumo de energia. Portanto, com base nos resultados experimentais, a escolha da absorção sob pressão atmosférica durante 4 horas não só apresenta um bom desempenho de absorção, como também é uma alternativa prática e energeticamente mais eficiente.

Além disso, a microestrutura dos materiais principais que compõem o AR (argamassa, tijolo e cerâmica) foi examinada com uma ampliação de 5000x antes e depois da imersão em PP, como ilustrado na Figura 5.10. A partir da Figura 5.10a, observa-se claramente que as partículas de argamassa estão cobertas por numerosas partículas finas na superfície, sob as quais são visíveis diversas fissuras e poros. Isso revela a presença de várias fissuras internas nas partículas. Após a absorção de PP (Figura 5.10b), as partículas finas são removidas, e a maioria dos poros e fissuras são preenchidos pela PP, resultando numa superfície relativamente com menor rugosidade e menor índice de partículas soltas. A superfície dos resíduos cerâmicos (Figura 5.10c) apresentou irregularidades e abundância de poros, que foram cobertos com sucesso pela presença de PP após a imersão (Figura 5.10d). A Figura 5.10e ilustra as características da superfície das partículas de azulejo cerâmico, que apresentaram uma textura relativamente lisa, mas com poros, indentações superficiais e uma camada de poeira. Após a imersão

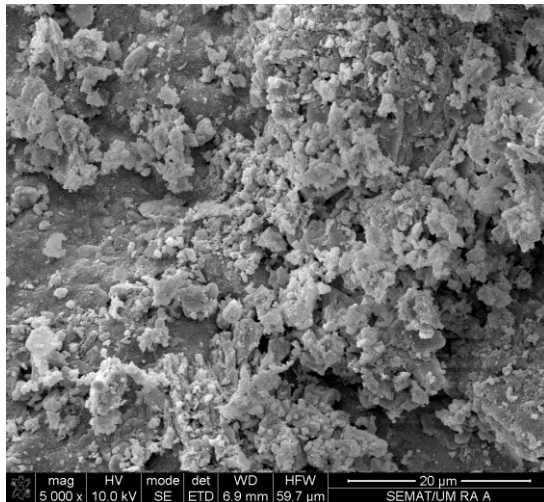
em PP (Figura 5.10f), foi demonstrada a cobertura eficaz das indentações superficiais nas partículas de azulejo cerâmico pelo PP.



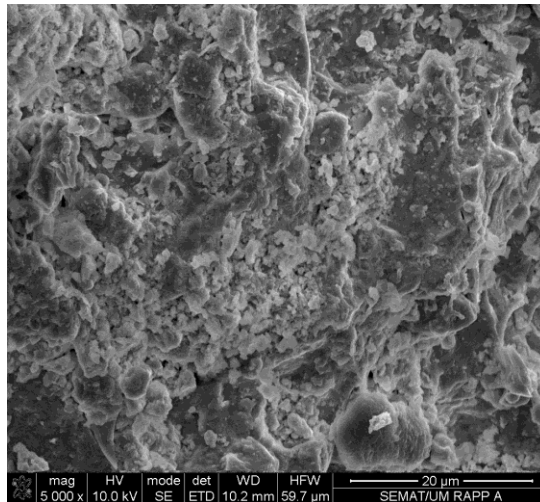
(a) Partículas de argamassa



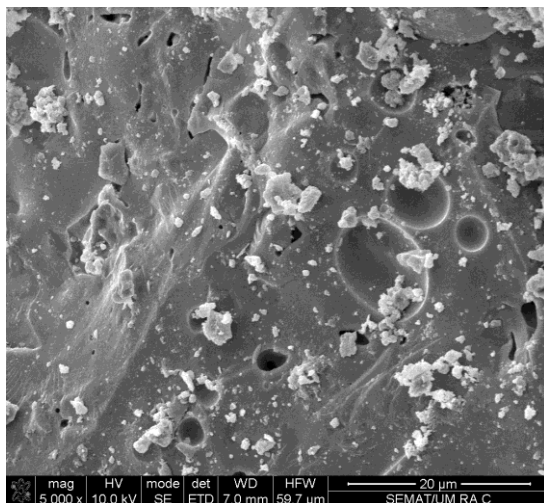
(b) Partículas de argamassa com PP



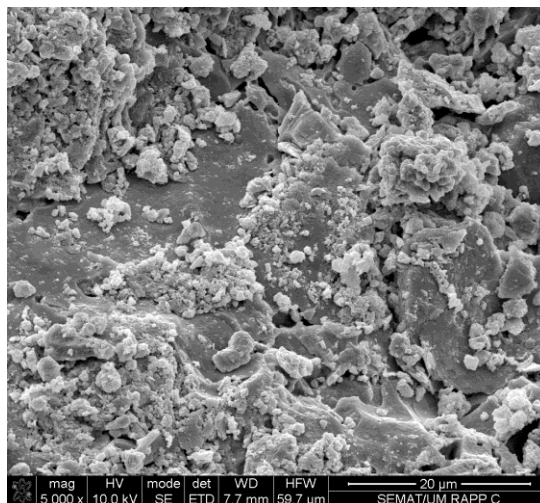
(c) Partículas de tijolo



(d) Partículas de tijolo com PP



(e) Partículas de cerâmica



(f) Partículas de cerâmica com PP

Figura 5.10 – Microestrutura dos principais materiais de AR.

5.4. Formulação de betões

5.4.1. Metodologia Faury

O betão, é composto por água, cimento e agregados, sendo um material de construção cujo desempenho endurecido depende significativamente das dosagens dos seus componentes. Para otimizar o betão, este estudo adotou-se o método empírico das curvas de referência de Faury [266], que fornece uma curva granulométrica para maximizar a compacidade do betão. Este método considera a natureza dos agregados, a trabalhabilidade desejada, as condições de aplicação na estrutura, o efeito de parede e a presença de armaduras, guiando a determinação de parâmetros essenciais, como granulometria e dimensão máxima dos agregados, dosagem de cimento, relação água/cimento, volume de vazios, e parâmetros de compressão.

O design do betão neste estudo segue uma abordagem científica com o objetivo de otimizar a proporção de materiais para melhorar o desempenho do betão e a eficiência no uso dos recursos. Primeiramente, foi desenvolvido um betão referência (REF) de classe C30/37, de acordo com as normas EN 206-1 (2007) [245] e EN 12350-2 (2002) [267], com um abaixamento inicial previsto de classe S3 (10-16 cm). A dosagem específica é composta por 400 kg/m³ de cimento, 393 kg/m³ de areia natural, 1035 kg/m³ de brita e 220 kg/m³ de água. Obteve-se a partir da curva de Faury representada na Figura 5.11.

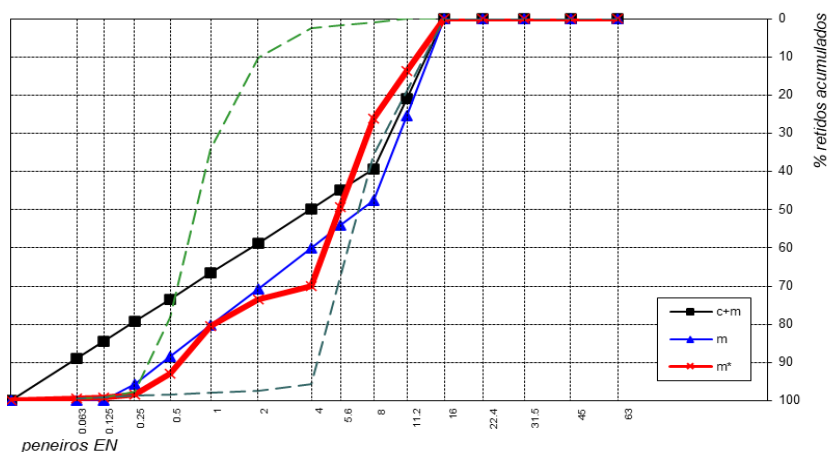


Figura 5.11 –Apresentação da curva de Faury para o betão referência.

Onde:

c + m: Curva de referência de Faury: ligante + agregados;

m - Curva teórica de referência de Faury: agregados;

m^* - curva real: agregados.

Todos os agregados foram pesados em estado seco e posteriormente utilizados no processo de mistura no estado saturado para garantir a distribuição adequada de água e uma mistura homogênea. A mistura foi realizada com um misturador de eixo vertical com capacidade de 6 litros, numa temperatura ambiente controlada entre 20°C e 22°C, conforme condições de teste padrão. Através da equação 5.1, o controlo preciso da dosagem unitária do betão foi alcançado, assegurando a consistência e fiabilidade do desempenho do material.

$$\frac{M_C}{\rho_C} + \frac{M_{AN}}{\rho_{AN}} + \frac{M_B}{\rho_B} + \frac{M_a}{\rho_a} = 1 \quad 5.1$$

Em que:

M_C – Dosagem de cimento por m³ de betão, em kg;

M_{AN} – Dosagem de areia natural por m³ de betão, em kg;

M_B – Quantidade de brita por m³ de betão, em kg;

M_a – Quantidade de água por m³ de betão, em kg;

ρ_C – Massa volúmica de cimento, em kg/m³;

ρ_{AN} – Massa volúmica de areia natural, em kg/m³;

ρ_B – Massa volúmica de brita, em kg/m³;

ρ_a – Massa volúmica de água, em kg/m³.

Este estudo visa avaliar sistematicamente o impacto de diferentes proporções de substituição de agregados reciclados no desempenho do betão. Com base nos resultados de caracterização apresentados na secção 5.1, verificou-se que o AR e as britas apresentam semelhança na distribuição granulométrica. Assim, mantendo o volume unitário do betão referência constante, o AR ou o ARPP substituiu a brita nas proporções de 25%, 50%, 75% e 100%, respetivamente. O ajuste da relação água/cimento foi realizado de forma a manter o abaixamento do betão fresco dentro do intervalo predefinido (Classe S3). Na primeira série de ensaios, utilizou-se o AR para substituir a brita natural e, com base nas propriedades físicas do agregado e na forma das partículas de AR, ajustou-se o teor de água nas misturas, considerando a absorção de água dos agregados para garantir a trabalhabilidade do betão fresco. A segunda série de ensaios usou o ARPP nas mesmas proporções para substituir a brita. O processo de preparação de todas as misturas encontra-se detalhado na Figura 5.12, fornecendo o design experimental completo para analisar o impacto dos agregados reciclados nas propriedades físicas e mecânicas do betão.

Com base nas primeira e segunda séries, a terceira série de experimentos introduz a PP líquida, usando como base betões com 75% e 100% de ARPP, designados como 75CP e 100CP. Incorporando 7,5% e

15% de PCM líquido na mistura para substituir proporcionalmente a areia de rio, obtiveram-se os betões designados como 75ARPP+7.5, 75ARPP+15, 100ARPP+7.5 e 100ARPP+15. Este trabalho visa analisar sistematicamente o efeito do teor máximo de PP nas propriedades térmicas do betão, com foco especial na estabilidade térmica do material em condições de variação de temperatura.

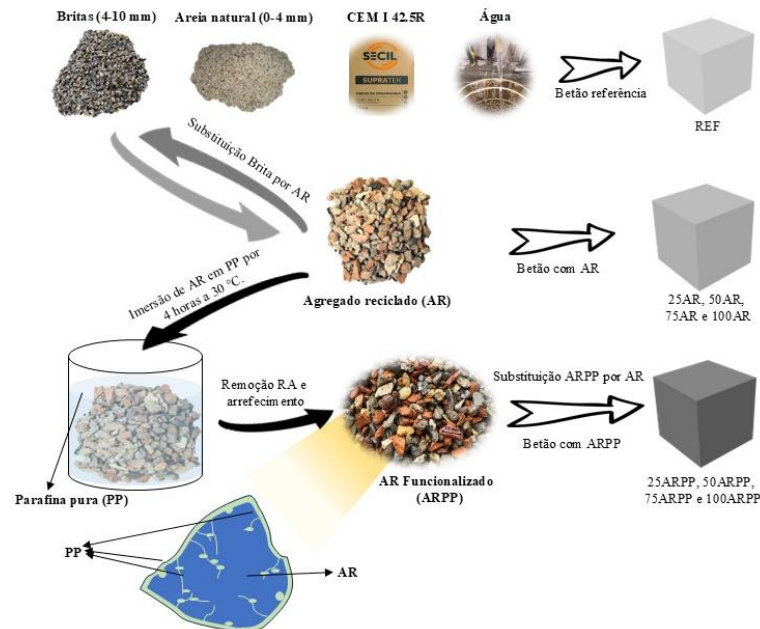


Figura 5.12 – Processo de preparação das diferentes composições de betão.

O diagrama de produção do betão, apresentado na Figura 5.13, descreve detalhadamente os procedimentos experimentais, fornecendo uma orientação padronizada para a execução dos ensaios. Para assegurar a precisão na composição das misturas, os volumes de substituição da areia foram ajustados com base na fórmula 5.1, garantindo a confiabilidade e consistência dos dados experimentais obtidos em cada composição testada.



Figura 5.13 – O processo de preparação de terceiras composições.

CAPÍTULO

6. BETÃO COM AGREGADO RECICLADO ADITIVADO COM PCM

6.1. Composições de betões

A Tabela 6.1 mostra-se as composições de betão com agregado reciclado ou agregado reciclado funcionalizado. O trabalho físico e mecânico destas composições foi publicado [268,269].

Tabela 6.1 – Composição de betões com AR ou ARPP (kg/m³).

Composições	Cimento	Água	Areia natural	Brita	AR	ARPP
REF	400	220	393	1035	-	-
25AR	400	230	393	820	273	-
50AR	400	230	393	552	552	-
75AR	400	230	393	278	835	-
100AR	400	230	393	-	1125	-
25ARPP	400	240	393	804	-	268
50ARPP	400	240	393	542	-	542
75ARPP	400	240	393	274	-	821
100ARPP	400	246	393	-	-	1093

6.2. Comportamento físico

6.2.1. Água de amassadura

Durante o processo de mistura do betão, a quantidade de água utilizada foi ajustada para alcançar a trabalhabilidade desejada, determinada pelo ensaio de abaixamento. A Figura 6.1 apresenta as quantidades de água de amassadura (água efetiva) no betão fresco. O teor de água efetiva no betão com AR aumentou em 4.5%. Isso pode ser atribuído à superfície áspera e irregular do AR, que exige um volume maior de pasta de cimento para melhorar a trabalhabilidade. No betão fresco com AR funcionalizado, o conteúdo de água efetiva aumentou ainda mais em 9% para as composições que continham 25%, 50% e 75% de AR funcionalizado, e em 11.8% para o betão que continha 100% de AR funcionalizado. Esse fenómeno pode ser explicado pelo facto de que, durante a mistura, parte da PP sólida se desprende da superfície do AR funcionalizado, atraindo uma fração da pasta de cimento e resultando em um aumento no consumo de água efetiva. Esse efeito é particularmente pronunciado no betão com 100% de ARPP, como evidenciado pela presença de PP disperso na pasta de cimento.

Por outro lado, o AR encontra-se em estado saturado durante a mistura, e uma parte da sua água é

gradualmente libertada para a pasta ao longo do processo. Esse fenómeno aumenta a trabalhabilidade inicial do betão fresco, resultando em um abaixamento inicial maior. Consequentemente, a presença de AR reduz a necessidade de água de amassadura para atingir o mesmo nível de trabalhabilidade no estado fresco. Majhi et al. [183] concluíram que a maior capacidade de absorção de água do AR requer mais água absorvida para saturar os agregados, resultando em um conteúdo inicial de água livre mais alto no betão fresco, devido à presença de numerosos poros abertos no AR. Kou et al. [270] e Behera et al. [158] demonstraram que esse maior conteúdo inicial de água livre não afeta adversamente a resistência do betão. Esta situação indica que, por meio do ajuste adequado da relação água-cimento e do tratamento dos agregados, é possível otimizar eficazmente o desempenho e a durabilidade do betão utilizando agregados reciclados e tratamentos funcionalizados.

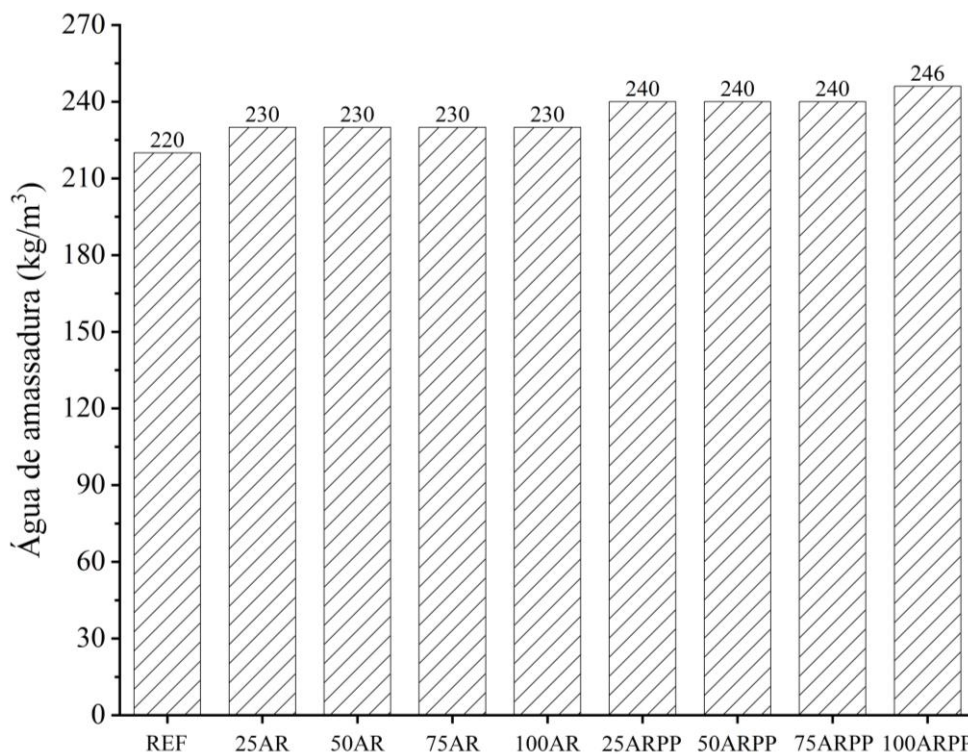
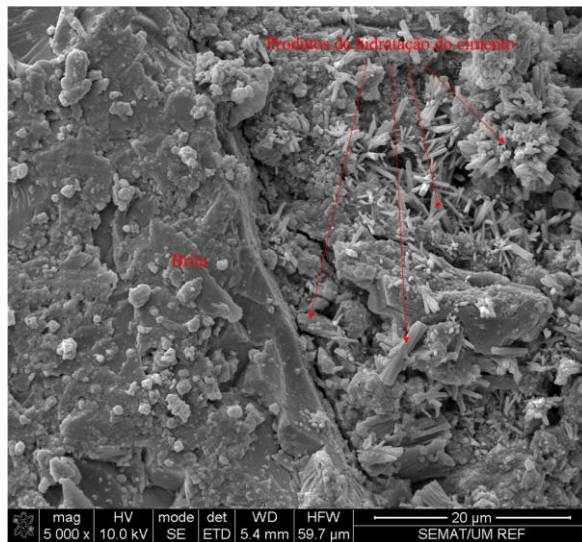


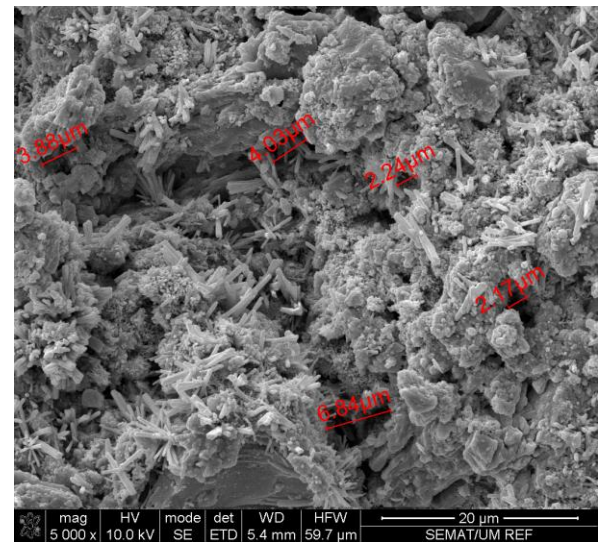
Figura 6.1 – Água de amassadura.

6.2.2. Microestrutura

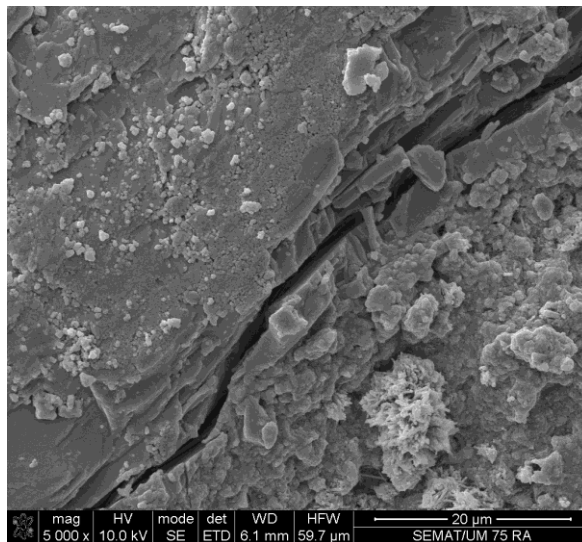
A Figura 6.2 apresenta a microestrutura das diferentes composições de betão, incluindo o betão de referência (REF) e as composições com incorporação de 75% de agregado reciclado (75AR), 100% de agregado reciclado (100AR), 75% de agregado reciclado funcionalizado com PCM (75ARPP) e 100% de agregado reciclados funcionalizado com PCM (100ARPP).



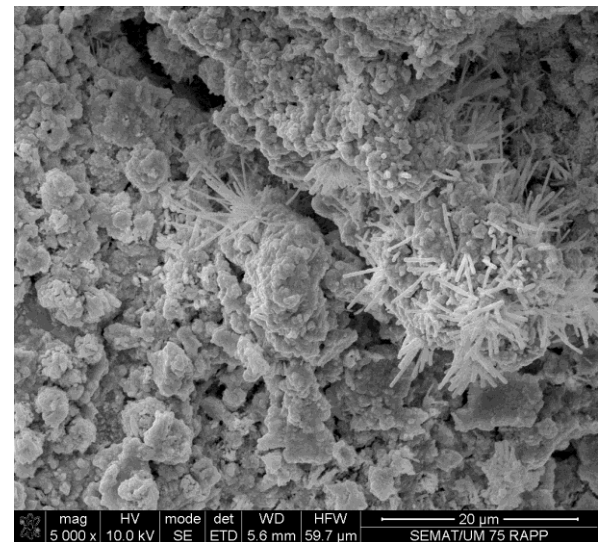
(a) REF-interface brita e cimento



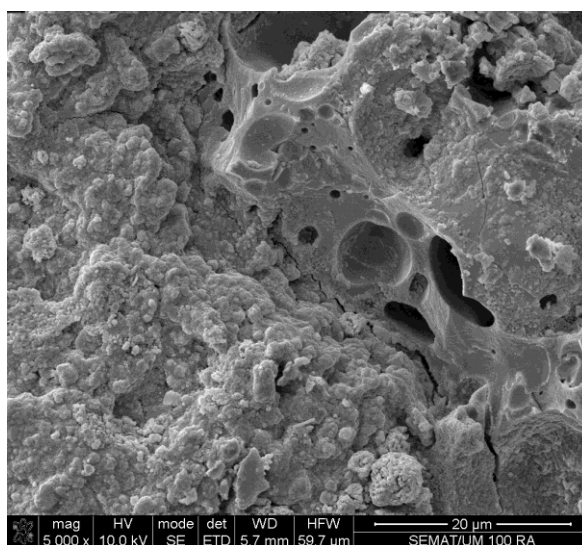
(b) REF- Produtos de hidratação do cimento



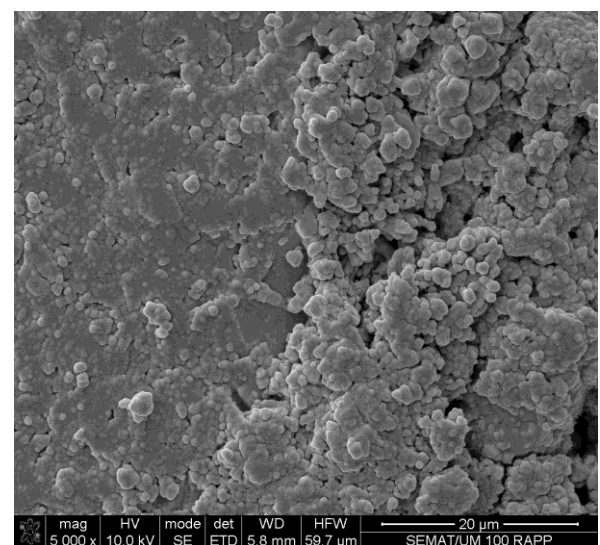
(c) 75AR-interface AR e cimento



(d) 75ARPP



(e) 100AR-interface AR e cimento



(f) 100ARPP

Figura 6.2 – Microestrutura de betão com AR e betão com ARPP.

Na Figura 6.2 (a), observa-se claramente a presença de uma microfissura na zona de transição interfacial (ZTI), indicando que a fragilidade da ZTI pode fragilizar as suas propriedades mecânicas e durabilidade [271]. A Figura 6.2 (b) revela ainda a existência de uma microestrutura mais porosa, o que aumenta a absorção de água e a absorção capilar do betão, afetando diretamente a sua durabilidade [272]. Quando se incorporou 75% de AR no betão (Figura 6.2 (c)), notou-se uma fissura larga e profunda na ZTI em comparação com o betão referência, indicando uma degradação direta nas propriedades mecânicas do betão. A Figura 6.2 (d) exhibe a microestrutura da ZTI do betão com 75% de ARPP. Comparando com a Figura 6.2 (c), é evidente que a PP preencheu eficazmente os poros e fissuras no betão, processo que ocorre durante a transição da PP de sólida para líquida, decorrente da funcionalização do agregado reciclado com PCM, melhorando a coesão na ZTI.

A Figura 6.2 (e) ilustra a ZTI do betão com 100% de AR, onde uma fissura é visível entre o agregado e o produto a matriz cimentícia do betão, além disso a superfície do agregado exhibe múltiplos poros e fissuras. Estas características contribuem para a diminuição das propriedades mecânicas e o aumento da absorção de água no betão, que tal como referido anteriormente podem prejudicar o desempenho do betão. Como mostrado na Figura 6.2 (f), as fissuras e poros dentro da ZTI são eficazmente preenchidos com PP, reforçando a integridade estrutural da região ZTI. Esse efeito de reforço é notavelmente mais acentuado em comparação com a Figura 6.2 (d), devido ao aumento da quantidade de PP no betão com a incorporação de 100% de ARPP.

6.2.3. Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica (TGA) desempenha um papel crucial na investigação de materiais cimentícios, oferecendo dados essenciais para avaliar o processo de hidratação do cimento e a formação e estabilidade dos produtos hidratados. Neste estudo, a análise termogravimétrica foi combinada com a análise termogravimétrica diferencial (DTG), permitindo uma investigação detalhada sobre a influência da adição de PP na microestrutura e nos produtos de hidratação do betão. As Figura 6.3, Figura 6.4 e Figura 6.5 apresentam as curvas DTG e TGA dos betões de REF, 100AR, 75ARPP e 100ARPP, e, conforme a literatura [273–276], resumem as faixas de temperatura características de reações envolvendo diferentes substâncias no betão (Figura 6.3 (a)).

A curva DTG na Figura 6.3a revela quatro picos significativos para o betão de referência, localizados aos 83°C, 107°C, 424°C e 677°C. No betão endurecido, geralmente existem duas formas distintas de água: a água livre e a água não evaporável. A água livre está associada à trabalhabilidade inicial e à saturação

dos agregados, com temperatura de evaporação entre 80°C e 100°C [273]. A água não evaporável refere-se à água de cristalização gerada no processo de hidratação do cimento, com temperatura de evaporação entre 105°C e 550°C [273,274]. Assim, o pico correspondente aos 83°C representa a evaporação da água livre, enquanto o pico aos 107°C está relacionado à libertação da água não evaporável. Além disso, o pico a 424°C corresponde à desidroxilação do Ca(OH)_2 , que forma óxido de cálcio (CaO) e moléculas de água (H_2O) [275,277]; o pico a 677°C representa a decomposição do CaCO_3 , formando óxido de cálcio e dióxido de carbono (CO_2) [276,278].

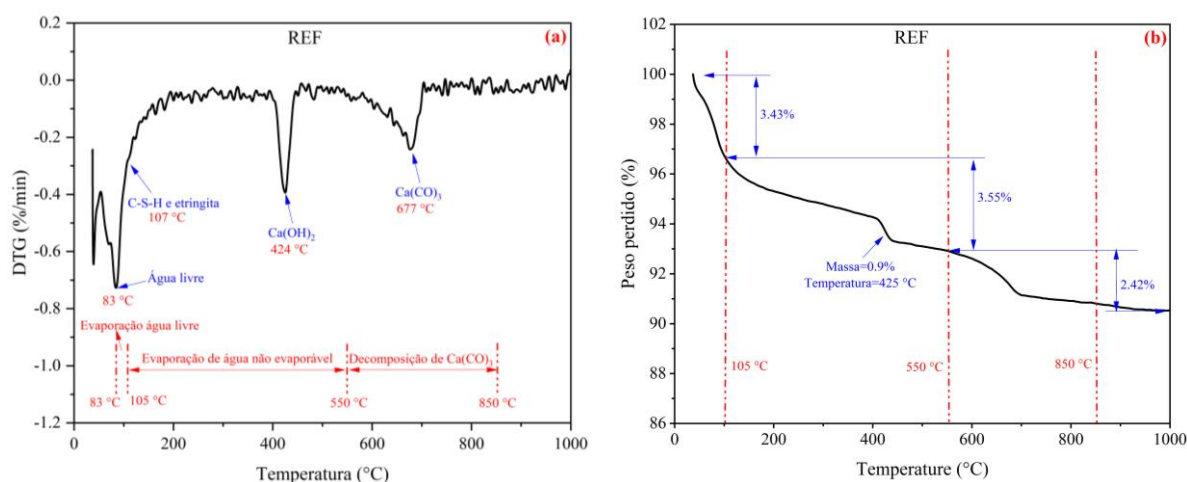


Figura 6.3 - Os resultados de TGA do betão referência, resultado de DTG (a) e resultado TGA (b).

Na Figura 6.3 (b), a curva TGA mostra a perda de massa do betão de referência durante o aquecimento de temperatura ambiente até 1000°C, com uma perda total de massa de 9.4%. Dentre essa perda, a água livre representa aproximadamente 36.5%, enquanto a água não evaporável e o Ca(OH)_2 contribuem com cerca de 37.8%. A presença de Ca(OH)_2 sugere um possível atraso no processo de hidratação do cimento, algo especialmente comum quando novos materiais são adicionados ou modificados [277]. Além disso, a decomposição do CaCO_3 corresponde a aproximadamente 25.7% da perda total de massa, indicando uma presença significativa de produtos de carbonatação, que pode impactar a estabilidade e o desempenho a longo prazo do betão, especialmente quando estiver armado.

Na análise da curva DTG do betão com 100% de agregado reciclado (Figura 6.4 (a)), observou-se que, além de manter quatro picos principais (localizados em 86 °C, 107 °C, 424 °C e 694 °C), há um pico mais pronunciado em 694 °C em comparação ao betão referência. Esse aumento no pico pode ser atribuído à presença de argamassa e betão envelhecidos no AR, que foram expostos às condições ambientais por um longo período. Esse ambiente favoreceu a reação química entre o Ca(OH)_2 e o CO_2 no interior do AR, levando à formação de uma maior quantidade de CaCO_3 [274,275]. Esse processo de

carbonatação, que ocorreu anteriormente no agregado reciclado, faz com que ele apresente uma temperatura de decomposição mais alta durante a análise TGA.

Além disso, o pequeno pico observado por volta de 694 °C pode ser explicado pela taxa inconsistente de decomposição do CaCO_3 , devido à trituração parcial irregular do AR. Como demonstrado na Figura 6.4b, a perda de massa de CaCO_3 é aproximadamente o dobro da do betão referência, indicando que o teor de carbonato de cálcio no AR é significativamente maior.

A perda de massa de água livre e de água não-evaporável também apresentou um aumento, fenómeno este que pode ser atribuído à maior absorção de água pelos agregados reciclados e ao aumento do teor total de água na mistura de betão. A perda de massa total do betão com 100% de AR foi de 12.97%, evidenciando o maior teor de água da amostra. Esse teor elevado de água implica que o betão com AR pode apresentar um atraso no desenvolvimento de resistência inicial, uma vez que a presença de Ca(OH)_2 não ativo indica que o processo de hidratação ainda está em desenvolvimento e parte da reação está incompleta, o que pode retardar o desenvolvimento de resistência e afetar a durabilidade do betão com AR.

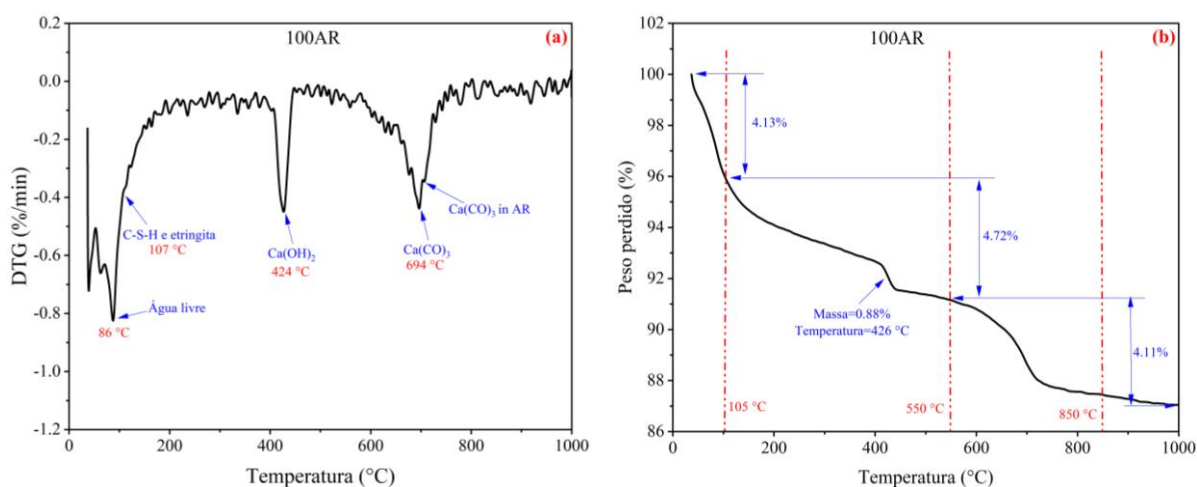


Figura 6.4 – Os resultados de TGA do betão100AR, resultado de DTG (a) e resultado TGA (b).

O betão com ARPP apresenta cinco picos evidentes na curva de análise termogravimétrica diferencial (DTG), revelando as características reativas multiestruturais das suas componentes. De acordo com as Figura 6.5 (a) e (c), o betão com 75% e 100% de ARPP exibe um primeiro pico em torno de 80 °C, associado à evaporação da água livre na matriz de betão. O segundo pico, em torno de 105 °C (109 °C e 107 °C, especificamente), corresponde à presença de água não evaporável nas fases C-S-H e etringite. O terceiro pico, próximo de 150 °C (152 °C e 171 °C), está diretamente relacionado à presença de PP

na AR, pois este pico representa a temperatura característica de degradação da PP (Tabela 5.2). O quarto pico (422 °C e 424 °C) está associado à desidroxilação do Ca(OH)_2 , indicando a decomposição de Ca(OH)_2 em CaO e água. O quinto pico (685 °C e 696 °C) refere-se à decomposição do CaCO_3 , um produto da carbonatação do betão que se decompõe em temperaturas elevadas. É relevante notar que, na amostra de betão 100ARPP, o pico em torno de 150 °C é mais pronunciado do que no betão 75ARPP, devido ao maior teor de PP em 100ARPP. De forma similar, observa-se uma diferença no quinto pico (por volta de 690 °C), atribuída à maior quantidade de AR presente no betão 100ARPP. Além disso, os pequenos picos observados nas proximidades do quinto pico (690 °C) podem ser associados à taxa de decomposição inconsistente do CaCO_3 , possivelmente causada pela distribuição heterogênea do tamanho das partículas de AR.

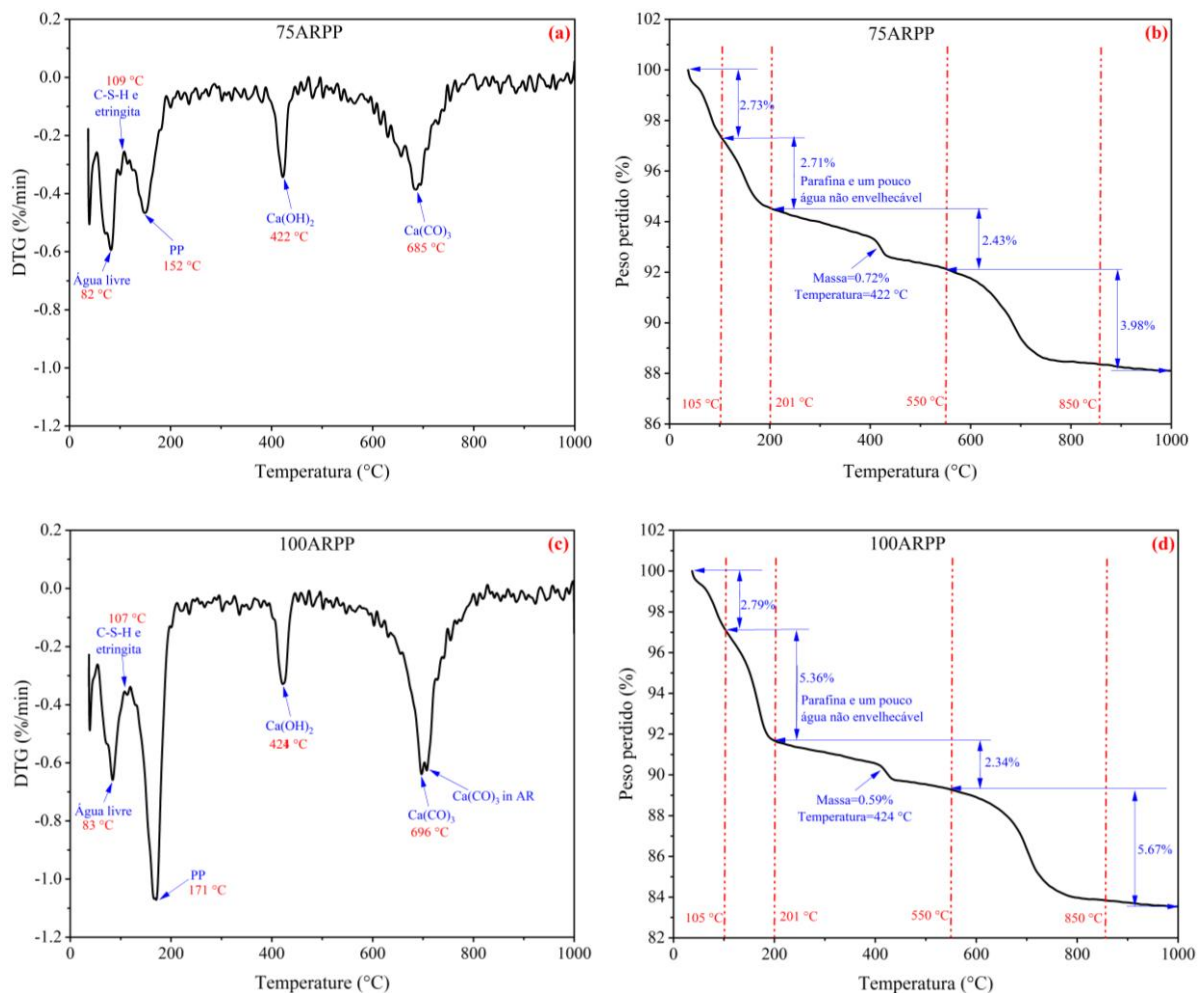


Figura 6.5 - Os resultados de TGA do betão com ARPP, DTG do 75ARPP (a), TGA do 75ARPP (b), DTG do 100ARPP (c) e TGA do 100ARPP (d).

Conforme mostrado nas Figura 6.5b e d, a análise das perdas de massa nos betões com 75% e 100%

de ARPP não indica diferenças significativas na perda de água livre, em concordância com a Figura 6.1, que mostra uma quantidade de água total similar. A diferença significativa na perda de massa de PP pode ser explicada pelo teor substancialmente maior de PP no betão 100ARPP em relação ao 75ARPP, conforme demonstrado na Figura 6.1, onde o teor de PP é 34% maior em 100ARPP. Além disso, a Figura 6.2 (f) ilustra microestrutura mais densa, devido ao maior teor de PP composição 100ARPP. Notavelmente, a perda de massa de Ca(OH)_2 no betão 75ARPP é 1.3% maior que no betão 100ARPP, o que sugere uma reação de hidratação mais extensa no betão contendo AR [275,278–280]. Por fim, as comparações de perda de massa de CaCO_3 continuam a indicar que betões com maior quantidade de AR apresentam maior conteúdo de CaCO_3 , reforçando o impacto do conteúdo de AR sobre o processo de carbonatação do betão.

6.2.4. Massa volúmica

A Figura 6.6 apresenta a massa volúmica dos betões desenvolvidos. Foi possível observar que o aumento do teor de AR no betão originou uma ligeira redução da sua massa volúmica. Especificamente, o betão com 25% de AR apresenta uma massa volúmica maior do que o betão de referência, possivelmente devido ao efeito de água nos poros de AR. O betão com 100% de AR exibe uma massa volúmica cerca de 10% inferior ao betão de referência. Este fenómeno é atribuído à massa volúmica inferior do AR em comparação com o agregado natural (brita), conforme discutido nas seções 5.2.3 e 5.2.4.

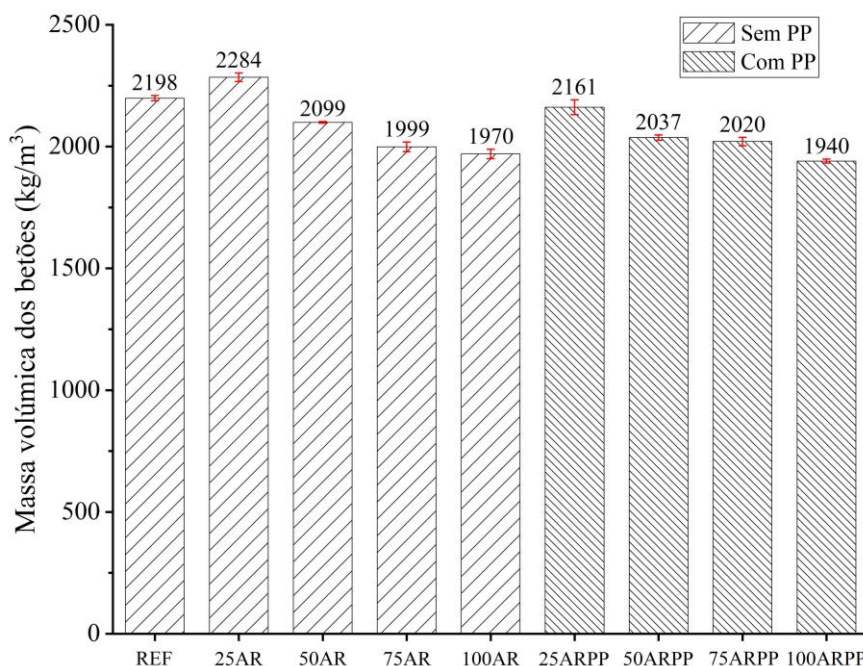


Figura 6.6 - Massa volúmica das diferentes composições de betão.

Além disso, o betão que incorpora AR funcionalizado também demonstra uma tendência de redução na massa volúmica, indicando que o AR preenchido com PP influencia a massa volúmica do betão. Comparando com o betão de referência, a massa volúmica reduziu em 1.7%, 7.3%, 8.1% e 11.7% para os betões 25ARPP, 50ARPP, 75ARPP e 100ARPP, respetivamente. Esse efeito é especialmente pronunciado no betão com 100% de AR funcionalizado com PCM, cuja massa volúmica atinge níveis comparáveis aos do betão leve (inferior a 2000 kg/m³), alinhando-se com a definição de betão leve na literatura [245]. Essa tendência de redução da massa volúmica também está em conformidade com investigações recentes sobre a funcionalização de AR, demonstrando que o AR preenchido com PP não apenas estabiliza a absorção de água, mas também reduz a massa volúmica através do preenchimento dos poros.

No geral, a massa volúmica do betão com AR funcionalizado é inferior à do betão com AR não funcionalizado, o que se deve principalmente à menor massa volúmica do PCM em comparação com a água. Comparando com o betão 25AR, 50AR, 75AR e 100AR, a massa volúmica reduziu-se em 5.4%, 3.0%, -1.1% e 1.5% para os betões 25ARPP, 50ARPP, 75ARPP e 100ARPP, respetivamente. Esta observação apoia conclusões recentes da literatura, enfatizando o potencial dos materiais de mudança de fase para reduzir a massa volúmica do betão, proporcionando propriedades de isolamento e validando a contribuição positiva do tratamento do agregado com PCM no desenvolvimento de materiais de construção sustentáveis.

6.2.5. Absorção de água por imersão

A Figura 6.7 apresenta os valores de absorção de água por imersão para todas as composições do betão desenvolvidas, revelando uma tendência significativa de aumento na absorção de água por imersão à medida que aumenta o teor de AR não funcionalizados. Especificamente, em comparação com o betão de referência, o betão que contém 25%, 50%, 75% e 100% de AR não funcionalizado apresentou aumentos cerca de 13%, 26%, 37% e 45% na absorção de água por imersão, respetivamente. Esta tendência destaca as características de elevada absorção de água inerentes ao AR [206] e indica ainda que a introdução de AR resulta em um aumento no número de poros abertos no betão [188]. Esse fenómeno também está relacionado com a microestrutura interna do AR e sua rugosidade superficial, que podem afetar estrutura porosa do betão, aumentando significativamente os canais de migração da água [281].

É importante notar que, em comparação com o betão com AR não funcionalizado, o betão que contém AR funcionalizado com PCM apresenta uma absorção de água por imersão inferior. No que diz respeito

ao betão que contém 25%, 50%, 75% e 100% de AR funcionalizado com PCM, a absorção de água por imersão foi reduzida em 8%, 6%, 14% e 14%, respetivamente, comparativamente ao betão com incorporação de AR não funcionalizado. Esta redução significativa na absorção de água pode ser atribuída ao preenchimento eficaz dos poros do ARPP durante o processo de funcionalização, resultando numa menor estrutura porosa do betão (Figura 6.2 (d) e (f)). Cunha et al. [93] apresentaram a mesma tendência. A ação de preenchimento dos poros com o agregado com PCM diminui o número e o tamanho dos canais de migração capilar da água, exercendo um efeito positivo na impermeabilidade do betão. Além disso, a parafina possui um efeito hidrofóbico [282].

No betão que incorpora AR funcionalizado, observa-se um ligeiro aumento na absorção de água por imersão à medida que a proporção de AR funcionalizado aumenta, sendo mais pronunciado para o betão com 100% de AR funcionalizado com PCM, cuja absorção de água por imersão é superior cerca de 19% comparativamente ao betão com 25% de AR funcionalizado. Este comportamento pode ser justificado pela maior dosagem de água na composição com 100% de AR funcionalizado (Figura 6.2).

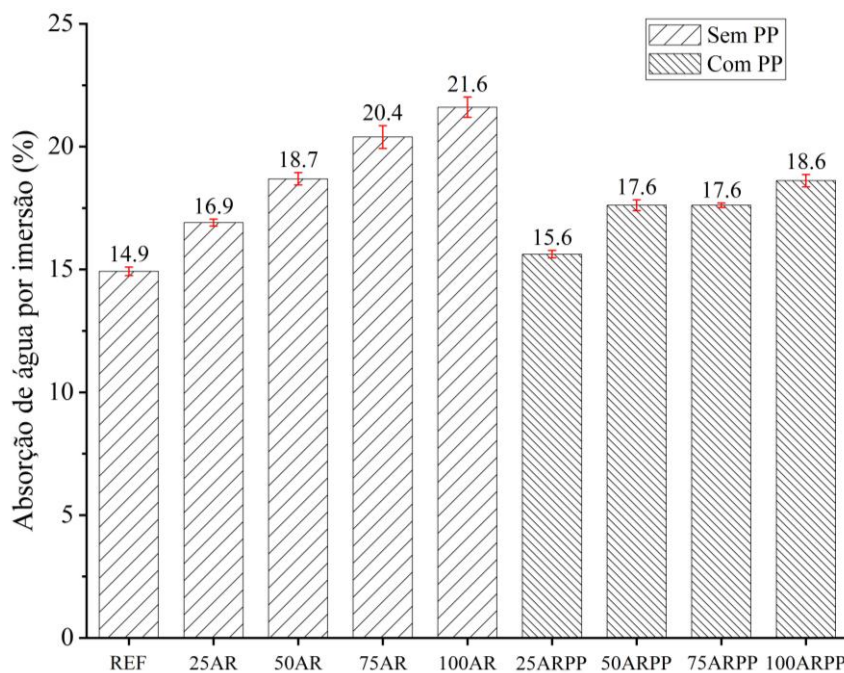


Figura 6.7 – Absorção de água por imersão das diferentes composições de betão.

6.2.6. Absorção de água por capilaridade

A Figura 6.8 ilustra o comportamento das diferentes composições de betão segundo a sua absorção de água por capilaridade durante o período de ensaio (0 minutos a 216 horas), revelando um rápido

aumento na absorção de água por capilaridade durante o período inicial de absorção (de 0 a 25 horas), seguido por uma estabilização da absorção de água, alcançando o seu equilíbrio no segundo período de absorção. Observou-se que a absorção de água por capilaridade do betão com AR não funcionalizado foi superior à do betão de referência, sendo que um aumento no teor de AR originou um aumento na absorção de água por capilaridade no betão. Este fenómeno pode ser atribuído à maior porosidade característica do AR, originando uma maior porosidade conectada no betão, tal como pode ser observado Figura 5.10 (a), (c) e (e).

Tal como indicado na Figura 6.1, a quantidade de água de amassadura no betão com AR foi superior à quantidade de água de amassadura do betão referência, o que possivelmente resultou na formação de mais microfissuras durante o processo de hidratação do cimento, exacerbando ainda mais a absorção de água por capilaridade do betão. A análise microscópica (Figura 6.2 (c) e (e)) revelou a presença de inúmeras microfissuras e poros na microestrutura do betão com AR. Este fenómeno impacta as propriedades mecânicas e a durabilidade do betão [155,188,194,283]. Essas observações sublinham o papel crítico do teor de AR na influência do comportamento de absorção de água por capilaridade e enfatizam a importância de considerar cuidadosamente as características do AR para mitigar possíveis problemas relacionados ao desempenho e durabilidade do betão em aplicações práticas.

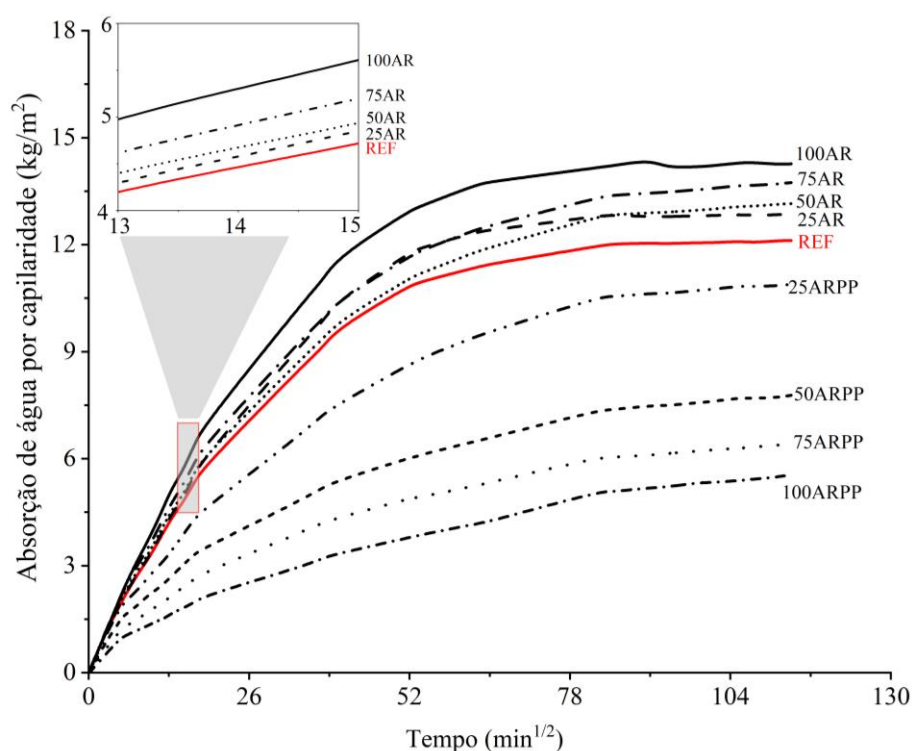


Figura 6.8 – Absorção de água por capilaridade das diferentes composições de betão.

Em comparação com o betão referência, a curva de absorção de água por capilaridade do betão incorporação de AR funcionalizado com PCM está consistentemente abaixo dela. Além disso, à medida que a proporção de AR funcionalizado aumenta, observa-se uma diminuição notável na absorção de água por capilaridade do betão. Esse fenómeno pode ser atribuído principalmente à modificação do AR por meio de melhorias de desempenho, que implicam no preenchimento de poros com PP (Figura 5.12). Essa modificação reduz efetivamente a presença de um número significativo de poros interconectados na matriz do betão. O processo de modificação de desempenho resulta na integração do PP nos poros do AR, alterando assim a estrutura dos poros e reduzindo a interconexão dos poros no betão, como mostrado na Figura 5.10 (c) e (d). Como mencionado anteriormente, parafina é o material com efeito hidrofóbico. Por outro lado, no betão contendo AR funcionalizado, à medida que a temperatura aumenta, o PCM que reveste a superfície do AR pode transitar para o estado líquido e flui para a zona de transição, bloqueando efetivamente a conectividade dos poros dentro da ZTI, como demonstrado na Figura 6.2 (e) e (f). Consequentemente, a absorção de água por capilaridade do betão com AR funcionalizado diminui, uma vez que existem menos caminhos para a entrada de água disponíveis no betão com AR funcionalizado [116]. Essas descobertas destacam a eficácia das técnicas de modificação de AR por PCM na melhoria da resistência à água do betão com AR, aumentando assim sua durabilidade e mitigando potenciais problemas relacionados à penetração de água e danos relacionados com a humidade. É importante também notar, que este trabalho ressalta a importância de considerar abordagens inovadoras para otimizar as propriedades dos materiais de construção sustentáveis, visando um desempenho aprimorado em diversas condições ambientais.

Na Tabela 6.2, é evidente que o coeficiente de absorção de água por capilaridade do betão sem incorporação de PP é significativamente maior do que o do betão com incorporação PP. Quando comparado ao betão com AR não funcionalizado, o coeficiente de absorção de água por capilaridade apresenta reduções cerca de 30%, 48%, 59% e 75% para betões com incorporação de 25%, 50%, 75% e 100% de AR funcionalizado com PCM, respetivamente. Além disso, no betão com AR não funcionalizado, um aumento no teor de AR corresponde a um aumento no coeficiente de absorção de água por capilaridade do betão. Por outro lado, no betão com AR funcionalizado, observa-se a tendência oposta. Essa discrepância pode ser atribuída à melhoria das propriedades físicas facilitada pela presença da PP e também já como referido anteriormente do efeito hidrofóbico do PCM e grande redução da capacidade de absorção de água do AR funcionalizado. Estes resultados destacam assim a eficácia da incorporação de AR funcionalizado com PCM na mitigação da absorção de água no betão (veja as Figura 6.7 e Figura 6.8).

Tabela 6.2 – Coeficiente de absorção de água por capilaridade dos betões (kg/(m²·min^{0.5})).

Composições	Coeficiente de absorção de água por capilaridade (kg/m ² ·min ^{0.5})
REF	0.29
25AR	0.30
50AR	0.31
75AR	0.32
100AR	0.36
25ARPP	0.21
50ARPP	0.16
75ARPP	0.13
100ARPP	0.09

6.3. Comportamento mecânico

6.3.1. Resistência à compressão

A Figura 6.9 mostra os resultados da resistência à compressão do betão após um período de cura de 28 dias em água. A incorporação de AR não funcionalizado resultou em uma diminuição da resistência à compressão, com reduções observadas de 18%, 27%, 28% e 34% para as misturas de betão contendo 25%, 50%, 75% e 100% de AR, respetivamente. Esse fenómeno pode ser atribuído a múltiplos fatores interconectados.

Primeiramente, para alcançar a trabalhabilidade desejada durante a mistura do betão, houve a necessidade de aumentar a dosagem de água em 9%, conforme ilustrado na Figura 6.1. Embora esse ajuste seja crucial para obter a trabalhabilidade necessária para o betão, a sua incorporação inadvertidamente levou à formação de um maior volume de vazios estrutura do betão, comprometendo assim a resistência global do betão (Figura 6.7Figura 6.8).

Em segundo lugar, as características inerentes do AR também impactam significativamente a resistência à compressão do betão. Os agregados reciclados geralmente possuem uma elevada porosidade (Figura 5.10) e apresentam uma composição complexa, com partículas exibindo propriedades mecânicas não uniformes, conforme ilustrado na Figura 5.5. Essa não uniformidade pode resultar em uma distribuição não uniforme de tensões durante a aplicação de carga, impactando ainda mais as propriedades mecânicas do betão e levando à diminuição da resistência à compressão, um fenómeno bem

documentado em trabalhos de investigação anteriores [155,194,283,284].

Em terceiro lugar, conforme observado na Figura 6.2 c, o betão contendo AR exibe fissuras significativas e um maior teor de poros na ZTI. Essas características microestruturais não apenas afetam a capacidade de aderência entre a matriz de cimento e os agregados, mas também limitam a capacidade de carga do betão, tornando-se um fator crucial para a degradação das propriedades mecânicas do betão com AR.

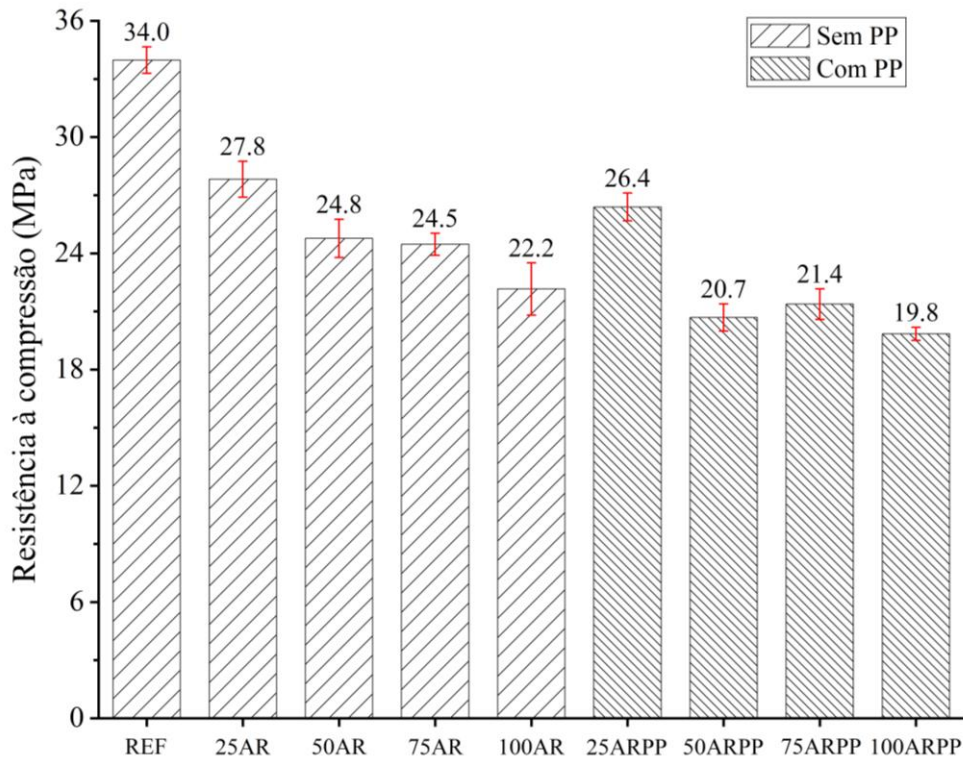


Figura 6.9 – Resistência à compressão das diferentes composições de betão.

Por outro lado, em comparação com o betão com AR não funcionalizado, a resistência à compressão do betão com AR funcionalizado com PCM não apresenta uma diminuição tão acentuada da sua resistência à compressão, o que indica que a qualidade do AR é um fator importante no desempenho do betão à compressão. Em termos específicos, foram observadas reduções de 5%, 16.5%, 12.7% e 11% para o betão com incorporação de 25% de agregado reciclado funcionalizado (25ARPP), 50% (50ARPP), 75% (75ARPP) e 100% (100ARPP), respetivamente. Este comportamento pode ser atribuído ao revestimento da superfície do AR com PCM, que reduz a capacidade de aderência entre a matriz cimentícia e os agregados (Figura 6.2 f). Além disso, o aumento adicional da quantidade de água de amassadura também pode contribuir para este fenómeno (Figura 6.1). Em suma, a incorporação de AR exerce um impacto complexo na resistência à compressão do betão, influenciado não apenas pelas características físicas e químicas do AR, mas também pela composição e microestrutura do betão.

6.3.2. Resistência à flexão

A resistência à flexão do betão foi sistematicamente avaliada, e os resultados estão apresentados na Figura 6.10. Foi possível observar que com o aumento da incorporação de AR, a resistência à flexão do betão sem incorporação de PCM e com incorporação de PCM apresentam uma diminuição significativa. Especificamente, as reduções na resistência à flexão foram cerca de 16%, 21%, 21% e 42% para os betões com incorporação de 75% de agregado reciclado (75AR), 100% de agregado reciclado (100AR), 75% de agregado reciclado funcionalizado com PCM (75 ARPP) e 100% de agregado reciclado funcionalizado com PCM (100ARPP), respetivamente. Esta tendência destaca o impacto negativo da qualidade do AR nas propriedades mecânicas do betão. Conforme discutido anteriormente, a composição química complexa, as propriedades mecânicas heterogêneas e a estrutura porosa do AR contribuem diretamente para a diminuição do desempenho mecânico do betão. As características intrínsecas do AR dificultam a capacidade da matriz de betão em distribuir cargas de forma eficaz e resistir a tensões de flexão, resultando em um desempenho à flexão enfraquecido. Cunha et al. [91] apresentou que a resistência à flexão do argamassa diminui 8% quando 20% PCM utilizou. Além disso, o betão com PP exibe uma redução adicional na resistência à flexão. Esta diminuição é atribuída ao enfraquecimento das forças de aderência entre o agregado e a pasta de cimento devido à presença do PCM, o que leva a uma diminuição das propriedades mecânicas do betão, comprometendo ainda mais a sua resistência à flexão.

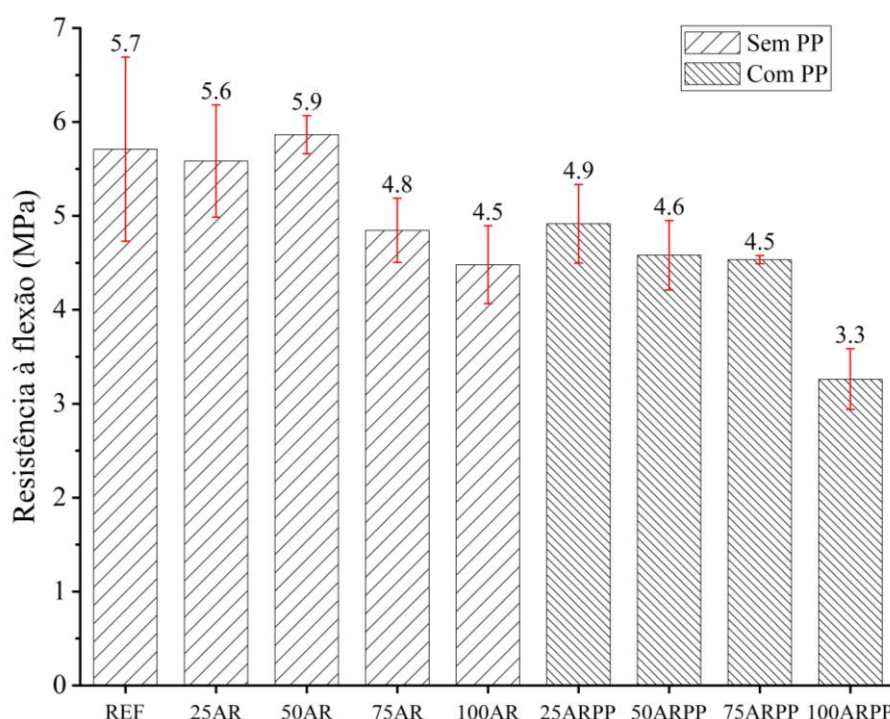


Figura 6.10 – Resistência à flexão das diferentes composições de betão.

6.4. Durabilidade

6.4.1. Migração de cloretos em regime não estacionário (CTH)

A Figura 6.11 apresenta os resultados do coeficiente de migração de cloretos em regime não estacionário (D_{NSSM}) para as diferentes composições de betão, revelando o impacto significativo do uso de AR e AR funcionalizado com PCM na resistência do betão à penetração de íons de cloreto. Primeiramente, no caso dos betões sem incorporação de PP, com o aumento do teor de AR, o D_{NSSM} mostra uma tendência clara de aumento, sendo que se verificou um aumento de cerca de 15.0%, 17.2%, 22.3% e 32.2% para o betão com incorporação de 25%, 50%, 75% e 100% de AR, respetivamente, comparativamente com o betão referência. Este comportamento indica que a introdução de AR reduz a resistência do betão à penetração de cloretos, possivelmente devido à presença de microfissuras e uma porosidade do AR, que ampliam os caminhos para a migração de íons de cloreto no interior da matriz do betão. Além disso, os resultados do coeficiente de absorção capilar indicam que a presença AR aumenta a porosidade do betão, proporcionando condições mais favoráveis para a penetração de íons de cloreto. Na análise da microestrutura, foi possível observar mais fissuras e porosidades no betão com AR, o que reforça a explicação sobre o efeito negativo do AR na resistência à penetração de cloretos.

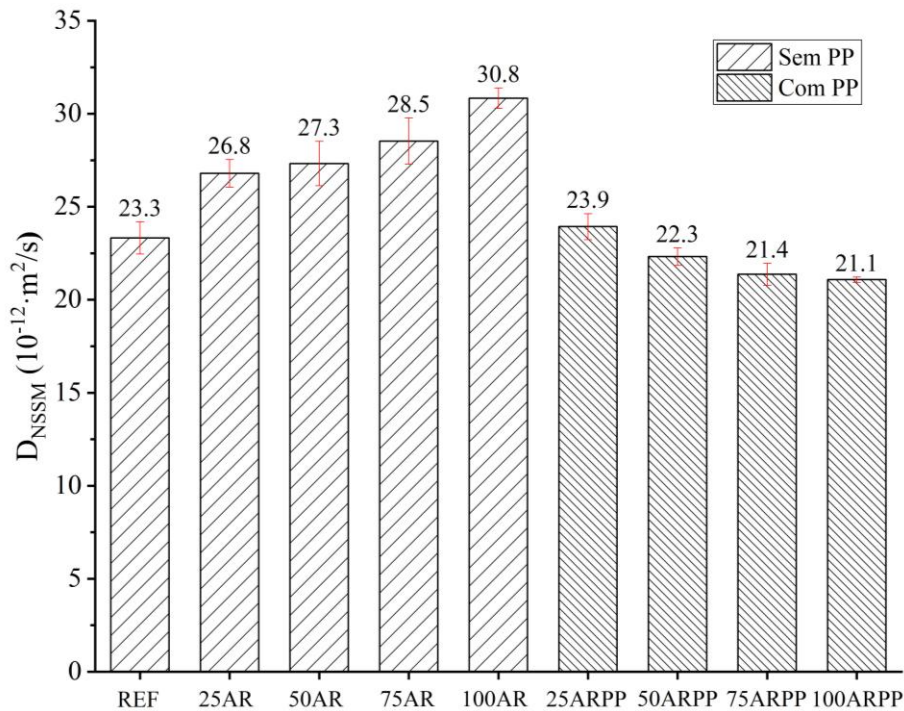


Figura 6.11 – Coeficiente de migração de cloretos do betão.

Em contraste, o betão com AR funcionalizado com PCM apresenta um aumento significativo na

resistência à penetração de cloretos com o incremento do teor de ARPP, assim à medida que o teor de ARPP aumenta, observa-se uma diminuição no $D_{N_{SSM}}$, indicando uma resistência melhorada do betão com incorporação de PCM contra a migração de cloretos. Quando o teor de ARPP atinge 25%, o $D_{N_{SSM}}$ do betão é idêntico ao do betão referência, diminuindo assim o efeito prejudicial da presença de agregado reciclado. Contudo, com o aumento do teor de ARPP para 50%, 75% e 100%, o $D_{N_{SSM}}$ diminui em 4.3%, 8.2% e 9.4%, respetivamente. Esse resultado destaca o efeito de preenchimento do PP nos poros do betão, sendo esse efeito mais acentuado com o aumento do teor de ARPP, o que reduz efetivamente as rotas de penetração de cloretos e aumenta a resistência à permeabilidade do betão.

Comparando os valores de $D_{N_{SSM}}$ para betões com proporções equivalentes de AR ou ARPP, observa-se que o betão com 25%, 50%, 75% e 100% de ARPP apresentam reduções no $D_{N_{SSM}}$ de 10.8%, 18.3%, 24.9% e 31.5%, respetivamente, em relação ao betão com AR não funcionalizado. Esse fenómeno sugere que a PP, além de preencher os poros dos próprios agregados AR, o PCM no superficial do AR flui para os microporos e porosidades da matriz do betão durante o processo de mudança de fase, formando uma barreira física eficaz que limita a migração de iões de cloreto e reduz sua penetração. Assim, o betão com ARPP demonstrou um desempenho superior no que diz respeito à sua resistência à penetração de cloretos, ressaltando o potencial da PP em aumentar a durabilidade do betão e seu valor como aditivo para aprimorar a resistência a agentes agressivos.

6.4.2. Gelo-degelo

A Figura 6.12 apresenta o desempenho das diferentes composições de betão, sendo que o betão referência diz respeito ao seu aspeto após 70 ciclos de gelo-degelo e o betão contendo AR ou ARPP após 100 ciclos de gelo-degelo. Isto está relacionado com a presença de fissuras na zona de transição do betão de referência (dentro dos produtos de hidratação) (Figura 6.2a). Foi possível observar claramente que o betão de referência apresentou fragmentação após 70 ciclos de gelo-degelo, resultado da migração de água nos poros do betão e da expansão do gelo causada pela diferença de temperatura [265]. O betão com AR apresenta uma resistência superior à deterioração sob condições de ciclos de gelo-degelo em comparação com o betão de referência, principalmente devido às suas características únicas de estrutura porosa e ao efeito amortecedor de absorção de água dos agregados reciclados. Os agregados reciclados possuem uma estrutura porosa que possibilita a absorção e libertação de água durante os ciclos de gelo-degelo, reduzindo assim a pressão de expansão causada pelo congelamento da água na superfície do betão, aliviando, efetivamente, a concentração de tensões na superfície [285]. A distribuição

uniforme dos poros dos agregados reciclados diminui ainda mais a possibilidade de acúmulo de água na superfície, reduzindo o risco de deterioração [286]. A zona de transição interfacial (ZTI) dos agregados reciclados também desempenha um papel importante como amortecedor de tensões durante os ciclos de gelo-degelo, dissipando a concentração de tensões e reduzindo a taxa de expansão dos danos estruturais [287,288]. De uma maneira geral, a incorporação de agregados reciclados diminui o módulo de elasticidade do betão, aumentando sua flexibilidade e permitindo uma melhor adaptação às variações de temperatura e humidade durante os ciclos de gelo-degelo [289]. Esses fatores, em conjunto, contribuem para que o betão com AR, após 100 ciclos de gelo-degelo, apresente apenas um ligeiro desgaste superficial, mantendo a integridade dos elementos de ensaio.

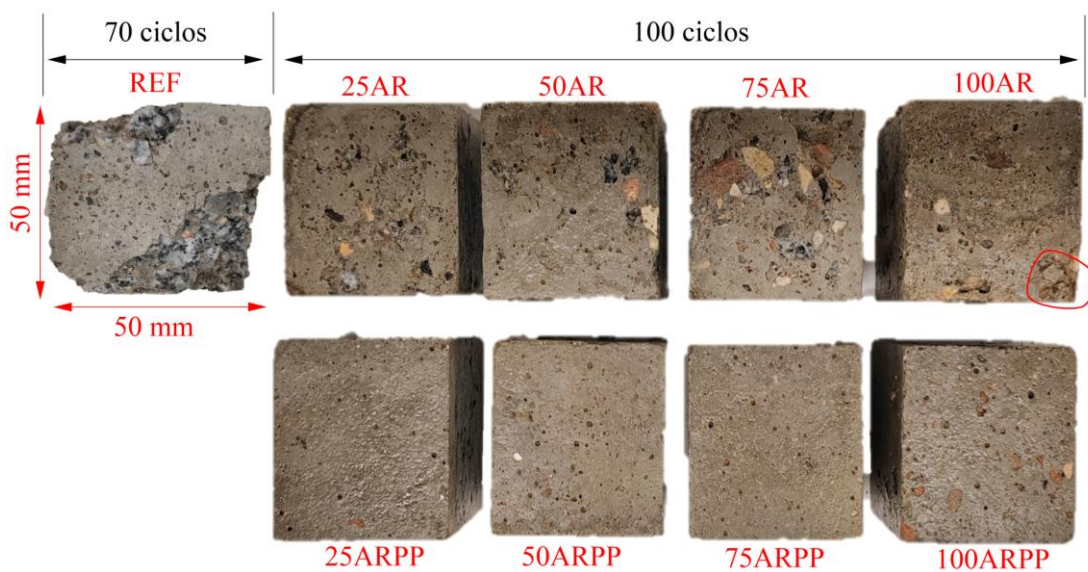


Figura 6.12 – Superfície dos provetes após os ensaios de gelo-degelo.

Nos betões com AR funcionalizado com PCM, após 100 ciclos de gelo-degelo, os elementos de ensaios mantiveram-se intactos, demonstrando claramente as vantagens significativas da incorporação de PCM na melhoria da resistência do betão aos ciclos de gelo-degelo. Este comportamento pode ser justificado pelo facto de a parafina não apenas preencher os poros do AR, mas também pelo fato da parafina existente na superfície dos agregados espalhar para os poros adjacentes durante o processo de mistura do betão e também durante o seu processo de mudança de fase, bloqueando efetivamente a estrutura porosa interna do betão, o que limita acumulação e a migração de água nos poros do AR, reduzindo assim a taxa de absorção capilar do betão e aumentando sua resistência ao dano causado pelo gelo-degelo. Por outro lado, os materiais de mudança de fase orgânicos, tais como as parafinas, tal como referido anteriormente possuem um efeito hidrofóbico, repelindo a água de estrutura interna do betão. Por último, o processo de mudança de fase do PCM permite que o material se adapte melhor às variações

de temperatura causadas pelos ciclos térmicos. Cunha et al. [290] investigaram o uso de parafina em argamassas e seus resultados demonstraram uma melhoria na resistência ao gelo-degelo devido ao mecanismo de bloqueio físico da parafina. Os resultados confirmam ainda que a incorporação de parafina no betão contribui para aumentar a sua resistência ao gelo-degelo. Em resumo, os agregados reciclados funcionalizados com parafina melhoram significativamente o desempenho do betão em termos de resistência ao gelo-degelo por meio de mecanismos físicos de bloqueio e ajustes na mudança de fase, indicando seu grande potencial de aplicação no aprimoramento da durabilidade do betão.

Após testar a resistência à compressão de betão com AR após 0 e 100 ciclos de gelo-degelo, obteve-se os dados de desempenho à compressão de todos os provetes antes e depois dos ciclos de gelo-degelo, conforme mostrado na Figura 6.13. Observa-se claramente que, com exceção da amostra 100% ARPP, todos os outros espécimes apresentaram um aumento na resistência à compressão após 100 ciclos de gelo-degelo, com aumentos específicos de 17.3%, 20.6%, 10.6%, 27.5%, 10.6%, 28.5% e 16.8%, respetivamente, para os betões 25AR, 50AR, 75AR, 100AR, 25ARPP, 50ARPP e 75ARPP. Esse fenómeno pode ser atribuído à possível presença de partículas de cimento não totalmente hidratadas nos AR, que, em condições específicas de humidade e temperatura, podem passar por uma reação de hidratação secundária. Essa reação preenche microfissuras, produzindo o chamado “efeito de autocura”, o que retarda a propagação de fissuras. Esse efeito, até certo ponto, aprimora a resistência do betão com AR aos ciclos de gelo-degelo e, consequentemente, melhora sua resistência à compressão [291,292].

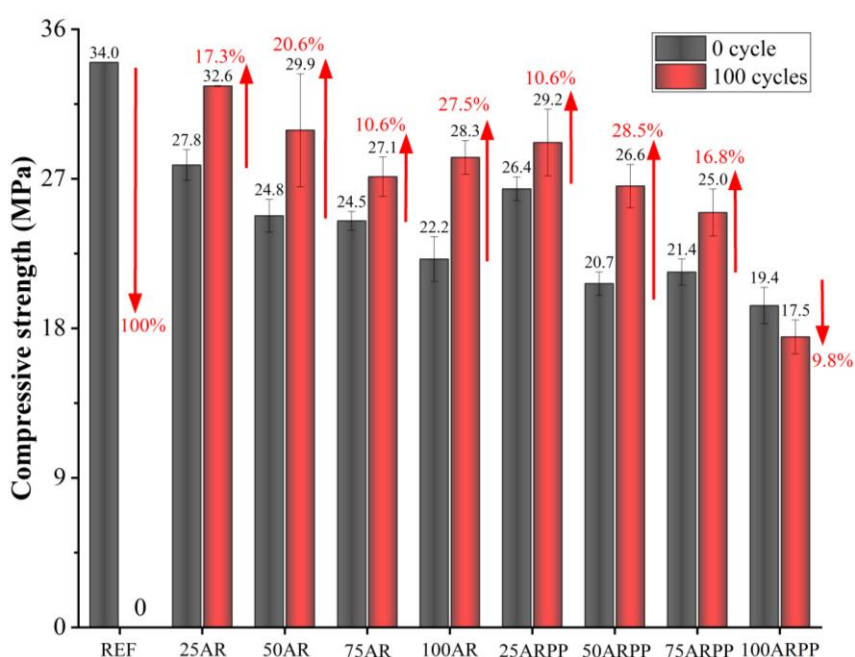


Figura 6.13 – Resistência à compressão do betão no início e após 100 ciclos de gelo-degelo.

Dessa forma, é evidente que o betão com AR puro, sob condições de ciclos de gelo-degelo, é capaz de gerar um efeito de amortecimento de tensões internas e, em nível microscópico, aumenta a densidade estrutural, o que, por sua vez, melhora a durabilidade e a estabilidade estrutural do betão como um todo. Já o betão com AR funcionalizado com PCM apresenta uma resistência superior a danos durante o ciclo de gelo-degelo devido ao efeito de preenchimento do PP, que evita a degradação estrutural. No entanto, no betão com 100% de ARPP, a quantidade excessiva de PP impede, até certo ponto, a hidratação das partículas de cimento, o que resulta numa perda mais significativa das propriedades mecânicas.

6.4.3. Sulfato de magnésio

A Figura 6.14 apresenta os resultados das variações de massa das amostras de betão submetidas a diferentes ciclos de imersão em solução de sulfato de magnésio. Observa-se claramente que, durante os primeiros 10 ciclos, a massa das amostras aumentou, exceto para o betão com 100% de ARPP. Esse comportamento pode ser atribuído à migração inicial de iões magnésio (Mg^{2+}) e sulfato (SO_4^{2-}) para o interior do betão, levando à formação de produtos de deterioração, como gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) e etringite ($C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 32H_2O$), que preenchem os poros e provocam um leve aumento na massa das amostras [293,294].

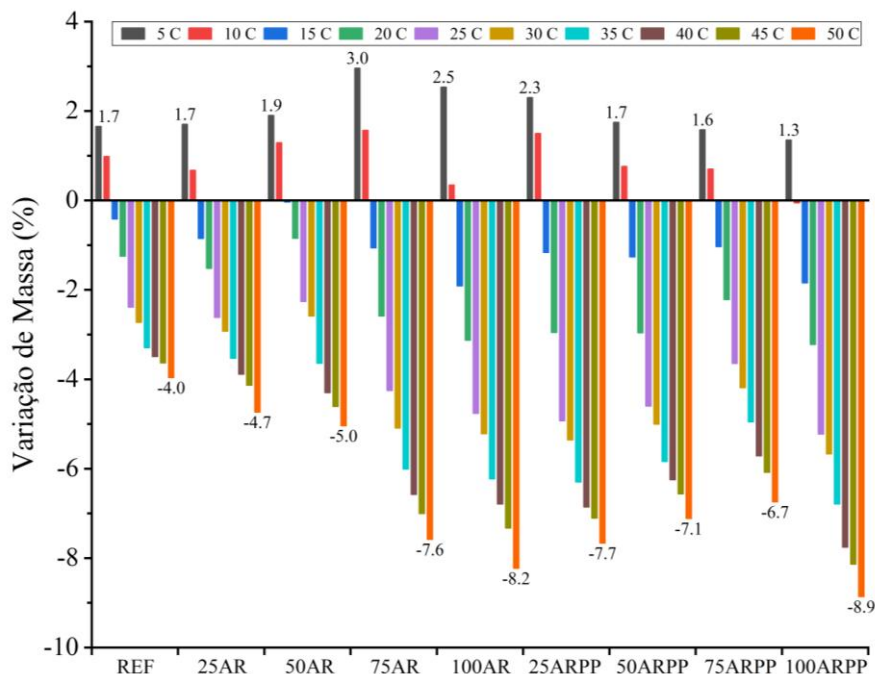


Figura 6.14 – Variação de massa do betão após ataque por sulfato de magnésio.

Nos betões com AR sem qualquer tipo tratamento, observa-se que o aumento da massa é mais pronunciado com o aumento do teor de AR. Este comportamento encontra-se associado à elevada

porosidade do AR, que facilita a penetração de iões sulfato e magnésio no interior do betão, resultando na formação de maiores quantidades de produtos de deterioração. Por outro lado, nos betões com incorporação de agregado funcionalizado com PCM (ARPP), a variação de massa é menos acentuada à medida que o teor de ARPP aumenta. Esse comportamento é explicado pelo efeito de preenchimento proporcionado pela PP, que preenche os poros e sela a superfície do AR, reduzindo significativamente a penetração de água e iões agressivos.

A partir do 15º ciclo, observa-se uma redução na massa das amostras, indicando o início de reações de deterioração entre os iões sulfato e magnésio com os componentes do cimento, como o gel C-S-H e o Ca(OH)_2 . Essas reações resultam na formação de produtos prejudiciais, como o gesso e o silicato de magnésio não cimentante (M-S-H), que desestabilizam a estrutura do betão e causam perda de massa. Nos betões com AR, a deterioração é mais severa com o aumento do teor de AR. Por exemplo, os betões com 75% e 100% de AR apresentam perdas de massa superiores a 2% já no 20º ciclo, enquanto os com 25% e 50% de AR alcançam esse patamar no 25º ciclo. Isso ocorre porque maiores teores de AR proporcionam mais porosidade, permitindo maior acúmulo de iões agressivos e acelerando o processo de degradação. Por outro lado, os betões com ARPP demonstram melhor desempenho na resistência à solução de sulfato de magnésio. Os betões com 25% e 50% de ARPP apresentam perdas de massa superiores a 2% no 20º ciclo, enquanto os com 75% de ARPP atingem essa marca apenas no 25º ciclo. Isso evidencia que a presença de PP melhora a resistência ao ataque químico, bloqueando a entrada de iões agressivos. Contudo, os betões com 100% de ARPP mostram uma rápida redução de massa já a partir do 10º ciclo, possivelmente devido à menor resistência mecânica e à possível migração ou perda de PP durante o aquecimento.

No 50º ciclo, os resultados confirmam tendências claras. Nos betões com AR, a perda de massa aumenta com o aumento do teor de AR, enquanto nos betões com ARPP, a perda de massa diminui com o aumento do teor de ARPP (exceto para 100% de ARPP).

6.4.4. Carbonatação

A Figura 6.15 apresenta a profundidade carbonatação de diferentes composições de betão após 180 dias. Primeiramente, nos betões com AR, a profundidade de carbonatação aumentou com o incremento da incorporação de AR. Este comportamento pode ser atribuído à elevada porosidade característica do AR. Consequentemente, o betão com AR demonstrou um desempenho inferior em termos de resistência à carbonatação em condições de longo prazo.

Por outro lado, o desempenho dos betões com ARPP foi significativamente superior ao dos betões com AR. Em particular, as amostras com 75ARPP e 100ARPP mantiveram uma profundidade de carbonatação igual a 0 após 180 dias de ensaio. Este comportamento pode ser principalmente atribuído ao efeito de barreira física do AR impregnado com PP, que preenchem de forma eficaz os poros nos AR e reduzem significativamente a porosidade total do betão. A diminuição da porosidade não apenas limita a penetração de CO_2 , mas também bloqueia a migração de humidade necessária para a reação de carbonatação, retardando assim o progresso do processo de carbonatação [61]. Além disso, a parafina é um material com efeito hidrofóbico.

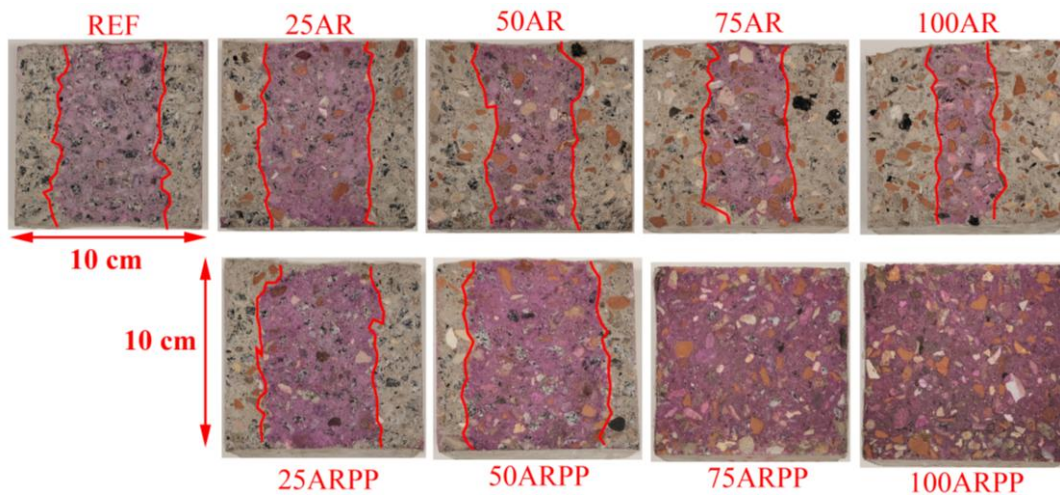


Figura 6.15 – Profundidade de carbonatação com 180 dias dos betões.

A Figura 6.16 apresenta a evolução da profundidade de carbonatação dos diferentes betões ao longo do tempo. De forma geral, a profundidade de carbonatação aumentou com o prolongamento do período de exposição. Isso ocorre porque, em condições de exposição prolongada ao dióxido de carbono, o hidróxido de cálcio presente no betão reage continuamente com o CO_2 , formando carbonato de cálcio e outros produtos de carbonatação [61]. Além disso, partículas de cimento parcialmente hidratadas presentes nos AR podem, no início do processo de carbonatação, reduzir parcialmente a reação, como observado na comparação entre os períodos de 30 e 180 dias, onde os betões REF, 25AR, 50AR, 75AR, 100AR, 25ARPP e 50ARPP apresentaram aumentos na profundidade de carbonatação de 2.7 vezes, 2.0 vezes, 2.3 vezes, 2.5 vezes, 2.7 vezes, 1.8 vezes e 2.6 vezes, respetivamente. Contudo, esse efeito "autocurativo" é limitado a curtos períodos de exposição e não se mantém em condições de carbonatação prolongada, resultando em uma menor resistência à carbonatação para betão com AR em longo prazo.

No betão com AR, a profundidade de carbonatação aumentou significativamente com o aumento do teor de AR para um mesmo período de exposição. Por exemplo, aos 30 dias de exposição, em comparação

com o betão referência, os betões 25AR, 50AR, 75AR e 100AR apresentaram aumentos significativos na profundidade de carbonatação cerca de 26.6%, 35.9%, 42.2% e 59.4%, respetivamente. Este comportamento pode ser atribuído à elevada porosidade e às fissuras presentes no AR, que fornecem mais caminhos para a penetração de dióxido de carbono e humidade, acelerando o processo de carbonatação.

Por outro lado, o betão com incorporação de ARPP demonstraram um desempenho significativamente superior àqueles contendo AR, revelando que a profundidade de carbonatação diminuindo à medida que o teor de ARPP aumentava. Particularmente, aos 90 dias de exposição, a profundidade de carbonatação de todos os betões com ARPP foi inferior à do betão referência e aos betões com incorporação de AR. Estes resultados indicam que, durante períodos de exposição prolongada a dióxido de carbono, o PCM presente no ARPP, funciona como uma barreira, por outro lado ao sofrer mudanças de fase, possui também a capacidade de preencher os poros do betão, retardando significativamente o avanço do processo de carbonatação.

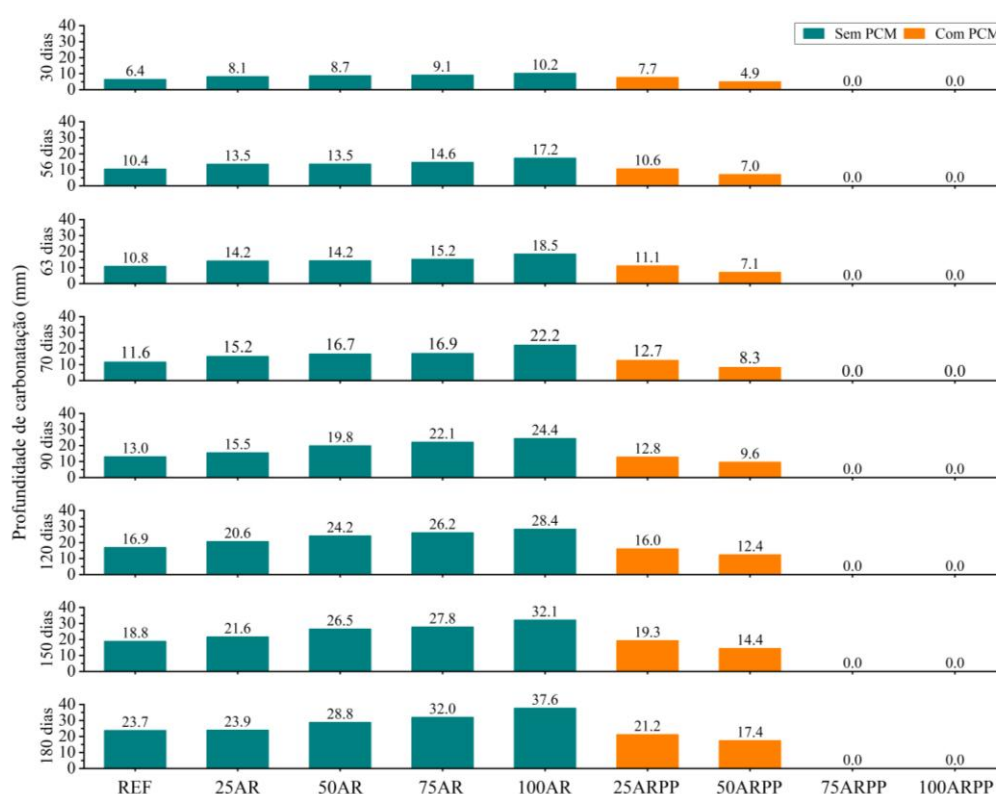


Figura 6.16 – A profundidade de carbonatação do betão em diferentes períodos.

Nos resultados de profundidade de carbonatação aos 180 dias, observou-se que, nos betões contendo AR, a profundidade de carbonatação continuou a aumentar com o teor de AR. Em contraste, nos betões com ARPP, a profundidade de carbonatação diminuiu com o aumento do teor de ARPP. Especificamente,

os betões 25ARPP e 50ARPP apresentaram profundidades de carbonatação 12.7% e 65.5% menores, respetivamente, em comparação com os betões 25AR e 50AR. Notavelmente, os betões 75ARPP e 100ARPP mantiveram profundidade de carbonatação igual a 0 mesmo após 180 dias de exposição, indicando que elevados teores de ARPP podem maximizar seu potencial de resistência à carbonatação. Além disso, conforme ilustrado na Figura 6.2f, a cobertura de PP sobre a superfície do ARPP promove uma maior densificação da zona de transição interfacial com a matriz cimentícia, reduzindo microfissuras e áreas de baixa coesão. Essa modificação estrutural na interface diminui a permeabilidade e melhora significativamente o desempenho global do betão frente à carbonatação.

Em resumo, os betões contendo AR, devido à sua alta porosidade e zonas de transição interfacial frágeis, apresentaram baixa durabilidade em condições de carbonatação prolongada, com profundidades de carbonatação significativamente elevadas. Já o betão com ARPP demonstra notável resistência à carbonatação, graças ao efeito de bloqueio proporcionado pelo PP, ao efeito de preenchimento resultante do processo de mudança de fase e à modificação estrutural da interface. Particularmente, os betões 75ARPP e 100ARPP mantiveram profundidade de carbonatação nula aos 180 dias, evidenciando grande potencial para aplicações práticas. No entanto, para uso em larga escala, é necessário otimizar o teor de ARPP para equilibrar o desempenho relativo à carbonatação com propriedades essenciais.

6.5. Desempenho a elevadas temperaturas

A avaliação do comportamento do betão em condições de alta temperatura foi realizada através da medição da resistência à compressão após submissão a diferentes gamas de temperatura, incluindo 20 °C (condição normal), 200 °C, 400 °C e 600 °C. A seleção destas temperaturas foi baseada na necessidade de simular o desempenho das estruturas de betão quando submetidas a incêndios acidentais. Todas as amostras foram submetidas a um período de cura em água de 28 dias e, em seguida, a uma exposição de 4 horas na faixa de temperatura designada (200 °C, 400 °C e 600 °C), com recurso a um forno. A Figura 6.17 apresenta a resistência à compressão do betão após a sua exposição a elevadas temperaturas.

Na Figura 6.17 (a), observa-se a resistência à compressão do betão sem PP em diferentes temperaturas. A resistência à compressão do betão diminuiu com o aumento do teor de AR em condições normais (20°C), tal como já foi enunciado anteriormente no subcapítulo 6.3.1. A resistência à compressão dos betões contendo AR aumentou em 5.7%, 18.3%, 9.9% e 9.2% quando exposto a uma temperatura de 200 °C para os betões 25AR, 50AR, 75AR e 100AR, respetivamente, o que pode ser explicado pelo

aumento da hidratação da pasta cimentícia durante a evaporação da água livre. Esse processo leva à aproximação das camadas de gel de cimento, gerando forças de Van der Waals mais intensas [93,295–298]. Quando expostos a uma temperatura de 400 °C, as resistências à compressão do betão REF, 25AR, 50AR, 75AR e 100AR diminuíram em 20.7%, 17.2%, 11.4%, 28.1% e 13.6%, respetivamente, em comparação com as condições normais. Essa redução pode ser atribuída à evaporação da água cristalina das fases C-S-H e etringite, resultando na decomposição das porções internas dos materiais cimentícios. A 600 °C, a resistência à compressão do betão diminuiu significativamente. Aydin et al. [297] relataram que em torno de 420 °C, o Ca(OH)_2 interno se decompõe e a 550 °C a água cristalina evapora completamente [273]. Portanto, a 600 °C, a maioria dos produtos de hidratação do cimento se decompõe, levando a uma redução crítica na resistência do betão.

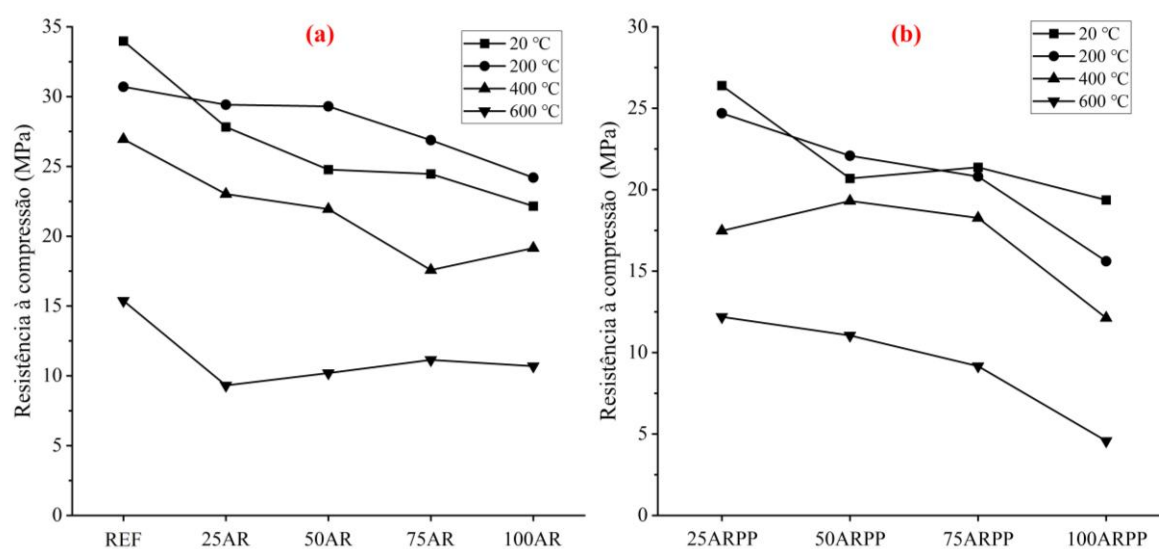


Figura 6.17 – Resistência à compressão do betão com AR (a) e betão com ARPP (b) em temperatura de 20°C, 200°C, 400°C, 600°C.

A Figura 6.17b mostra a resistência à compressão do betão contendo agregado reciclado funcionalizado em diferentes altas temperaturas. Observa-se que a resistência à compressão do betão diminui com o aumento do teor de ARPP. De acordo com a Figura 6.5 b) e d), quando 100% de ARPP foi utilizado, o betão apresentou menores quantidades de Ca(OH)_2 . Scrivener et al. [279] relataram que o baixo teor de Ca(OH)_2 indica hidratação insuficiente do cimento. Isso pode ser explicado pela presença do PP, que impede o contacto adequado entre as partículas de cimento e as moléculas de água, levando a uma hidratação insuficiente. Quando submetido a uma temperatura de 200 °C, a resistência à compressão do betão contendo ARPP diminuiu 6.4%, 2.7% e 19.4% para os betões 25ARPP, 75ARPP e 100ARPP. A redução da resistência à compressão observada para o betão contendo ARPP a 200 °C pode ser

explicada pela evaporação do PP a um ponto de inflamação de 150 °C, resultando no aumento de poros internos na estrutura do betão. No entanto, a resistência à compressão do betão 50ARPP aumentou 6.7% a 200 °C. Isso indica que o efeito da evaporação do PP sobre as propriedades mecânicas do betão 50ARPP é menor do que o da força de Van der Waals.

Além disso, observou-se que a 400 °C, a resistência à compressão do betão contendo ARPP diminuiu significativamente. A evaporação da água cristalina dos produtos de hidratação do cimento e a decomposição de parte do C-S-H contribuíram para uma redução na resistência à compressão de 33.8%, 6.7%, 14.5% e 37.4% para as misturas de betão com 25ARPP, 50ARPP, 75ARPP e 100ARPP, respetivamente. Quando exposto a 600 °C, a resistência à compressão do betão diminuiu ainda mais, o que pode ser atribuído à evaporação completa da água cristalina a 550 °C e à decomposição do Ca(OH)_2 em torno de 400 °C. Isso ressalta a importância de considerar o impacto das altas temperaturas nas propriedades mecânicas do betão contendo ARPP.

Ao comparar os betões contendo AR a 600 °C, observa-se que o betão com ARPP apresenta uma redução de resistência mais acentuada com o aumento do teor de ARPP. Esse efeito deve-se à maior quantidade de PCM incorporado, que, ao sofrer evaporação em altas temperaturas, gera um aumento significativo da porosidade interna. Essa elevação da porosidade compromete a integridade da matriz cimentícia, resultando em uma degradação mais pronunciada das propriedades mecânicas do betão.

6.6. Comportamento térmico

O desempenho térmico do betão com incorporação de PCM foi avaliado com base nas condições climáticas típicas da região norte de Portugal, especificamente na cidade de Guimarães. O estudo selecionou amostras representativas das composições de betão: REF, 75AR, 100AR, 75ARPP e 100ARPP, submetendo-as a testes com base nas leis de temperatura típicas para as diferentes estações do ano (verão, inverno, primavera e outono). A análise concentrou-se no processo de mudança de fase do PCM desencadeado pelas flutuações de temperatura externa, explorando os seus mecanismos de acumulação e libertação de calor para avaliar a contribuição do PCM no desempenho térmico do betão. Os resultados demonstraram que, com o aumento do teor de PCM, o desempenho térmico do betão melhora significativamente. Em particular, sob condições de temperatura extrema, o PCM, através de seu efeito de mudança de fase, mostrou-se eficaz na regulação das flutuações de temperatura, destacando seu grande potencial para aplicações de melhoria da eficiência energética de edifícios. A seguir, analisa-se detalhadamente o desempenho térmico apresentado para cada composição nas diferentes estações.

6.6.1. Estação de Primavera

A simulação da primavera foi realizada com base na variação de temperatura de um dia típico, com uma temperatura mínima de 12 °C e máxima de 29 °C. Considerando o impacto do teor de PCM no desempenho térmico do betão, a Figura 6.18 apresenta o comportamento térmico ao longo de quatro ciclos para os betões REF, 75AR, 75ARPP, 100AR e 100ARPP. Na Figura 6.18 (a), observa-se que o betão com incorporação de 75% de ARPP apresentou um comportamento térmico semelhante ao betão 75AR ao longo de todo o ensaio. Em comparação com o betão de referência, a temperatura máxima foi ligeiramente superior, mas a temperatura mínima do betão 75ARPP foi mais alta do que a do betão de referência e do betão 75AR. Essa diferença sugere que, no betão contendo 75% de ARPP, o efeito de mudança de fase do PCM desempenhou um papel crucial na regulação da temperatura em condições de baixas temperaturas. No entanto, com base na Figura 6.18 (b), verifica-se que o betão 100ARPP demonstrou uma capacidade mais significativa de regulação térmica ao longo de todo o ensaio. Em comparação com o betão de referência e o betão 100AR, apresentou diferenças consideráveis nas temperaturas máximas e mínimas. Essa variação indica que um teor mais elevado de PCM intensifica o efeito de mudança de fase, tornando-o mais eficaz na regulação da temperatura do betão [299].

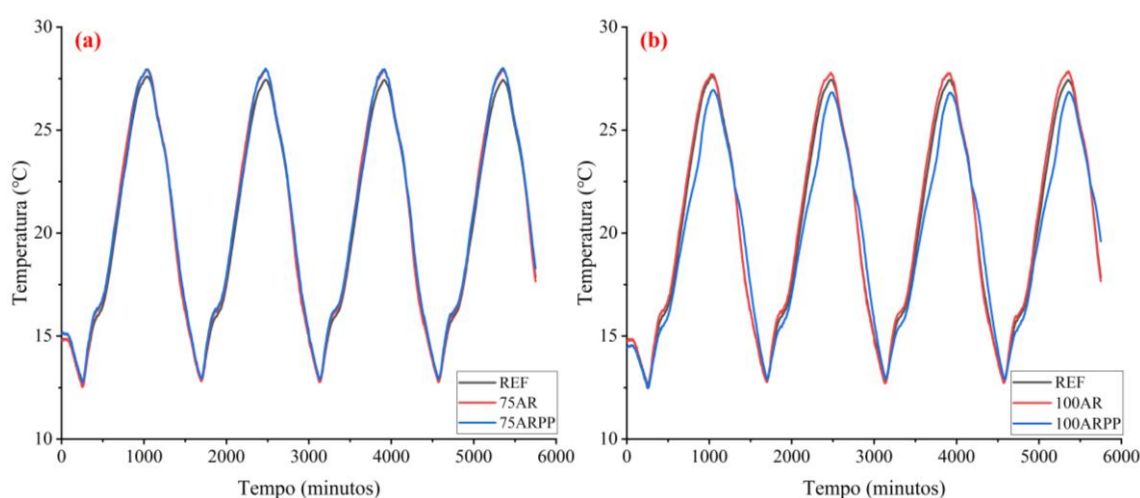


Figura 6.18 – Comportamento térmico de primavera dos betões: a) REF, 75AR e 75ARPP; b) REF, 100AR e 100ARPP.

Quando a temperatura está no intervalo de 20 °C a 25 °C, observa-se uma separação nas curvas de temperatura dos betões com incorporação de PCM em relação à do betão de referência e do betão contendo AR puro, especialmente no caso do betão com incorporação de 100% ARPP. Isso demonstra que, nesse intervalo de temperatura, o PCM absorve o calor do meio ambiente através da transição de fase sólido-líquido, inibindo o aumento rápido da temperatura na superfície do betão.

Na fase de arrefecimento (ou seja, quando a temperatura é superior a 25 °C), os betões contendo PCM apresentaram uma taxa de aquecimento mais lenta e temperaturas máximas mais baixas. Esse comportamento é atribuído à absorção significativa de calor latente durante a temperatura de transição do PCM, reduzindo a eficiência da transferência de calor para o interior do betão [114].

Durante a fase de aquecimento (quando a temperatura é inferior a 20 °C), a temperatura mínima dos betões com incorporação de PCM foi superior à dos betões de referência e betão com AR puro. Esse fenómeno é explicado pela libertação de calor latente do PCM após a transição de fase sólido-líquido, fornecendo uma fonte adicional de calor ao betão durante o processo de arrefecimento e retardando a diminuição da temperatura. Este efeito de libertação de calor comprova que o PCM não só pode amortecer a entrada de calor em ambientes de alta temperatura, como também fornece uma compensação térmica em condições de baixa temperatura, melhorando significativamente a estabilidade térmica [300].

A Figura 6.19 (a) apresenta a temperatura máxima do betão durante o processo de aquecimento, onde os betões REF, 75AR, 100AR e 75ARPP não exibem diferenças significativas. No entanto, o betão com incorporação de 100% ARPP (100ARPP) apresentou uma redução de aproximadamente 2.1% na temperatura máxima em relação ao betão de referência. Esse resultado indica que o betão 100ARPP demonstra um efeito mais pronunciado na regulação térmica, devido à maior quantidade de PCM incorporado, que contribui para a atenuação dos picos de temperatura [301].

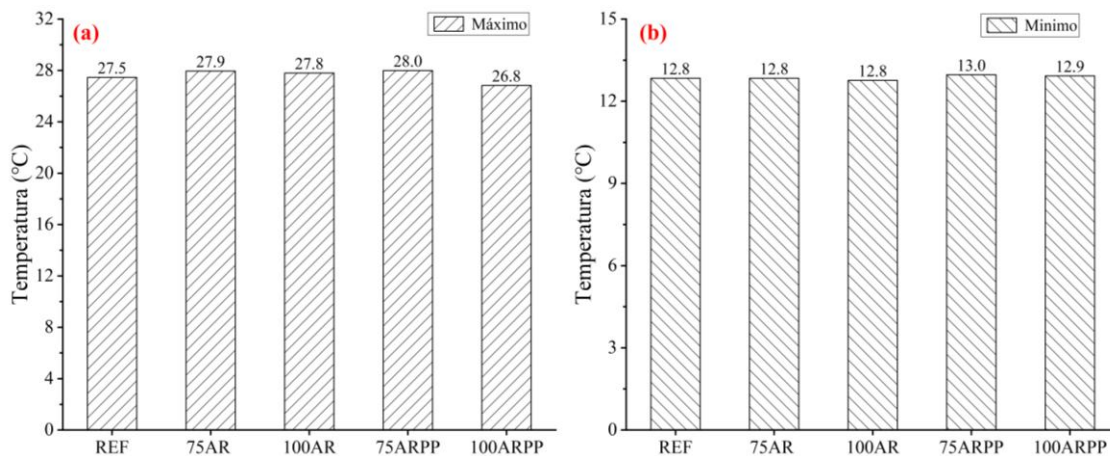


Figura 6.19 – Temperatura simulação de primavera a) temperatura máxima; b) temperatura mínima.

A Figura 6.19 (b) mostra que, durante o processo de arrefecimento, tanto o betão 75ARPP quanto o betão 100ARPP apresentaram um aumento na temperatura mínima. Isso ocorre porque o PCM libera calor latente durante o arrefecimento, retardando o aumento da temperatura e mantendo as flutuações

térmicas num intervalo mais estreito, melhorando a estabilidade térmica do betão.

Em resumo, os betões 75ARPP e 100ARPP amostraram a melhor regulação térmica tanto na fase de aquecimento quanto na de arrefecimento, reduzindo assim as flutuações de temperatura internas. Isso demonstra que, ao selecionar adequadamente a quantidade de PCM, é possível otimizar o desempenho térmico do betão sob diferentes condições climáticas, melhorando a eficiência energética e o conforto térmico do edifício.

A Figura 6.20 apresenta o gradiente térmico, definido como a diferença entre a temperatura no interior de uma caixa de betão referência e a temperatura no interior de uma caixa de betão contendo AR ou ARPP, conforme descrito pela expressão matemática fornecida na equação 6.1. Durante os ensaios, as variações do gradiente térmico foram influenciadas pelos processos de acumulação e liberação de calor, refletindo o desempenho térmico do betão em termos de armazenamento e dissipação de energia.

$$\Delta T = T_{\text{betão com AR ou ARPP}} - T_{\text{betão referência}} \quad 6.1$$

No betão com 100% de ARPP, a variação do gradiente térmico depende fortemente das propriedades do PCM, neste caso, a parafina. Durante a transição de temperatura da parafina, do estado sólido para o líquido, ocorre absorção de calor, o que reduz os picos de temperatura e aumenta a inércia térmica do betão. Da mesma forma, na fase de arrefecimento, a solidificação da parafina liberta calor, ajudando a manter a temperatura interna mais elevada e reduzindo as oscilações térmicas.

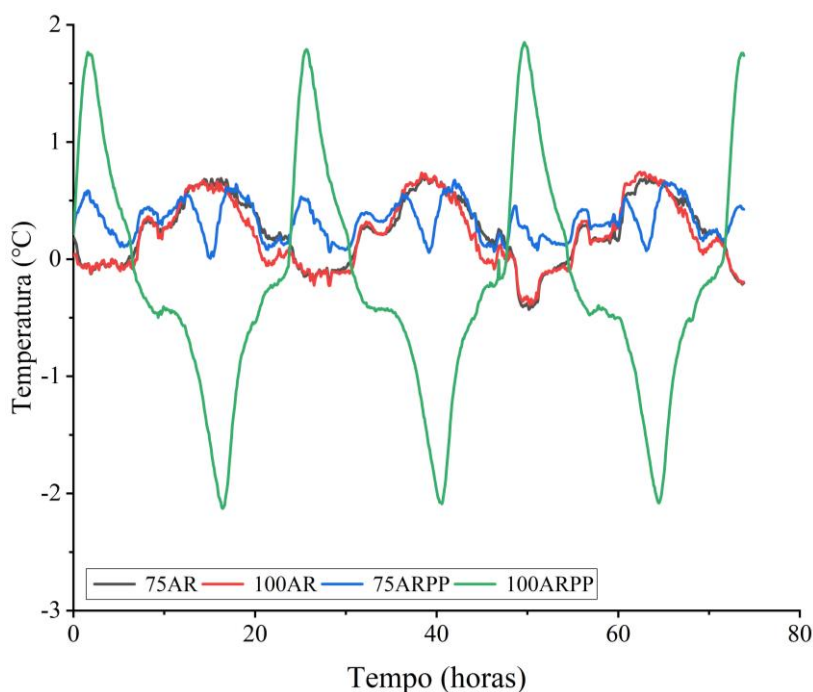


Figura 6.20 – Gradiente térmico simulação de primavera.

Quanto maior for a diferença de temperatura entre o betão referência e o betão com AR ou ARPP, maior será a capacidade de regulação térmica dos últimos. Esses resultados indicam que a introdução de PCM no betão com 100% ARPP melhora significativamente a capacidade do material em absorver e dissipar energia térmica. Estudos teóricos sobre condução de calor e efeitos de calor latente, combinados com os resultados experimentais, mostram que o betão com PCM pode reduzir o estresse térmico, diminuir o consumo de energia em edifícios e manter as temperaturas internas mais próximas do nível de conforto [302]. Nesse contexto, o betão com ARPP apresenta duas vantagens principais: a utilização de agregados reciclados, promovendo a sustentabilidade ambiental e economia circular; e a melhoria do desempenho térmico devido à presença de PCM. Essa combinação de benefícios ambientais e funcionais destaca o papel dos materiais funcionalizados para atender às necessidades da construção civil moderna.

Verificar os efeitos térmicos do uso de AR ou ARPP em substituição ao agregado natural em betão é essencial para avaliar precisamente o impacto no desempenho energético dos edifícios e a economia de energia alcançada. O estudo dos efeitos térmicos pode ser compreendido através da teoria da condução de calor e dos princípios do armazenamento de calor latente. A condução de calor refere-se ao processo de transferência de calor dentro de um material, sendo a sua velocidade e eficiência determinadas pela condutividade térmica do material. A introdução de agregados reciclados AR e materiais de mudança de fase altera as propriedades térmicas do betão, impactando diretamente o desempenho térmico do edifício. Quando o betão contém PCM, o material é capaz de absorver ou liberar calor durante flutuações de temperatura, o que ajuda a mitigar as variações térmicas e reduzir o consumo energético no edifício.

O objetivo central deste estudo é quantificar as necessidades de aquecimento e arrefecimento de ambientes internos ao longo de um ciclo de teste, com foco na análise dos períodos em que a temperatura ultrapassa 25 °C ou fica abaixo de 20 °C. De acordo com os princípios termodinâmicos, a carga térmica de um edifício (ou seja, a quantidade de calor que precisa ser regulada) é influenciada pela variação da temperatura ambiente e também pelas propriedades térmicas dos materiais de construção. Ao analisar o tempo acumulado em que a temperatura se desvia desses limites, podemos avaliar a capacidade de diferentes materiais em manter a temperatura interna dentro da faixa de conforto (20 °C a 25 °C). Em particular, o betão com PCM tem a capacidade de estabilizar a temperatura interna dentro de uma faixa confortável, reduzindo o consumo energético devido a variações térmicas externas. Essas análises são baseadas nas áreas das curvas de temperatura que excedem ou estão abaixo dos limites definidos, permitindo uma avaliação detalhada do impacto dos diferentes tipos de agregados e materiais no desempenho térmico do betão. Os resultados são ilustrados nas Figura 6.21 e Figura 6.22,

que mostram as tendências de variação térmica e o impacto acumulado ao longo do tempo, fornecendo uma base teórica para a otimização energética em projetos de construção.

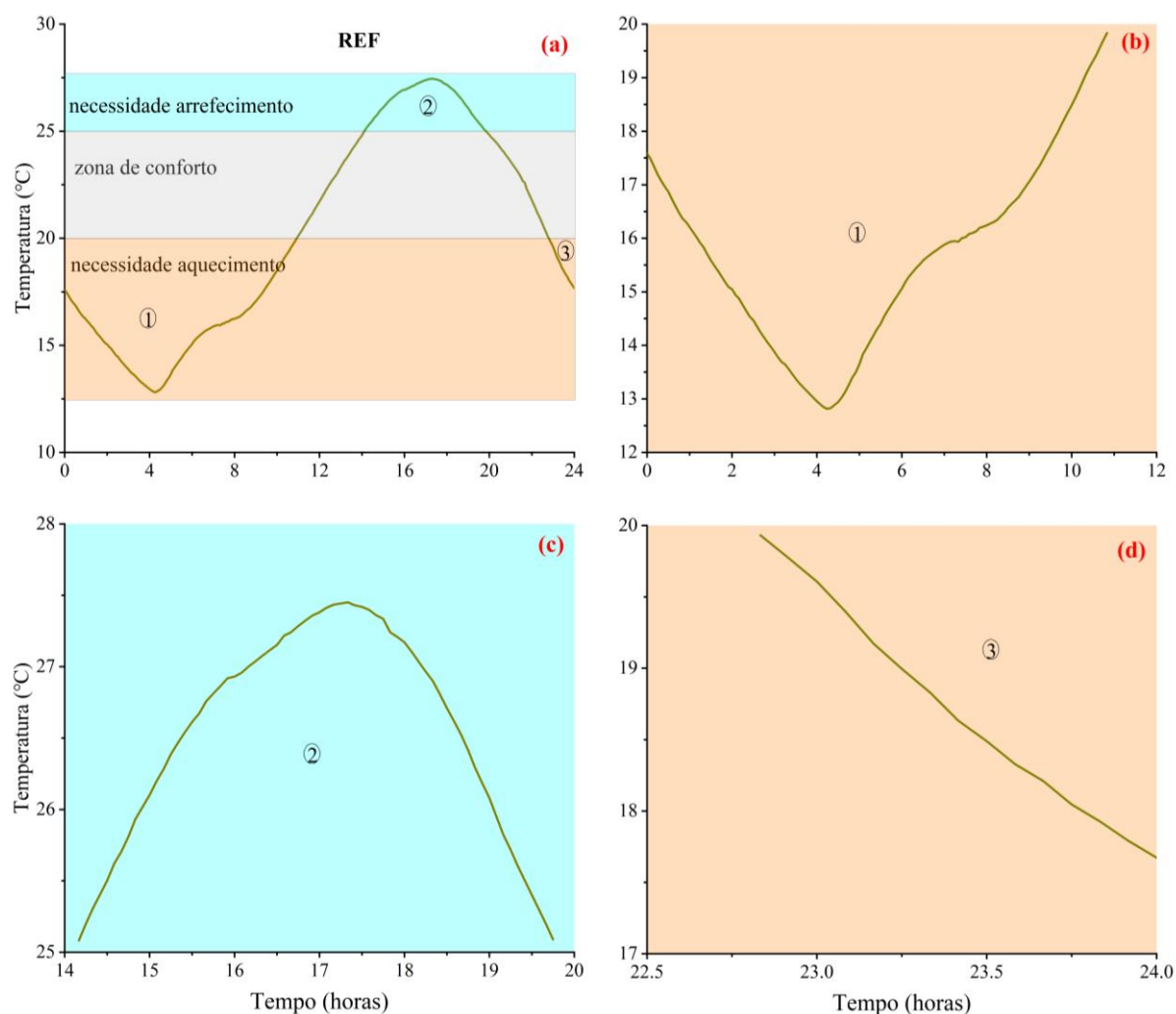


Figura 6.21 – Quantificação das necessidades de aquecimento e arrefecimento na estação de primavera (°C.h) - a) Betão referência; b) necessidades de aquecimento; c) necessidades de arrefecimento; d) necessidades de aquecimento.

Além disso, a conversão de graus Celsius (°C) para Kelvin (K) é simples: adiciona-se 273.15 à temperatura em Celsius. Por exemplo, 25 °C é equivalente a 298.15 K. Essa mudança de escala é importante em contextos científicos e técnicos, pois o Kelvin é uma medida absoluta de temperatura, que parte do zero absoluto e não possui valores negativos. Isso é fundamental em cálculos termodinâmicos, como aqueles usados para avaliar a condução de calor e o desempenho térmico de materiais. O uso da escala Kelvin garante maior precisão e consistência nas análises, especialmente em estudos de materiais em condições extremas de temperatura.

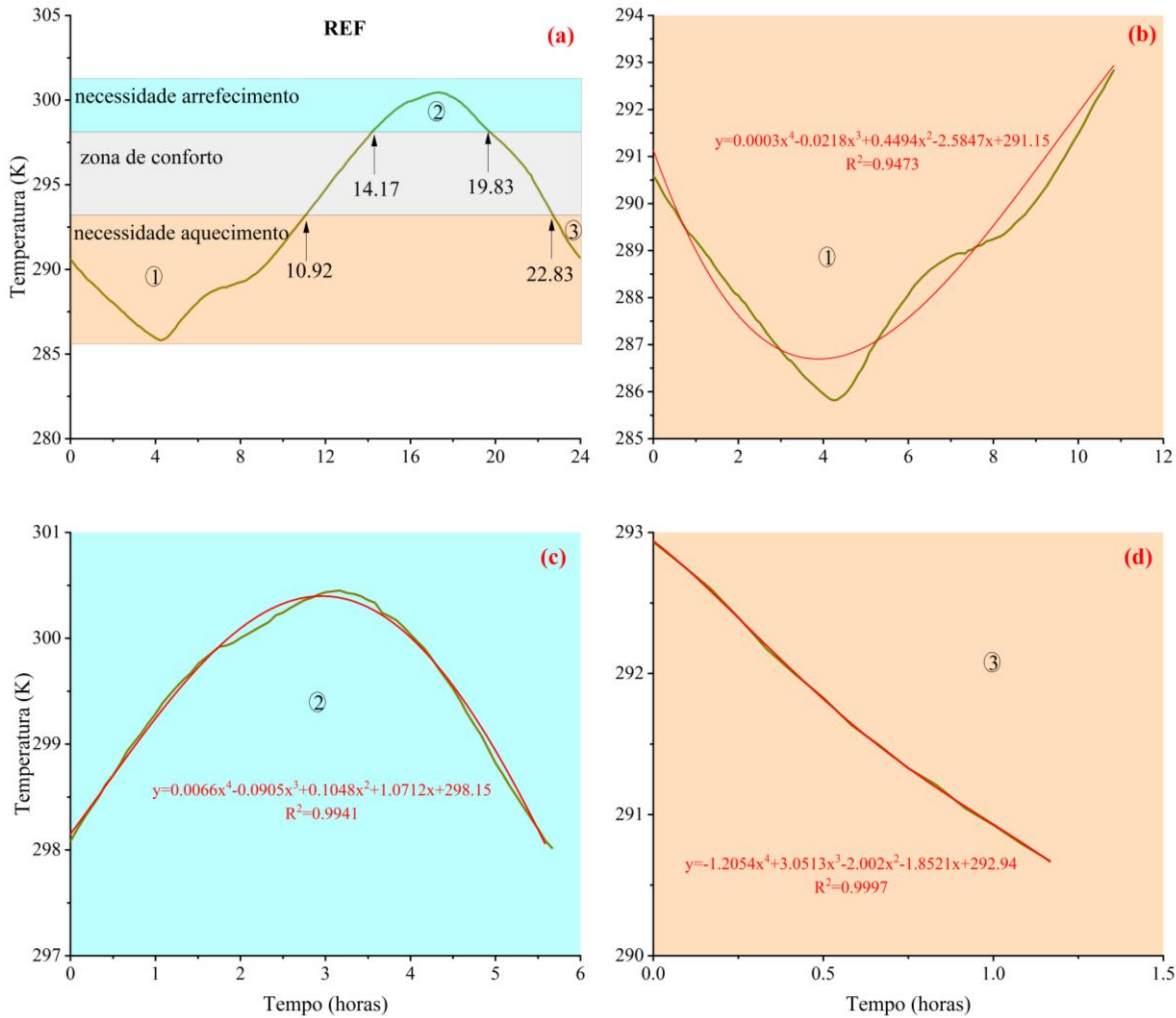


Figura 6.22 – Quantificação das necessidades de aquecimento e arrefecimento na estação de primavera (K.h) - a) Betão de referência; b) necessidades de aquecimento; c) necessidades de arrefecimento; d) necessidades de aquecimento.

Método de Quantificação das Necessidades de Aquecimento e Arrefecimento

Os resultados foram registados em graus Celsius-hora ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$) e posteriormente convertidos para graus Kelvin-hora ($^{\circ}\text{K}\cdot\text{h}$) por meio de expressões específicas, para viabilizar o cálculo de energia térmica (Figura 6.22). Os cálculos seguem as etapas descritas:

1. Necessidade de aquecimento (Figura 6.22 (b) e (d)): Quantificada com base nas expressões 6.2 e 6.4, que aproximam teoricamente as curvas experimentais e representam a energia necessária para elevar a temperatura interna a 20°C .
2. Necessidade de arrefecimento (Figura 6.22 (c)): Calculada pela expressão 6.3, representando a energia consumida para reduzir a temperatura a 25°C .

3. Conversão de unidades de energia: Aplicação da expressão 6.5 para transformar os valores de energia acumulada de °K.h para joules por metro cúbico (J/m³), padronizando os resultados.

Por exemplo tendo por base os dados apresentados na Figura 6.22 (b), onde:

$$T(t) = 0.0003t^4 - 0.0218t^3 + 0.4494t^2 - 2.5847t + 291.15$$

$$\begin{aligned} & \int_{t_0}^{t_i} T(t) dt \\ & \int_0^{10.83} 0.0003t^4 - 0.0218t^3 + 0.4494t^2 - 2.5847t + 291.15 dt \\ & 0.0003 \frac{t^5}{5} - 0.0218 \frac{t^4}{4} + 0.4494 \frac{t^3}{3} - 2.5847 \frac{t^2}{2} + 291.15t \Big|_0^{10.92} \\ & = 3152.13 K.h \end{aligned} \quad 6.2$$

Figura 6.22 (c), $T(t) = 0.0066t^4 - 0.0905t^3 + 0.1048t^2 + 1.0712t + 298.15$

$$\begin{aligned} & \int_{t_0}^{t_i} T(t) dt \\ & \int_{14.17}^{19.83} 0.0066t^4 - 0.0905t^3 + 0.1048t^2 + 1.0712t + 298.15 dt \\ & 0.0066 \frac{t^5}{5} - 0.0905 \frac{t^4}{4} + 0.1048 \frac{t^3}{3} + 1.0712 \frac{t^2}{2} + 298.15t \Big|_{14.17}^{19.83} \\ & = 1701.43 K.h \end{aligned} \quad 6.3$$

Figura 6.22 (d), $T(t) = -1.2054t^4 + 3.0513t^3 - 2.002t^2 - 1.8521t + 292.94$

$$\begin{aligned} & \int_{t_0}^{t_i} T(t) dt \\ & \int_{22.83}^{24} -1.2054t^4 + 3.0513t^3 - 2.002t^2 - 1.8521t + 292.94 dt \\ & -1.2054 \frac{t^5}{5} + 3.0513 \frac{t^4}{4} - 2.002 \frac{t^3}{3} - 1.852 \frac{t^2}{2} + 292.94t \Big|_{22.83}^{24} \\ & = 341.3 K.h \end{aligned} \quad 6.4$$

Assim, as necessidades de aquecimento ou arrefecimento podem ser determinadas com base na seguinte expressão:

$$NE = \frac{\int_{t_0}^{t_i} \rho_{cv} T(t) dt}{\Delta T} \quad 6.5$$

Onde:

NE – Necessidades energéticas (J/m^3);

ρ_{cv} – Capacidade volumétrica calorífica do ar, valor contante igual a $878.32 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$;

$T(t)$ – Função representativa da curva de temperatura ($\text{K} \cdot \text{h}$);

ΔT – Intervalo de tempo (h).

A Tabela 6.3 quantifica as necessidades de aquecimento e arrefecimento para o betão de referência e para os betões contendo diferentes teores de AR e ARPP. Os resultados do estudo indicam que, nos betões com incorporação de AR sem qualquer tipo de tratamento, à medida que a percentagem de AR aumenta, a necessidades de aquecimento e arrefecimento dos espaços internos apresentam uma tendência de redução. Este fenómeno pode ser atribuído à menor densidade e maior porosidade dos betões com maior teor de AR (Figura 6.8), o que melhora o seu comportamento térmico [303]. Em particular, no betão contendo 100% de AR, observa-se que a maior porosidade, em comparação com o betão contendo 75% AR, oferece uma resistência térmica ainda mais elevada, restringindo significativamente a transmissão de calor e reforçando a sua eficiência isolante. Esses resultados estão alinhados com as teorias clássicas de condução térmica em materiais porosos, destacando o papel fundamental da incorporação de AR na otimização das propriedades térmicas dos materiais de construção [303–305].

Nos betões contendo ARPP, verifica-se uma redução significativa no consumo energético para aquecimento e arrefecimento à medida que o teor de ARPP aumenta. Quando a percentagem de ARPP atinge 100%, observa-se uma redução de aproximadamente 15.3% nas necessidades totais de energia em comparação com o betão contendo 75% de ARPP. Esse comportamento demonstra que a incorporação de ARPP melhora substancialmente a capacidade térmica do betão, reduzindo as oscilações de temperatura no ambiente interno e aumentando a sua estabilidade térmica global [41].

Ao comparar os betões contendo AR e ARPP, verifica-se que os betões com ARPP apresentam uma menor necessidade de aquecimento e arrefecimento em comparação com os betões com AR na mesma proporção. Especificamente, em relação ao betão 75% AR, o betão 75% ARPP apresenta uma redução de aproximadamente 2.1% nas necessidades de aquecimento e 4.0% nas necessidades de arrefecimento. Além disso, no betão com incorporação de 100% ARPP, o consumo total de energia é cerca de 15.8% inferior ao do betão com incorporação de 100% AR. Esses resultados reforçam o papel essencial do PCM no armazenamento e na libertação de calor latente. Como o PCM absorve e liberta uma quantidade significativa de energia térmica durante a sua mudança de fase, ele reduz as flutuações de temperatura no ambiente interno, promovendo uma maior estabilidade térmica e uma redução nas necessidades de

aquecimento e arrefecimento.

Tabela 6.3 – Necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento para a estação de primavera.

	Necessidades de aquecimento (J/m ³)	Necessidades de arrefecimento (J/m ³)
REF	253792.3	263098.6
75AR	248388	289789.9
100AR	246680.8	278121.3
75ARPP	243258.3	278217.1
100ARPP	243193.0	242163.5

A 错误!书签自引用无效。 apresenta a poupança energética por dia na estação de primavera observadas entre betões com AR ou ARPP e o betão de referência. No caso do betão com 100% ARPP, devido à alta concentração de PCM no ARPP, há uma significativa otimização das flutuações de temperatura interna em ambientes com variações térmicas acentuadas. Isso ocorre por meio da absorção e libertação de calor latente durante os processos de aquecimento e arrefecimento, reduzindo consideravelmente as necessidades energéticas.

Tabela 6.4 – Poupança energéticas por dia na estação de primavera.

	Necessidades de aquecimento (J/m ³)	Necessidades de arrefecimento (J/m ³)
75AR	5404.3 ↓	26691.3 ↑
100AR	7111.5 ↓	15022.7 ↑
75ARPP	10534.0 ↓	15118.5 ↑
100ARPP	10599.3 ↓	20935.1 ↓

Nota: “↑” indica um consumo energético superior em comparação com o betão de referência; “↓” indica uma poupança de energia em relação ao betão de referência.

Este método de pesquisa fornece suporte teórico e experimental para o uso de materiais funcionalizados com PCM no gerenciamento de energia térmica. Os resultados quantitativos baseados em ciclos de teste permitem avaliar com precisão o consumo diário de energia em edifícios e projetar o potencial de economia de energia ao longo de um ano. As conclusões destacam não apenas a eficácia do agregado reciclado e do agregado reciclado funcionalizado em melhorar o desempenho térmico do betão, mas também oferecem fundamentos científicos para o desenvolvimento de materiais de construção mais sustentáveis. Este modelo de pesquisa contribui para o futuro desenvolvimento de materiais de construção com alto desempenho e sustentabilidade.

6.6.2. Estação de Verão

A simulação da temperatura de verão foi realizada com base numa lei de temperatura, com temperatura mínima de 11 °C e máxima de 44 °C. A Figura 6.23 apresenta o desempenho térmico de betões contendo AR e betões contendo o ARPP sob a lei de temperatura de verão.

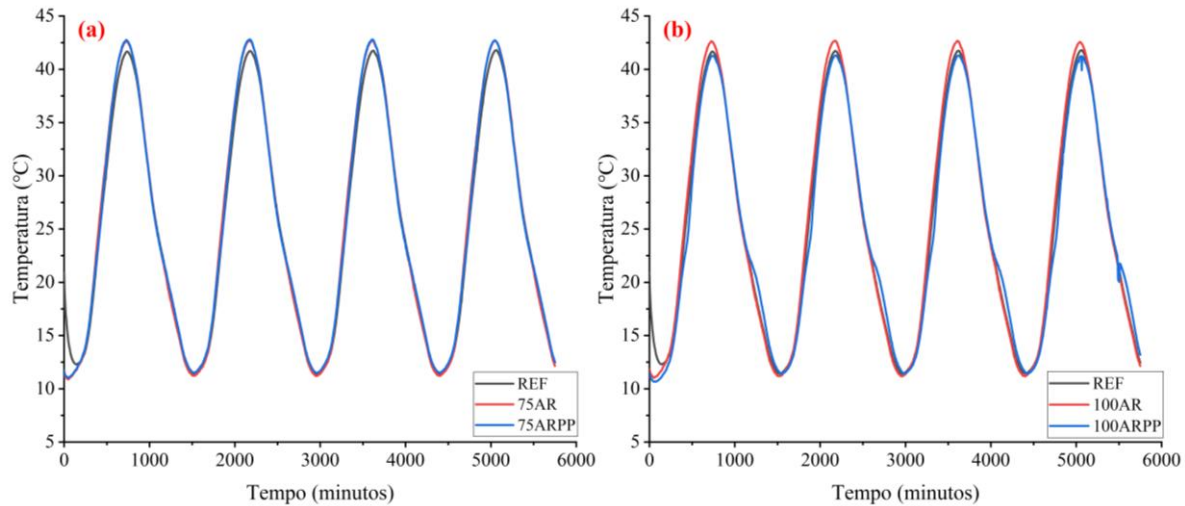


Figura 6.23 – Comportamento térmico de verão dos betões: a) REF, 75AR e 75ARPP; b) REF, 100AR e 100ARPP.

Conforme observado na Figura 6.23 (a), a temperatura do betão com incorporação de 75% ARPP é muito próxima à do betão incorporação de 75% AR no que diz respeito à temperatura máxima, enquanto a temperatura mínima do betão 75ARPP é significativamente superior à do 75AR e do betão de referência. Esse fenómeno indica que, em ambientes de alta temperatura, o betão contendo 75% de ARPP desempenha um papel positivo na regulação térmica interna. Em particular, sob condições de temperatura mais baixa durante o verão, o PCM contribui ativamente para a manutenção do conforto térmico ao absorver e libertar calor latente durante a transição de fase, reduzindo as variações bruscas de temperatura no ambiente interno.

Na Figura 6.23 (b), quando o betão incorporação de 100% ARPP, as temperaturas extremas deste betão permanecem consistentemente inferiores às do betão com incorporação de 100% AR. Isso sugere que, sob as mesmas condições ambientais, o betão com 100% ARPP apresenta um desempenho térmico superior. Além disso, os dados experimentais indicam que o betão com 100% ARPP mantém uma temperatura interna mais estável por períodos prolongados, evitando atingir as temperaturas extremas registadas no betão com 100% AR. Esses resultados reforçam que, quando o teor de ARPP atinge seu nível máximo, a capacidade de armazenamento térmico do PCM é substancialmente melhorada,

reduzindo de forma eficaz a amplitude das oscilações térmicas e proporcionando um conforto térmico superior durante o verão [299].

Todas as composições de betão apresentaram tendências térmicas semelhantes sob condições de temperatura extrema, sem diferenças significativas. No entanto, observa-se que o betão contendo PCM exibe temperaturas máximas mais baixas sob condições de calor extremo e temperaturas mínimas mais elevadas sob condições de frio extremo (Figura 6.24). Esse comportamento sugere que o PCM, por meio do mecanismo de absorção e libertação de calor latente durante a mudança de fase, contribui para a redução dos picos de temperatura em ambientes de alta temperatura e para a minimização das perdas térmicas em condições de frio, melhorando assim a capacidade de amortecimento térmico e a regulação da temperatura do betão. Antonella et al. [306] também apresentou em seus estudos um comportamento semelhante.

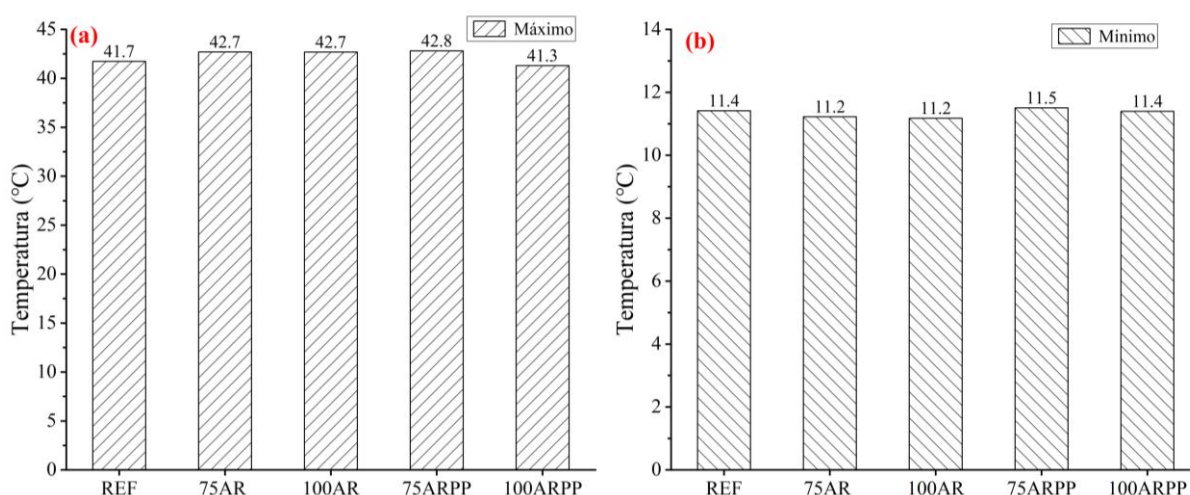


Figura 6.24 – Temperatura simulação de verão: a) temperatura máxima; b) temperatura mínima.

A Figura 6.25 apresenta a distribuição do gradiente térmico ao longo do tempo para diferentes composições de betão. Os resultados demonstram que o betão contendo 100% de ARPP exibe o maior gradiente térmico, indicando que, à medida que o teor de ARPP (ou seja, o conteúdo de PCM) aumenta, o efeito de armazenamento térmico por mudança de fase se torna predominante. Durante os processos de absorção e libertação de calor latente, o PCM regula eficazmente a transferência de calor no betão, reduzindo significativamente a amplitude das flutuações térmicas e aumentando a capacidade global de amortecimento térmico do material. Esse mecanismo de armazenamento e libertação térmica é particularmente eficaz em ambientes de alta temperatura, resultando numa melhoria da inércia térmica do betão e, conseqüentemente, num aumento substancial do conforto térmico das estruturas [41].

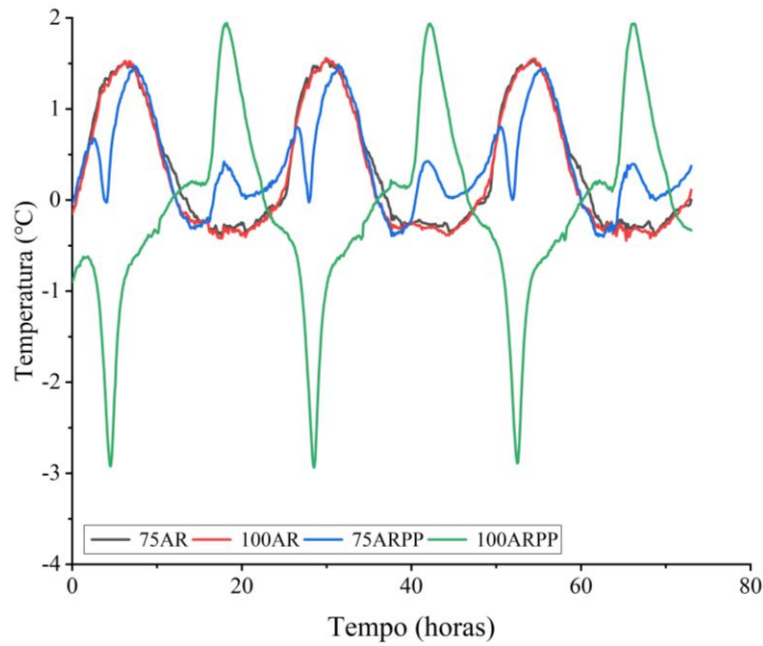


Figura 6.25 – Gradiente térmico simulação de verão.

A Tabela 6.5 apresenta as necessidades de aquecimento e arrefecimento das diferentes composições de betão. Para o betão com incorporação de agregado sem tratamento, o aumento da proporção de AR está associado a uma redução nas necessidades de aquecimento e arrefecimento. Em particular, o betão com 100% de AR apresenta uma redução significativa nas necessidades de aquecimento e arrefecimento em comparação com o betão incorporação de 75% de AR. Este comportamento pode ser explicado pela estrutura porosa do AR, que, com o aumento da sua quantidade, melhora a capacidade de amortecimento térmico do betão, reduzindo assim a necessidade de energia externa [303].

Tabela 6.5 – Necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento para a estação de verão.

	Necessidades de aquecimento (J/m ³)	Necessidades de arrefecimento (J/m ³)
REF	252083.6	270567.0
75AR	248158.4	275209.0
100AR	248132.0	275187.6
75ARPP	244585.8	269285.1
100ARPP	236473.2	256429.0

No betão com incorporação de ARPP, quando o betão contém ARPP, as necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento diminuem. O betão com 75% de ARPP apresenta uma redução de aproximadamente 3.0% e 0.47% nas necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, respetivamente, em comparação com o betão referência. Quando 100% ARPP utilizou, as necessidades

de energia para aquecimento e arrefecimento reduzir ainda mais 6.2% e 5.2%, respetivamente. Esse efeito pode ser explicado pela maior quantidade de PCM, que regula eficazmente as flutuações térmicas através da absorção e libertação de calor latente, otimizando o ambiente térmico interno e reduzindo a dependência de sistemas de climatização [302].

A Tabela 6.6 apresenta a poupança energética de betões contendo AR ou ARPP em comparação com o betão de referência durante um dia típico de verão, no que diz respeito às necessidades de aquecimento e arrefecimento. Os dados demonstram que, quando o betão incorpora PCM, as necessidades de aquecimento e arrefecimento são reduzidas em relação ao betão de referência e ao betão com incorporação de AR sem tratamento. Este resultado reflete a capacidade do ARPP, devido às propriedades de mudança de fase do PCM, de regular eficazmente o ambiente interno, minimizando a dependência de fontes externas de energia. Em particular, sob condições climáticas típicas de verão, o elevado teor de ARPP permite uma redução máxima nas flutuações térmicas, otimizando o desempenho térmico do edifício e promovendo uma economia de energia considerável tanto no aquecimento quanto no arrefecimento. De forma semelhante, o trabalho de Cunha et al. [114] também demonstra os significativos efeitos de economia de energia proporcionados pela aplicação de materiais de construção com PCM.

Tabela 6.6 – Poupanças energéticas por dia na estação de verão.

	Necessidades de aquecimento (J/m³)		Necessidades de arrefecimento (J/m³)	
75AR	3925.2	↓	4642.1	↑
100AR	3951.6	↓	4620.7	↑
75ARPP	7497.9	↓	1281.8	↓
100ARPP	15610.4	↓	14137.9	↓

Nota: “↑” indica um consumo energético superior em comparação com o betão de referência; “↓” indica uma poupança de energia em relação ao betão de referência.

6.6.3. Estação de Outono

A Figura 6.26 ilustra o desempenho térmico dos betões sob a lei de temperatura do outono, cujo intervalo simulado varia entre 17 °C e 34 °C. Na Figura 6.26 (a), observa-se que, no que diz respeito às temperaturas mais elevadas, os betões com incorporação de agregado reciclado sem tratamento e o betão de referência apresentam temperaturas mais altas em comparação com os demais. Por outro lado, em condições de temperatura mais baixa, o betão de referência exhibe os valores de temperatura mais

reduzidos. Na Figura 6.26 (b), pode-se observar que o betão com 100% de ARPP apresenta temperaturas mais baixas em condições de temperatura máxima, enquanto em condições de temperatura mínima, apresenta temperaturas mais altas. Além disso, é evidente o efeito de atraso térmico na curva do betão com 100% ARPP, reforçando a sua contribuição significativa na estabilização da temperatura interna, melhorando assim o conforto térmico dos edifícios.

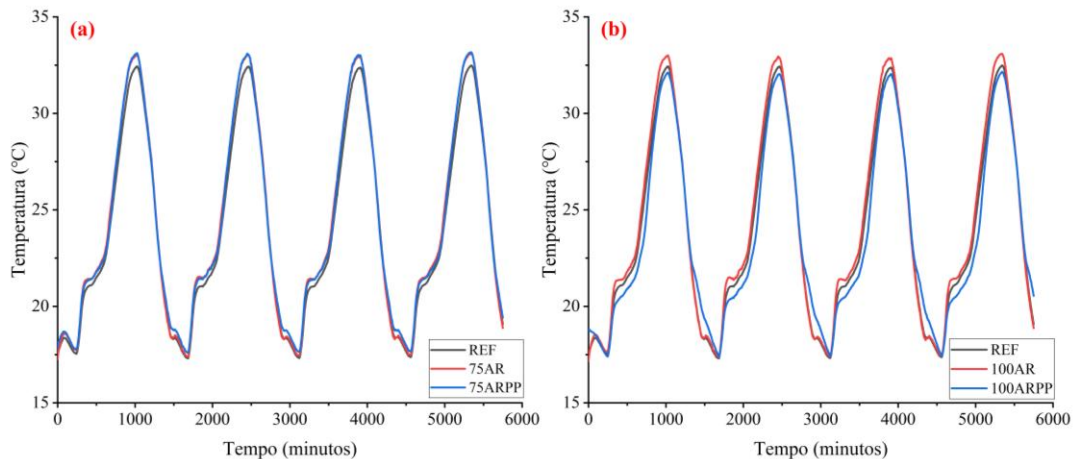


Figura 6.26 – Comportamento térmico de outono dos betões: a) REF, 75AR e 75ARPP; b) REF, 100AR e 100ARPP.

Em relação às temperaturas extremas, a Figura 6.27a) mostra que o betão contendo 100% de ARPP reduz a temperatura máxima em cerca de 3,3%. Já em relação à temperatura mínima, não se verificou uma diferença significativa entre as diferentes composições de betões analisadas (Figura 6.27(b)). A Figura 6.28 apresenta as curvas de gradiente térmico nas condições do outono. Foi possível verificar que o betão com incorporação de 100% de ARPP continua a exibir os maiores gradientes térmicos, corroborando a sua superioridade na melhoria do desempenho térmico do material. Este comportamento evidencia a eficiência da elevada concentração de ARPP em otimizar a capacidade térmica do betão.

A Tabela 6.7 apresenta as necessidades de aquecimento e arrefecimento para diferentes formulações de betões nas condições do outono. Os resultados demonstram que, da mesma forma, nos betões incorporação de AR, à medida que o teor de AR aumenta, a necessidade de aquecimento e arrefecimento do betão diminui. Quando o PCM é adicionado, as necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento são ainda mais reduzidas. Quando 100% de ARPP foi incorporado ao betão, a necessidade total de energia do betão diminui cerca de 10.7% em relação ao betão de referência.

Por fim, a Tabela 6.8 apresenta os dados relativos à economia de energia diária dos betões contendo AR e ARPP em comparação com o betão de referência nas condições de outono. Os resultados evidenciam

que apenas o betão contendo 100% ARPP proporciona economia de energia significativa, destacando o seu potencial para melhorar a eficiência energética em edifícios.

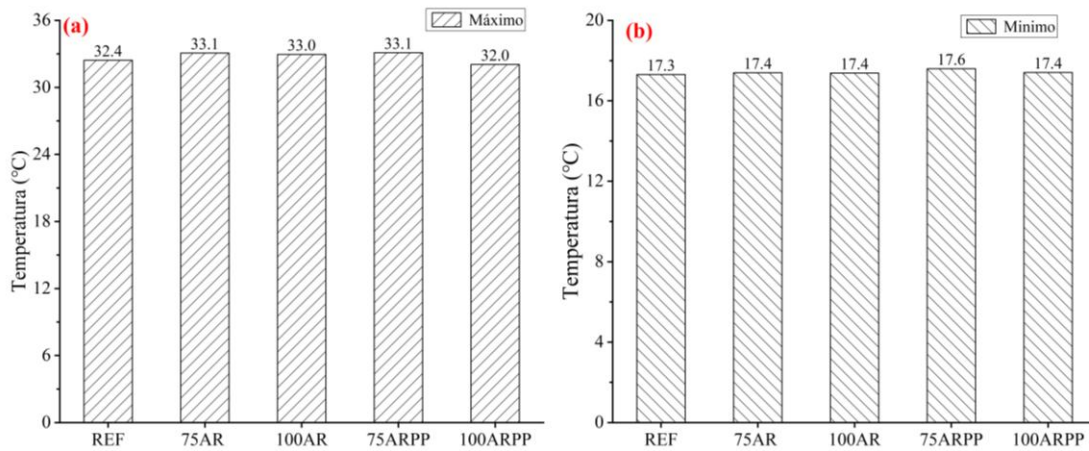


Figura 6.27 – Temperatura simulação de outono: a) temperatura máxima; b) temperatura mínima.

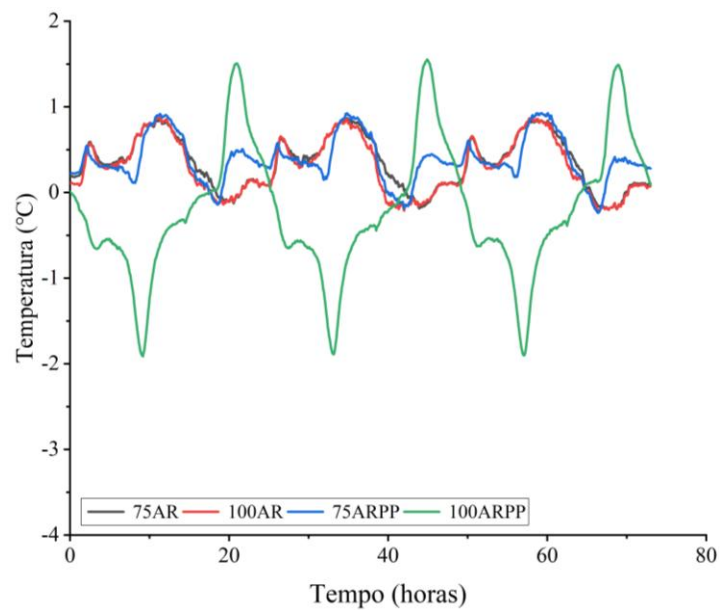


Figura 6.28 – Gradiente térmico simulação de outono.

Tabela 6.7 – Necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento para a estação de outono.

	Necessidades de aquecimento (J/m³)	Necessidades de arrefecimento (J/m³)
REF	255794.6	265731.2
75AR	255807.8	274276.1
100AR	252020.7	273174.6
75ARPP	234719.3	266191.7
100ARPP	224094.6	241826.7

Tabela 6.8 – Poupança energéticas por dia na estação de outono.

	Necessidades de aquecimento (J/m ³)		Necessidades de arrefecimento (J/m ³)	
75AR	13.2	↑	8544.9	↑
100AR	3773.8	↓	7443.4	↑
75ARPP	21075.3	↓	460.5	↑
100ARPP	31700.0	↓	23904.5	↓

Nota: “↑” indica um consumo energético superior em comparação com o betão de referência; “↓” indica uma poupança de energia em relação ao betão de referência.

6.6.4. Estação de Inverno

O estudo das condições de inverno foi realizado com base numa lei de temperatura com uma amplitude de 3 °C a 22 °C. Considerando que a temperatura transição do PCM utilizado é de 22 °C, este intervalo de temperatura de teste encontra-se fora da faixa de operação ideal do PCM, o que limita significativamente o seu desempenho esperado. Por conseguinte, esta parte do estudo concentrou-se na análise das variações térmicas do betão dentro deste intervalo de temperatura.

Conforme apresentado na Figura 6.29, o betão contendo 100% de ARPP apresentou temperaturas internas consistentemente abaixo da faixa de conforto térmico ao longo de todo o teste. Este resultado deve-se ao facto de a temperatura do teste não atingir o ponto de fusão do PCM, combinado com o aquecimento contínuo que impediu o armazenamento de calor suficiente, limitando assim a eficácia do PCM na regulação térmica. Por outro lado, o betão com incorporação de agregado reciclado demonstrou um desempenho térmico relativamente superior sob as condições de inverno, alcançando temperaturas máximas dentro da faixa de conforto térmico. Este comportamento pode ser atribuído à porosidade do agregado reciclado, que aumenta significativamente a quantidade de poros no interior do betão. A característica de isolamento térmico dos materiais porosos contribui para uma maior capacidade de isolamento térmico no betão com incorporação de agregado reciclado.

Ao analisar os ciclos de aquecimento e arrefecimento, observa-se que o betão com incorporação de 100% de ARPP apresenta um atraso notável em ambas as fases. Este comportamento pode ser explicado pelas propriedades de mudança de fase do PCM, que, mesmo em condições de baixa temperatura, mantém a capacidade de regular a temperatura interna do betão devido ao armazenamento e libertação de calor latente. Assim, conclui-se que, embora o desempenho geral do PCM em condições de inverno seja limitado, a sua presença ainda proporciona uma moderação térmica significativa, ajudando a atenuar as

variações de temperatura no interior do material.

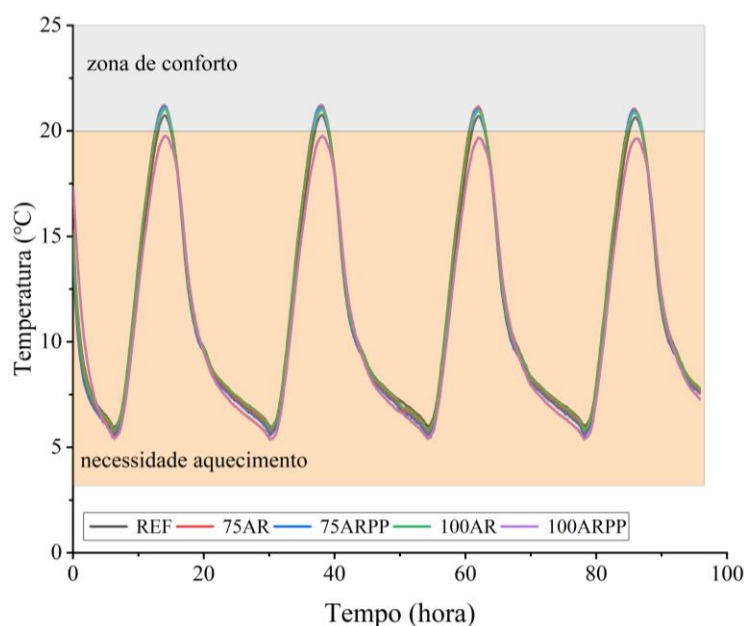


Figura 6.29 – Comportamento térmico de inverno dos betões.

6.6.5. Análise de custo

De acordo com o relatório da Agência Internacional de Energia, o consumo energético de edifícios, relacionado principalmente com sistemas de aquecimento e arrefecimento, representa aproximadamente 27% do consumo global de energia [35]. Essa realidade tem gerado uma crescente preocupação com os elevados níveis de consumo energético associados ao setor da construção.

Neste contexto, este estudo foca-se na incorporação de PCM em materiais de construção, especificamente no betão, como uma estratégia eficaz para reduzir os custos energéticos durante a operação dos edifícios. A inclusão de PCM nos materiais de construção demonstrou, conforme evidenciado em estudos anteriores, a capacidade de diminuir significativamente as necessidades de aquecimento e arrefecimento dos edifícios.

Com base nos cálculos prévios das necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento de betões contendo AR ou ARPP, em comparação com betões de referência (Tabelas 6.4, 6.6 e 6.8), foi possível determinar as poupanças energéticas associadas às diferentes formulações de betão, com base na expressão 6.6.

$$P_a = N_{a,bet\tilde{a}o\ refer\tilde{e}ncia} - N_{a,bet\tilde{a}o\ com\ AR\ ou\ ARPP} \quad 6.6$$

Em que:

P_a – Poupanças diárias de energéticas para aquecimento ou arrefecimento do betão com AR ou ARPP (J/m^3);

$N_{a, \text{betão referência}}$ – Necessidades para aquecimento ou arrefecimento do betão referência por dia (J/m^3);

$N_{a, \text{betão com AR ou ARPP}}$ – Necessidades para aquecimento ou arrefecimento do betão com AR ou ARPP por dia (J/m^3).

A metodologia para o cálculo das poupanças energéticas consistiu em determinar inicialmente as poupanças de climatização mensais, com base nas poupanças diárias de climatização (expressão 6.7).

Os resultados detalhados encontram-se apresentados na Tabela 6.9.

$$P_{\text{climatização mensais}} = (P_{\text{aquecimento}} + P_{\text{arrefecimento}}) \times 30 \quad 6.7$$

Em que:

$P_{\text{climatização mensais}}$ – Poupanças de climatização mensais (J/m^3);

$P_{\text{aquecimento}}$ – Poupanças de aquecimento (J/m^3);

$P_{\text{arrefecimento}}$ – Poupanças de arrefecimento (J/m^3).

Tabela 6.9 – Poupança de climatização mensais (J/m^3).

Composições	Primavera	Verão	Outono
75AR	638610 ↑	21505 ↑	256741 ↑
100AR	237336 ↑	20072 ↑	110087 ↑
75ARPP	137535 ↓	263390 ↓	618443 ↓
100ARPP	946032 ↓	892449 ↓	1668137 ↓

Nota: “↑” indica um gasto de climatização mensais em comparação com o betão de referência; “↓” indica uma poupança de climatização mensais em relação ao betão de referência.

Posteriormente, foi realizado o cálculo do consumo mensal médio de energia para as diferentes formulações de betão em cada estação do ano, expresso em quilowatt-hora por metro cúbico (kWh/m^3).

A conversão das unidades foi rigorosamente efetuada de acordo com a expressão 6.8.

$$PK_{\text{climatização mensais}} = \frac{P_{\text{climatização}} \times 1.163}{4185.5} \times 10^{-3} \quad 6.8$$

Em que:

PK – Poupanças de climatização mensais (kWh/m^3);

$P_{\text{climatização mensais}}$ – Poupanças de climatização mensais (J/m³).

Tabela 6.10 – Poupança de climatização mensais (kWh/m³).

Composições	Primavera	Verão	Outono
75AR	0.177 ↑	0.006 ↑	0.071 ↑
100AR	0.066 ↑	0.006 ↑	0.031 ↑
75ARPP	0.038 ↑	0.073 ↓	0.172 ↓
100ARPP	0.263 ↓	0.248 ↓	0.464 ↓

Nota: “↑” indica um gasto de climatização mensais em comparação com o betão de referência; “↓” indica uma poupança de climatização mensais em relação ao betão de referência.

Com base na poupança mensal das poupanças de climatização, assumindo uma duração de 3 meses para cada estação do ano, a poupança anual de climatização para os betões com AR ou ARPP em comparação com o betão de referência foi calculada, conforme a expressão 6.9. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.11.

$$P_{NKA} = P_{NKP} \times 3 + P_{NKV} \times 3 + P_{NKO} \times 3 + P_{NKI} \times 3 \quad 6.9$$

Em que:

P_{NKA} – Poupança das necessidades de climatização anuais (kWh/m³);

P_{NKP} – Poupança das necessidades de climatização mensais de primavera (kWh/m³);

P_{NKV} – Poupança das necessidades de climatização mensais de verão (kWh/m³);

P_{NKO} – Poupança das necessidades de climatização mensais de outono (kWh/m³);

P_{NKI} – Poupança das necessidades de climatização mensais de inverno (kWh/m³).

Tabela 6.11 – Poupança de climatização anuais (kWh/m³).

Composições	P_{NCA} (kWh/m³)
75AR	0.764 ↑
100AR	0.306 ↑
75ARPP	0.620 ↓
100ARPP	2.923 ↓

Nota: “↑” indica um gasto de climatização anuais em comparação com o betão de referência; “↓” indica uma poupança de climatização anuais em relação ao betão de referência.

Com base no preço médio da eletricidade em Portugal para consumidores residenciais, que é de 0.196 € por kWh (1 kWh = 0.196 €) [307], e considerando a redução anual nas necessidades de climatização,

correspondendo a uma diminuição no consumo energético anual, foi calculada a poupança monetária associada ao uso de betões com AR e ARPP, conforme apresentado na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 – Poupança monetária anual (€/m³).

Composições	Poupança monetária anual (€/m³)	
75AR	0.150	↑
100AR	0.060	↑
75ARPP	0.122	↓
100ARPP	0.573	↓

Nota: “↑” indica um gasto monetária anual em comparação com o betão de referência; “↓” indica uma poupança de custo.

De acordo com Decreto-Lei n.º 38382, Artigo 65º de Portugal, A altura mínima, piso a piso, em edificações destinadas à habitação é de 2.70 m [308]. Considerando a área útil média de um edifício típico com 110 m², é possível calcular o consumo total de energia dos sistemas de climatização de forma a manter a temperatura interna dentro da faixa de conforto (20 °C – 25 °C) em diferentes estações, bem como o custo diário associado. De acordo com os dados da Tabela 6.12, observa-se o betão com incorporação de agregado reciclado funcionalizado apresenta uma redução significativa nos custos energéticos residenciais quando comparado ao betão de referência.

Quando 75% e 100% de agregados reciclados funcionalizados são incorporados ao betão, os custos anuais de funcionamento do ar condicionado diminuem aproximadamente 36.23€ e 170.18€, respetivamente. Esse efeito deve-se, principalmente, à capacidade do PCM de armazenar e libertar calor, proporcionando uma regulação térmica mais eficiente, cujo impacto se intensifica com o aumento da sua incorporação, conforme demonstrado em estudos anteriores [309]. Além disso, do ponto de vista do desempenho energético e da viabilidade económica, o betão contendo ARPP apresenta vantagens superiores em comparação com aquele composto exclusivamente por agregados reciclados, resultando não apenas em uma maior eficiência térmica dos edifícios, mas também numa redução significativa do consumo energético, promovendo, assim, maiores benefícios económicos.

CAPÍTULO

7. BETÃO COM AGREGADO RECICLADO ADITIVADO COM PCM E PCM LIVRE

7.1. Composições de betões

Neste estudo, o PCM livre foi incorporado ao betão para explorar seu impacto no desempenho energético, assim como explorar a possibilidade e compatibilidade de utilizar duas técnicas de incorporação de PCM em simultâneo num material de construção. A adição de PCM na forma livre visa ainda maximizar o teor de PCM no betão, aprimorando seu efeito de regulação térmica e investigar a influência de sua dosagem nas propriedades térmicas do betão. O objetivo central da pesquisa consiste em verificar que, quanto maior o teor de PCM, maior será a capacidade de armazenamento térmico do betão, resultando em um efeito de economia de energia mais significativo e melhorando a eficiência energética das edificações. A Tabela 7.1 mostra as composições de betão com agregado reciclado funcionalizado e PCM livre. O trabalho físico, mecânico e durabilidade destas composições foi publicado [310].

Tabela 7.1 – Composição de betões com ARPP e PP (kg/m³).

Composições	Cimento	Água	Areia natural	Brita	ARPP	PP
75ARPP+7.5	400	240	393	251.6	755	30
75ARPP+15	400	240	393	229.5	689	59
100ARPP+7.5	400	240	393	-	1018	30
100ARPP+15	400	240	393	-	928	59

7.2. Comportamento físico

7.2.1. Abaixamento do betão fresco

A Figura 7.1 apresenta os valores de abaixamento do betão fresco com a incorporação de 7.5% e 15% de PCM livre. Observa-se que, quando adicionado 7.5% de PCM livre, o abaixamento do betão diminui à medida que a percentagem de agregado reciclado funcionalizado aumenta. Esse comportamento deve-se, principalmente, ao aumento da fração de agregado graúdo, que intensifica a fricção interna entre as partículas.

Por outro lado, com o aumento do teor de PCM livre para 15%, verificou-se um aumento de aproximadamente 23% no abaixamento do betão. Este fenómeno pode ser atribuído à maior proporção de fase líquida na mistura fresca, promovida pela introdução de PCM livre, resultando em melhorias na trabalhabilidade e fluidez do material. O PCM livre atua como um agente lubrificante na matriz cimentícia,

mesmo não contribuindo para a hidratação do ligante, reduzindo a fricção entre as partículas da pasta, o que minimiza a resistência ao fluxo [93]. Este efeito plastificante favorece a trabalhabilidade do betão durante a fase de colocação, facilitando o processo de betonagem e aumentando o valor do seu abaixamento, otimizando assim o desempenho do betão no estado fresco.

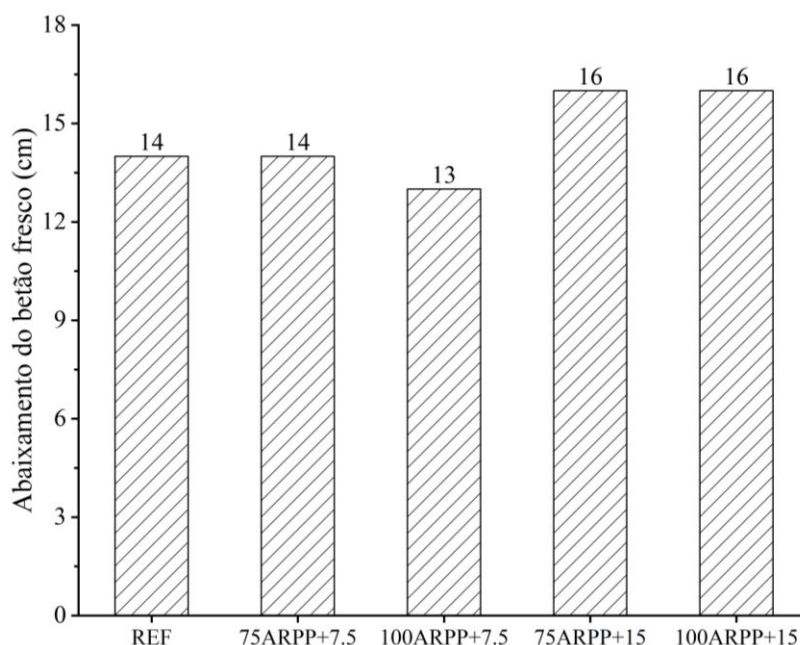


Figura 7.1 - Abaixamento dos diferentes betões desenvolvidos.

7.2.2. Massa volúmica

A Figura 7.2 mostra a tendência de variação na massa volúmica do betão, indicando uma redução na massa volúmica com a incorporação de PCM livre. Especificamente, quando 7.5% de PCM livre foi adicionado ao betão, as misturas contendo 75% e 100% de ARPP apresentaram uma redução na massa volúmica de aproximadamente 8.2% e 15.3%, respetivamente. Com a incorporação de 15% de PCM livre, a massa volúmica do betão com 75% e 100% de ARPP reduziu cerca de 15.9% e 16.8%, respetivamente. É relevante destacar que as formulações 75ARPP+15, 100ARPP+7.5 e 100ARPP+15 cumprem os requisitos da norma EN 206-1 [245] para betão leve, indicando que esses compósitos satisfazem os critérios técnicos para materiais de baixa massa volúmica.

A redução da massa volúmica do betão deve-se principalmente à substituição parcial dos agregados pelo PCM livre. Como o PCM apresenta uma massa volúmica significativamente inferior à dos agregados convencionais, a sua introdução reduz a massa volúmica global da mistura de betão. Esta tendência está de acordo com os princípios de produção de betão leve, nos quais se utilizam agregados ou aditivos de

baixa massa volúmica para diminuir a massa volúmica, preservando simultaneamente a integridade estrutural e a estabilidade do material. A diminuição da massa volúmica reforça ainda mais o potencial do PCM livre na produção de betão leve, permitindo uma redução do peso próprio sem comprometer significativamente o desempenho mecânico, o que amplia a aplicabilidade desse material na engenharia civil.

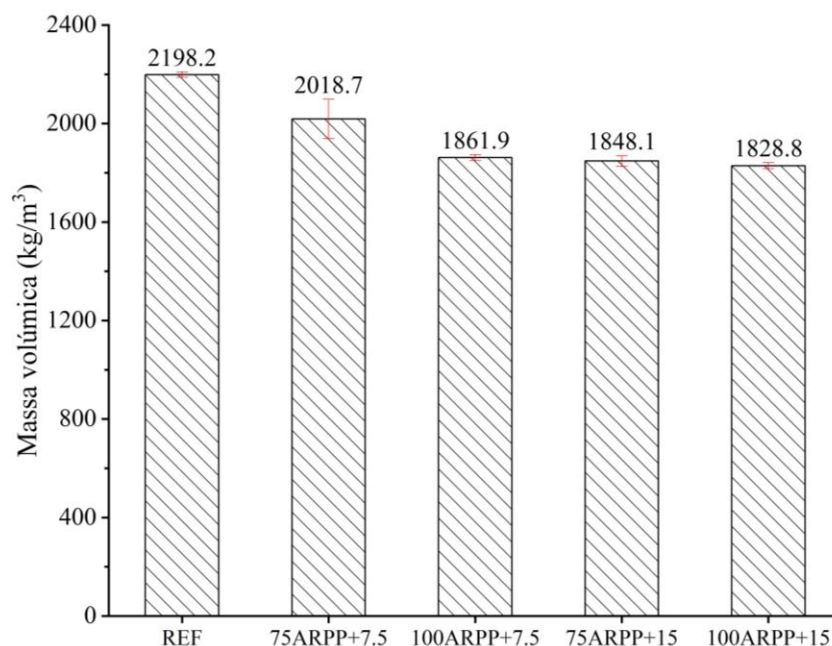


Figura 7.2 - Massa volúmica do betão.

7.2.3. Absorção de água por imersão

A absorção de água por imersão é um indicador importante para avaliar a capacidade de absorção de água do betão. A Figura 7.3 apresenta os valores de absorção de água por imersão em diferentes composições de betão. Os resultados indicam que, com a incorporação de 7.5% de PCM livre, a absorção de água por imersão aumentou aproximadamente 24.8% e 32.9% nos betões contendo 75% e 100% de ARPP, respetivamente. Quando o teor de PCM livre foi elevado para 15%, observou-se um aumento de aproximadamente 34.2% na absorção de água por imersão em ambas as composições de betão com ARPP. Esse incremento na absorção de água pode ser atribuído a diversos fatores.

Durante o processo de secagem em estufa a 60 °C, a temperatura das amostras pode ultrapassar o ponto de transição de fase do PCM, levando à sua transformação para o estado líquido. Nessa fase, devido à ação da gravidade, o PCM líquido pode migrar da superfície ou das regiões adjacentes da amostra, especialmente quando o PCM não está completamente contido nos poros. No entanto, é

importante destacar que, na técnica de incorporação direta, o PCM não se perde de forma geral, mas sim, ocorre uma certa perda nas regiões da superfície que não estão totalmente seladas. A perda superficial do PCM expõe mais poros, o que pode resultar em um aumento na capacidade de absorção de água do betão.

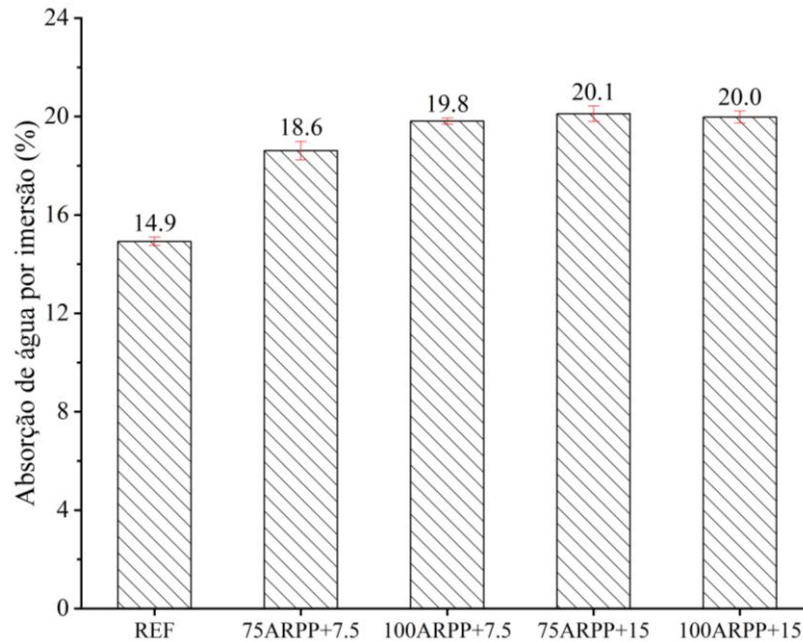


Figura 7.3 – Absorção de água por imersão do betão.

7.2.4. Microestrutura

A Figura 7.4 apresenta a microestrutura do betão contendo 15% de PCM livre sob uma ampliação de 5000 vezes, refletindo visualmente a distribuição do PCM no interior do betão e seu impacto na microestrutura da zona de transição da interface (ITZ). Observa-se que o PCM preenche extensivamente os poros e fissuras do betão, desempenhando um papel ativo na otimização da microestrutura.

As Figura 7.4 (a) e (b) ilustram a microestrutura da ITZ do betão onde, sobre uma base de 75% ARPP e 100% ARPP, foi adicionada uma quantidade extra de 15% de PCM livre. Verifica-se que a estrutura porosa do betão se apresenta mais homogênea e uniformemente preenchida. Esse fenómeno pode ser atribuído à presença do PCM livre, que, ao sofrer a transição sólido-líquido, consegue fluir de forma mais eficiente para os micróporos do betão, proporcionando um preenchimento mais eficaz. Além disso, a incorporação adicional de PCM livre melhora a distribuição dos poros internos, reduzindo a microporosidade total, o que pode contribuir para um aumento da durabilidade e da estabilidade térmica do material.

De modo geral, a análise da microestrutura indica que o aumento do teor de PCM promove melhorias significativas na ITZ do betão, reduzindo a microporosidade, minimizando microfissuras na interface e aumentando a homogeneidade e a compacidade do material. Estes resultados reforçam o potencial do PCM na otimização da microestrutura do betão e na melhoria do seu desempenho global, oferecendo uma base experimental robusta para a aplicação de materiais de armazenamento térmico por mudança de fase na construção civil.

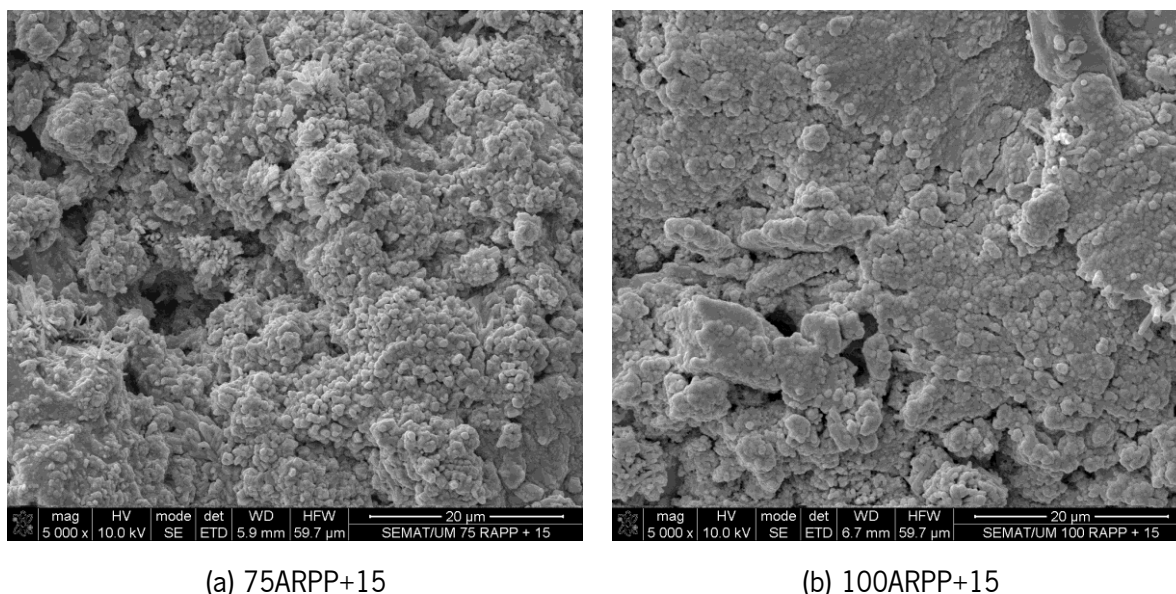


Figura 7.4 – Microestrutura do betão, ampliação de 5000 vezes: (a) 75ARPP+15; (b) 100ARPP+15.

7.3. Comportamento mecânico

7.3.1. Resistência à compressão

A resistência à compressão é um indicador crucial para avaliar o desempenho estrutural e a capacidade de carga do betão. Conforme ilustrado na Figura 7.5, a resistência à compressão de diferentes composições de betão apresenta uma tendência de redução significativa com a introdução de PCM livre. Especificamente, para os betões contendo 75% de ARPP e 100% de ARPP, a incorporação de 7.5% de PCM livre reduziu a resistência à compressão em aproximadamente 63.5% e 71.5%, respetivamente. Já para os betões com 15% de PCM livre, a resistência à compressão diminuiu cerca de 71.5% e 73.8%, respetivamente. Em comparação com o betão com 7.5% de PCM livre, a resistência à compressão dos betões 75ARPP+15 e 100ARPP+15 diminuiu cerca de 21.8% e 8.2%, respetivamente.

A redução da resistência à compressão do betão pode ser atribuída a vários fatores interrelacionados. Primeiramente, em comparação com o betão de referência, o betão contendo PCM livre apresenta um aumento na quantidade de água (Tabela 7.1), o que afeta a compactação da estrutura do betão, resultando em uma diminuição da resistência à compressão. Além disso, a incorporação de PCM livre em misturas cimentícias retarda o processo de hidratação do cimento, o que interfere no aumento gradual da resistência [298]. Outro fator importante é o aumento da absorção de água por imersão (Figura 7.3), o que indica um aumento na macroporosidade do betão, tornando sua estrutura mais porosa e, portanto, menos densa e resistente. Esses fatores combinados afetam negativamente a integridade e o desempenho mecânico do betão.

Estes resultados destacam a importância de otimizar a estratégia de incorporação do PCM na formulação do betão. É essencial controlar fatores como dispersão, uniformidade e teor de PCM, a fim de minimizar os impactos negativos na resistência à compressão, ao mesmo tempo que se maximizam os benefícios funcionais proporcionados pelo PCM. Dessa forma, torna-se possível alcançar um equilíbrio eficiente entre as propriedades mecânicas e funcionais do material compósito.

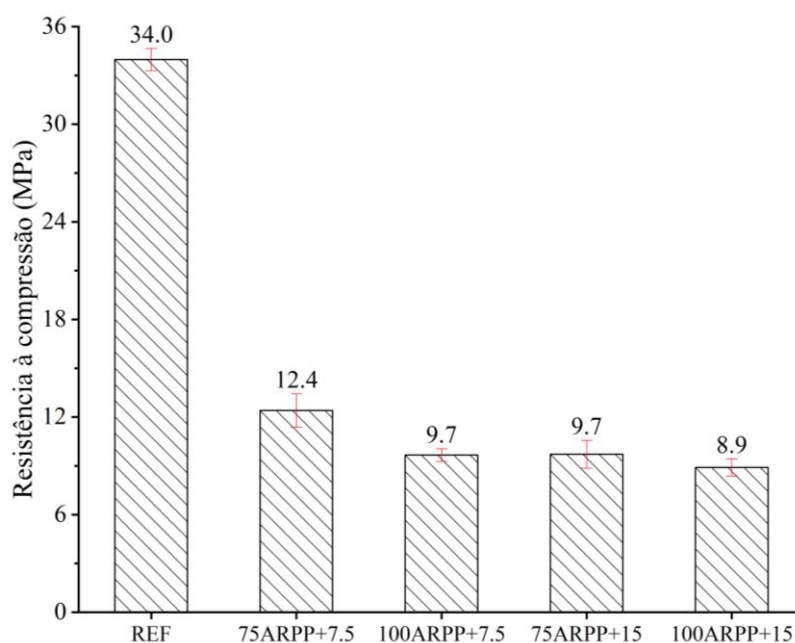


Figura 7.5 – Resistência à compressão do betão.

7.3.2. Resistência à flexão

A Figura 7.6 apresenta a resistência à flexão do betão, confirmando ainda mais o impacto da incorporação de PCM livre nas propriedades mecânicas. Os resultados mostram que a adição de PCM

livre reduz significativamente a resistência à flexão do betão. Especificamente, para o betão com 75% de ARPP, a incorporação de 7.5% de PCM livre reduziu a resistência à flexão em cerca de 40.4%, enquanto no betão com 100% de ARPP, a resistência à flexão diminuiu em 50%. Quando 15% de PCM livre foi adicionado, a resistência à flexão do betão com 75% de ARPP diminuiu em 44.2%, e no betão com 100% de ARPP, a redução foi de 57.7%. Em comparação com o betão com 7.5% de PCM livre, a resistência à flexão dos betões 75ARPP+15 e 100ARPP+15 diminuiu em 9.7% e 15.4%, respetivamente.

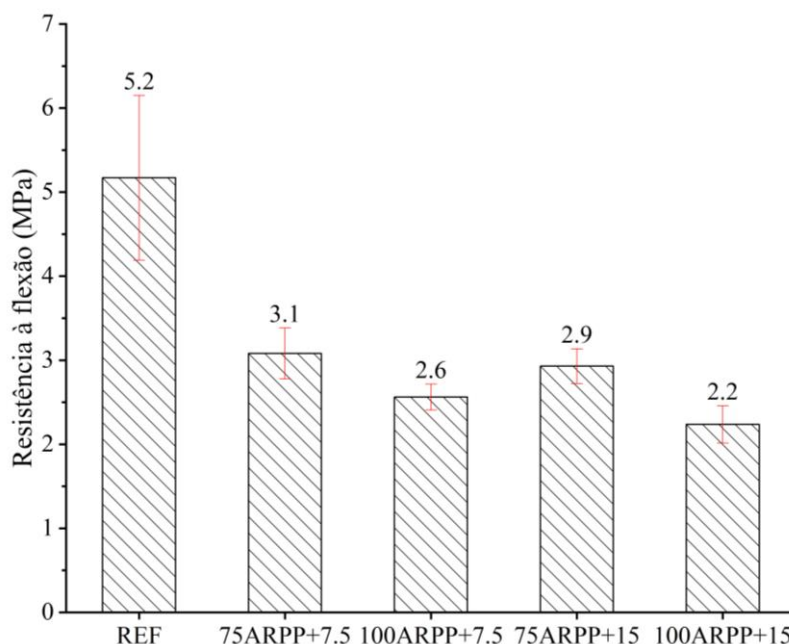


Figura 7.6 – Resistência à flexão das diferentes composições de betão.

A redução da resistência à flexão do betão pode ser atribuída a uma série de fatores interrelacionados. Em primeiro lugar, o betão contendo PCM livre necessita de mais água em comparação com o betão de referência, o que aumenta a relação água/cimento e afeta a sua densidade geral. Quando existe mais água, pode resultar numa ligação insuficiente entre as partículas de cimento, tornando a sua microestrutura menos densa, o que diminui a sua capacidade de resistência [311]. Além disso, o PCM livre pode retardar o processo de hidratação do cimento durante a cura do betão, o que faz com que o desenvolvimento da resistência da pasta de cimento seja mais lento. Como a hidratação do cimento não ocorre completamente, a microestrutura do betão carece de suporte adequado para a resistência, resultando numa menor resistência à flexão. Cunha et al. [115] demonstrou que o PCM livre atrasa o processo de hidratação do cimento. Além disso, com o aumento da absorção de água por imersão, a macroporosidade do betão também aumenta. Estes fatores tornam o betão mais suscetível ao aparecimento de fissuras quando submetido a flexão, onde os poros e fissuras funcionam como pontos de concentração de tensões, facilitando o colapso estrutural [312]. O aumento da porosidade não só

reduz a densidade global do betão, mas também compromete a sua capacidade de resistir a forças externas, o que leva a uma maior diminuição da resistência à flexão.

Portanto, a adição de PCM livre contribui para a redução da resistência à flexão do betão por meio do aumento da quantidade de água, do atraso no processo de hidratação do cimento e do aumento da porosidade, indicando que esses fatores têm um impacto negativo significativo no desempenho mecânico do betão.

7.4. Durabilidade

7.4.1. Migração de cloretos por migração em regime não estacionário (CTH)

A Figura 7.7 apresenta os resultados do coeficiente de migração de cloretos em regime não estacionário (DNSSM) dos diferentes betões. Observa-se que, com o aumento do teor de PCM livre, o DNSSM diminui significativamente, indicando que maiores quantidades de PCM livre aumentam a resistência do betão à penetração de cloretos. Especificamente, para o betão com 75% de agregado reciclado funcionalizado (ARPP), a adição de 7.5% de PCM livre reduziu o DNSSM em cerca de 22.3%; enquanto no betão com 100% de ARPP, a redução foi de 22.3%. Quando a quantidade de PCM livre foi aumentada para 15%, o DNSSM diminuiu em 24% e 26.2% nos betões com 75% e 100% de ARPP, respetivamente. Esse comportamento sugere que a incorporação de PCM livre preenche os micróporos e poros da matriz do betão, formando uma barreira física eficaz que dificulta a migração de cloretos e reduz sua penetração.

O mecanismo responsável por essa melhoria na resistência à penetração de cloretos pode ser explicado pela capacidade do PCM livre de melhorar a estrutura dos poros internos do betão (Figura 7.4), uma vez que no estado sólido, o PCM preenche os micróporos da matriz e, durante o processo de transição de fase, adaptando-se às variações estruturais internas. Além disso, as propriedades de mudança de fase do PCM fornecem estabilidade volumétrica adicional durante as flutuações de temperatura do betão, ajudando a reduzir a formação e propagação de microfissuras, o que, por sua vez, diminui os caminhos de penetração dos cloretos [300].

É importante observar que, ao atingir determinados teores de PCM livre (como 7.5% ou 15%), o valor de D_{NSSM} no betão com 75% e 100% de agregado reciclado funcionalizado apresenta uma tendência de estabilização. Esse fenómeno sugere que o efeito de melhoria da resistência à penetração de cloretos

tende a estabilizar com o aumento da quantidade de PCM, indicando que a barreira formada pelo PCM nos poros da matriz já se encontra maximizada. Isso fornece uma orientação valiosa para a otimização da formulação de betão, pois, ao buscar aprimorar a resistência à penetração de cloretos, é possível controlar a quantidade de PCM livre de forma racional, evitando custos desnecessários e potenciais redundâncias no desempenho do material.

Em resumo, esses resultados destacam o potencial do PCM livre para melhorar a durabilidade do betão, oferecendo uma estratégia viável para mitigar a corrosão induzida por cloretos em estruturas de betão armado. Além disso, a combinação otimizada de PCM livre com agregados reciclados proporciona uma solução eficaz para os desafios impostos pela elevada porosidade do betão com agregados reciclados, contribuindo para uma utilização mais eficiente dos recursos reciclados e promovendo a durabilidade a longo prazo das estruturas.

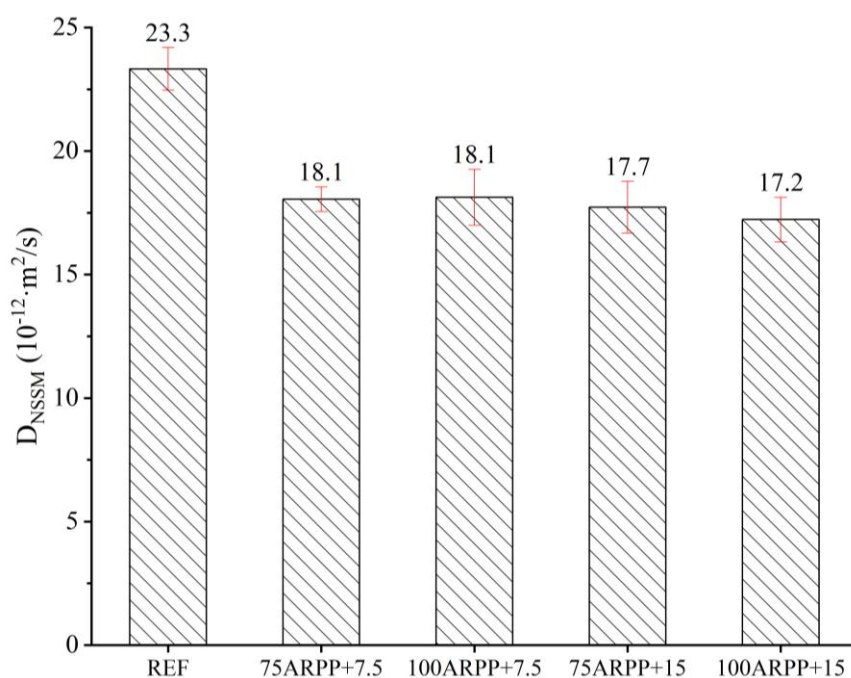


Figura 7.7 – Coeficiente de migração em estado não estacionário do betão.

7.4.2. Gelo-degelo

Neste estudo, foi realizada uma análise detalhada da durabilidade das amostras de betão através também de testes de ciclos de gelo-degelo. A Figura 7.8 ilustra a degradação superficial das amostras após 30 e 90 ciclos. Os resultados indicam que, após 30 ciclos de gelo-degelo, o betão referencia desenvolveu as fissuras. E o betão com 7.5% de PCM livre manteve uma boa integridade superficial, sem

danos visíveis. Em contraste, o betão com 15% de PCM livre apresentou sinais de desagregação parcial da camada de pasta de cimento na superfície e danos nas bordas, o que pode ser atribuído à maior quantidade de PCM livre e ao menor desempenho mecânico desta composição (Figura 7.5Figura 7.6).

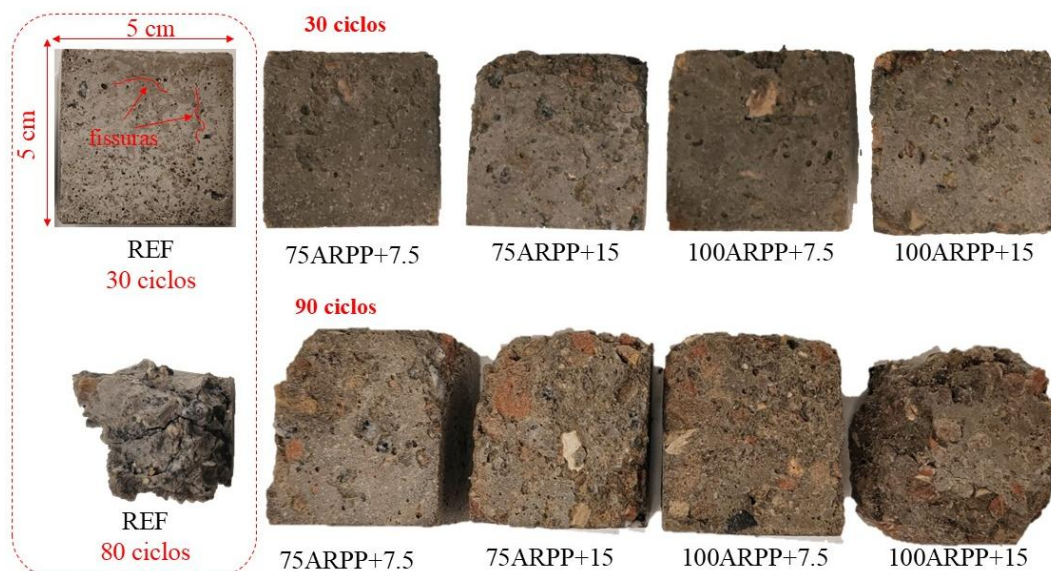


Figura 7.8 – As mostras do betão apos 30 e 90 ciclos de gelo-degelo.

Após 80 ciclos de gelo-degelo, o betão de referência perde completamente as suas propriedades. Após 90 ciclos, os efeitos tornam-se mais evidentes. O betão com 7.5% e 15% de PCM livre apresentou danos mais significativos, sendo que as amostras com incorporação de 15% de PCM livre exibiram danos mais pronunciados, incluindo fissuração e desagregação superficial. Além disso, observou-se que as amostras com maior teor de PCM livre e menores resistências à compressão sofreram maiores deteriorações durante os ciclos de gelo-degelo. Isso sugere que, embora o PCM livre possa melhorar o desempenho térmico do betão, a sua presença pode causar uma maior fragilidade estrutural que se amplifica significativamente em condições de ciclos de gelo-degelo.

De forma geral, o estudo revela que o equilíbrio entre o teor de PCM livre e a resistência do betão é essencial em condições climáticas extremas. Estes resultados sugerem que, ao projetar e aplicar betão contendo PCM, é fundamental avaliar cuidadosamente a durabilidade do material, especialmente em ambientes sujeitos a ciclos de gelo-degelo, para garantir a estabilidade e a durabilidade da estrutura a longo prazo.

A Figura 7.9 mostra a variação do volume aparente do betão em diferentes ciclos de gelo-degelo. Os resultados indicam que, à medida que o teor de PCM livre aumenta, a perda de volume do betão também aumenta [203]. O betão de referência apresenta a maior taxa de redução de volume, sofrendo uma perda

volumétrica significativa ao longo dos ciclos de gelo-degelo. Após 80 ciclos, a diminuição do seu volume atinge aproximadamente 60%. Esse fenómeno é principalmente atribuído ao efeito repetitivo de gelo-degelo da água presente nos poros, o que promove a propagação de microfissuras, a degradação da estrutura porosa e o destacamento progressivo da matriz cimentícia, acelerando assim o processo de deterioração do betão e a sua redução volumétrica [229].

Com base nos resultados obtidos para a massa volúmica e resistência à compressão (Figura 7.2 e Figura 7.5), esta tendência pode ser explicada pelo efeito de expansão da água nos poros durante o ciclo de gelo-degelo [239]. Quando a temperatura é inferior ponto de congelamento, a água contida nos poros congela e expande, exercendo pressões internas sobre a matriz circundante, o que enfraquece a ligação entre a pasta de cimento e o PCM livre. Devido à distribuição do PCM livre dentro da matriz, sem formar uma interface firmemente aderida com a pasta de cimento, a integridade das zonas de interface é gradualmente comprometida ao longo dos ciclos repetidos de gelo-degelo, resultando na descamação da superfície e na perda de volume do betão. Esse efeito é mais pronunciado nos betões com maior teor de PCM livre incorporado, exacerbando o encolhimento volumétrico e a delaminação em camadas.

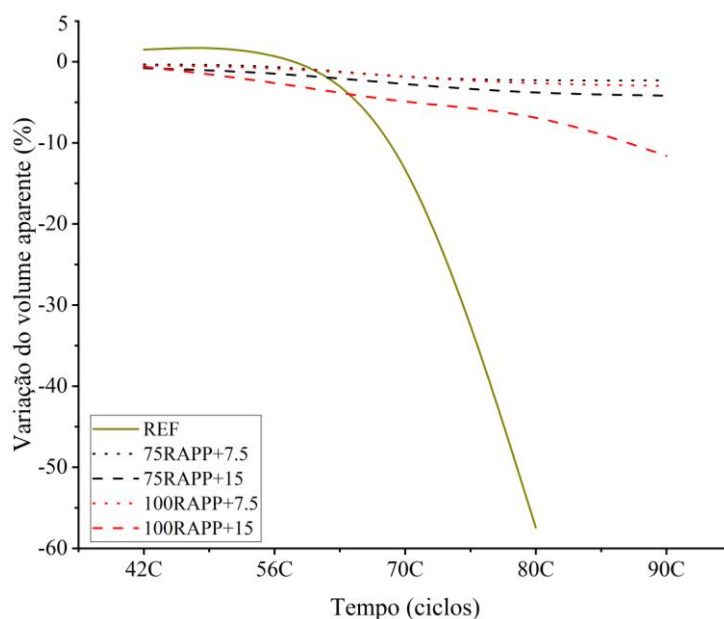


Figura 7.9 – Variação do volume aparente do betão sob ensaio de gelo-degelo.

Além disso, a presença de PCM livre pode alterar a microestrutura do betão, reduzindo sua massa volúmica e durabilidade. Durante os ciclos de gelo-degelo, os microporos podem atuar como vias para a entrada de água e expansão do gelo, o que acelera ainda mais a perda de volume do betão. Esses resultados destacam a importância do controle do teor de PCM livre para garantir que a melhoria das propriedades térmicas não comprometa significativamente o desempenho mecânico e a resistência ao

gelo-degelo do material. Em suma, estes resultados indicam que, ao projetar betões contendo PCM, é fundamental regular com precisão o teor de PCM livre e otimizar a sua compatibilidade com a matriz cimentícia. Em particular, a definição do conteúdo de PCM livre deve evitar efeitos adversos, como a redução da aderência interfacial, a deterioração da estrutura porosa e o aumento de defeitos microestruturais, fatores que podem comprometer a resistência mecânica do betão e acelerar a degradação da sua durabilidade, especialmente sob condições de exposição prolongada a ações ambientais. Portanto, o controlo adequado da incorporação de PCM é essencial para garantir que a melhoria das propriedades térmicas do betão não comprometa a sua integridade estrutural e durabilidade.

7.4.3. Sulfato de magnésio

A Figura 7.10 apresenta a variação da massa das amostras de betão submetidas a diferentes ciclos de imersão em solução de sulfato de magnésio. Os resultados experimentais indicam que, durante os primeiros 10 ciclos, as amostras de betão de referência apresentam um aumento inicial de massa. Este fenómeno pode ser atribuído à penetração inicial dos íons sulfato (SO_4^{2-}) e magnésio (Mg^{2+}) no interior do betão, onde interagem com os produtos de hidratação do cimento, formando compostos secundários, como gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e etringita ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$), tal como referido anteriormente. Esses produtos de degradação preenchem parcialmente os poros do betão, resultando em um leve aumento da massa das amostras. No entanto, esse efeito é transitório e, à medida que os ciclos de imersão progridem, a tendência de variação de massa invertida.

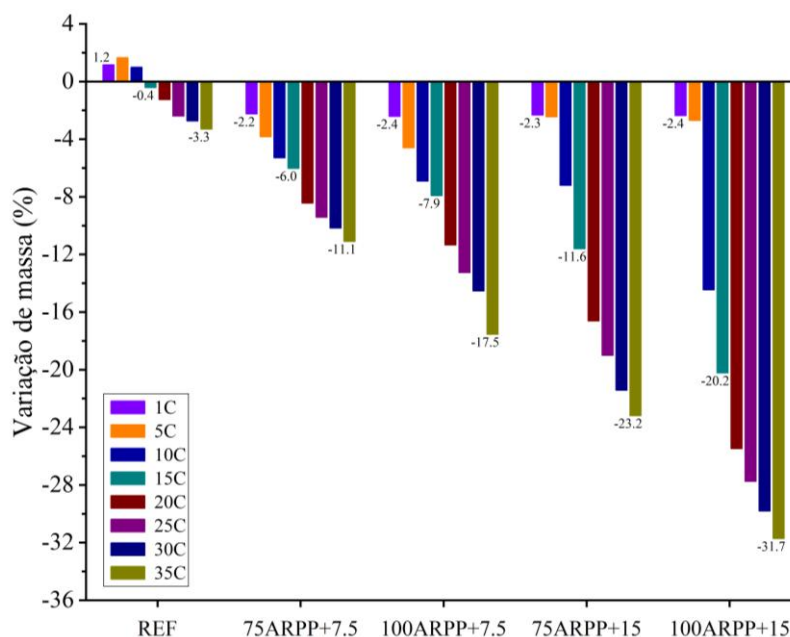


Figura 7.10 – Resultados de resistência a sulfato de magnésio do betão.

Por outro lado, as amostras de betão contendo PCM livre apresentam uma diminuição de massa já na primeira fase do ciclo, o que pode ser atribuído à perda de PCM na superfície das amostras durante a fase de secagem.

Após o 15 ciclo, observa-se uma redução da massa das amostras, indicando o início do processo de degradação do material. Em comparação com o betão de referência, nas amostras contendo 7.5% de PCM livre, os betões com incorporação de 75% e 100% ARPP apresentam uma perda de massa aproximadamente 14 vezes e 18 vezes maior, respetivamente. Para as amostras com 15% de PCM livre, as perdas de massa aumentam para cerca de 28 vezes e 49.5 vezes, respetivamente. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que, após múltiplos ciclos de secagem a altas temperaturas, o PCM presente na superfície das amostras migrar para o exterior. A remoção gradual do PCM reduz a capacidade do material em selar os poros, aumentando a permeabilidade do betão e permitindo uma maior penetração dos iões agressivos. Esse aumento na exposição favorece reações químicas entre os sulfatos, os iões magnésio e os compostos da matriz cimentícia, como o gel C-S-H e o Ca(OH)_2 , resultando na formação de produtos prejudiciais, como gesso e silicato de magnésio (M-S-H). Esses produtos de degradação comprometem a estabilidade estrutural do betão, resultando em aumento da porosidade, redução da resistência mecânica e consequente perda de massa.

Além disso, a gravidade da perda de massa está diretamente relacionada com o teor de PCM livre incorporado. Um maior teor de PCM livre resulta num aumento da quantidade de PCM presente na superfície das amostras, onde, durante os ensaios, uma parte significativa desse PCM não contido na microestrutura do betão pode ser perdida. Esse fenómeno leva a um aumento da porosidade superficial, criando caminhos preferenciais para a penetração de iões agressivos do meio externo. Como consequência, o processo de degradação do betão é acelerado, comprometendo ainda mais a sua durabilidade a longo prazo.

No 35 ciclo, os resultados experimentais confirmam essas tendências. As amostras de betão contendo PCM livre apresentam perdas de massa progressivamente maiores à medida que a quantidade de PCM aumenta. Esses achados indicam que, embora o ARPP contribua para melhorar a resistência do betão ao ataque por sulfatos, esse efeito benéfico depende diretamente do teor e da estabilidade do PCM incorporado. Em altas dosagens, o PCM pode comprometer a integridade estrutural do betão, reduzindo sua durabilidade ao longo do tempo. Portanto, o desenvolvimento de betões contendo PCM deve considerar cuidadosamente a dosagem e a estabilidade térmica do material para garantir um desempenho otimizado e minimizar os riscos de degradação prematura.

7.4.4. Carbonatação

A Figura 7.11 apresenta os resultados do teste de carbonatação após 120 dias, onde foi observada uma profundidade de carbonatação igual a zero em todas as amostras de betão. Esse resultado indica que a incorporação de uma quantidade substancial de PCM à base de parafina no betão conferiu uma resistência excecional à carbonatação. A profundidade de carbonatação zero sugere que, quando o PCM é adicionado em grandes quantidades, ele efetivamente impede a penetração de dióxido de carbono na matriz do betão. Este fenómeno pode ser explicado por vários fatores.

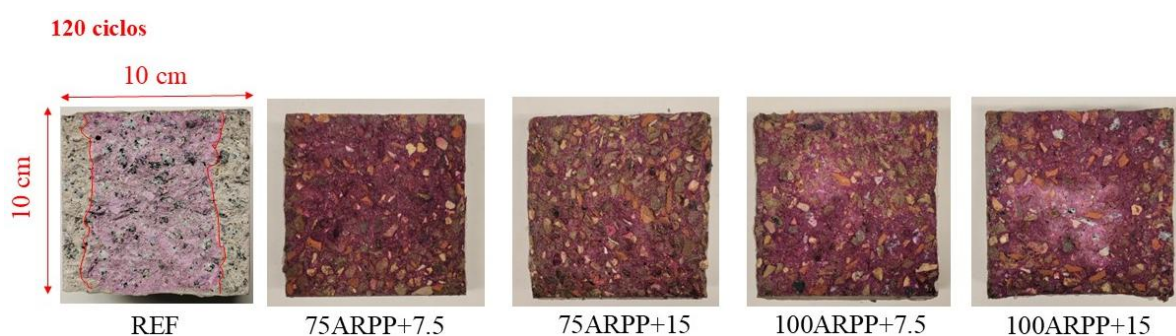


Figura 7.11 – Amostras do betão após 120 dias de carbonatação.

Primeiramente, o PCM, neste caso a parafina pura, possui propriedades de vedação que ajudam a preencher os poros microscópicos do betão, reduzindo os caminhos de difusão e, consequentemente, impedindo a penetração de dióxido de carbono. Assim, pode formar-se uma camada protetora densa na superfície do betão, impedindo a carbonatação (Figura 7.4). Além disso, a interação entre o PCM e a matriz cimentícia pode resultar na formação de uma camada mais densa e impermeável, o que aumenta ainda mais a resistência à carbonatação [282].

Esses resultados demonstram o potencial da utilização de PCM para melhorar a resistência à carbonatação do betão. A incorporação de PCM à base de parafina não apenas contribui para as propriedades térmicas e resistência ao gelo-degelo do betão, mas também oferece uma solução eficaz para mitigar os danos causados pela carbonatação. Esses resultados reforçam a viabilidade do uso de betão com PCM em aplicações que exigem maior durabilidade, especialmente em ambientes com altas concentrações de dióxido de carbono e em climas húmidos.

7.5. Comportamento térmico

Este capítulo foca no desempenho térmico do betão contendo 15% de PCM livre em comparação com o betão de referência. A avaliação do desempenho térmico foi realizada com base nas condições climáticas

típicas do norte de Portugal, analisando a resposta térmica das amostras sob as variações sazonais de temperatura nas estações de primavera, verão, outono e inverno. No entanto, quando a quantidade de PCM ultrapassa um determinado limite, pode haver impacto na estrutura interna do betão, resultando no aumento da porosidade e, conseqüentemente, na redução da capacidade de regulação térmica e no desempenho termodinâmico global do material.

Este estudo concentra-se no processo de mudança de fase do PCM em resposta às flutuações de temperatura externas, investigando seus mecanismos de armazenamento e libertação de calor para avaliar a sua contribuição do ponto de vista térmico. Os resultados demonstraram que o comportamento térmico do betão com incorporação de AR e PCM é influenciado pela interação entre esses dois componentes. Contudo, de forma geral, com o aumento da quantidade de PCM, a capacidade de regulação térmica do betão melhora significativamente. As seções seguintes irão analisar detalhadamente o desempenho térmico das composições REF, 75ARPP+15 e 100ARPP+15 ao longo das diferentes estações do ano.

7.5.1. Estação de Primavera

Considerando o impacto do teor de PCM no desempenho térmico do betão, a Figura 7.12 apresenta o comportamento térmico dos betões: betão referência (REF), betão com 75% agregado reciclado funcionalizado e 15% PCM livre (75ARPP+15) e betão com 100% agregado reciclado funcionalizado e 15% PCM livre (100ARPP+15) ao longo de quatro ciclos.

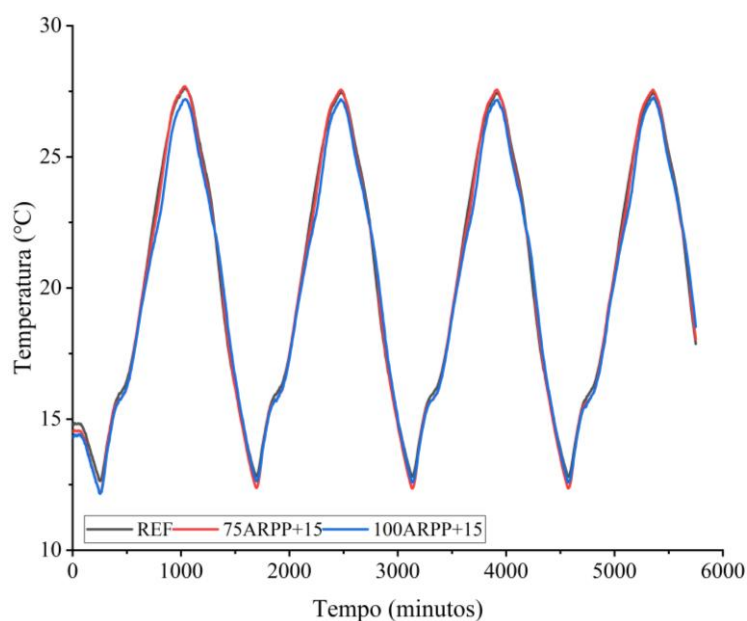


Figura 7.12 – Comportamento térmico de primavera dos betões.

Na Figura 7.12, observa-se que o betão com incorporação de 100% agregado reciclado funcionalizado e 15% PCM livre demonstrou uma capacidade de regulação térmica significativamente superior durante todo o ensaio. Comparado com os outros betões, as diferenças entre as temperaturas máximas e mínimas foram mais pronunciadas, o que indica que a combinação de um maior teor de PCM com os agregados reciclados potencializou o efeito de mudança de fase, tornando o betão mais eficiente na regulação térmica. No intervalo conforto (20 °C a 25 °C), a curva de temperatura do betão 100ARPP+15 apresentou um atraso, indicando que, nesse intervalo, o PCM absorveu o calor ambiente por meio da transição de fase sólido - líquido, inibindo o aumento rápido da temperatura na superfície do betão.

Na fase de arrefecimento (temperaturas superiores a 25°C), o betão 100ARPP+15 apresentou a menor temperatura máxima (Figura 7.13 (a)), sugerindo que esse betão teve o melhor desempenho na redução da temperatura máxima. Esse comportamento pode ser atribuído à absorção significativa de calor latente pelo PCM durante a sua transição de fase, o que reduz a eficiência da transferência de calor. Na fase de aquecimento (temperaturas inferiores a 20°C), o betão 100ARPP+15 apresentou a maior temperatura mínima em comparação com os outros betões (Figura 7.13 (b)). Este comportamento pode ser explicado pela libertação de calor latente do PCM após a transição de fase sólido-líquido, fornecendo calor adicional ao betão e retardando a queda de temperatura. O efeito de libertação de calor demonstra que o PCM não apenas amortece a entrada de calor em condições de elevadas temperaturas, mas também oferece compensação térmica em ambientes de baixa temperatura, melhorando significativamente a estabilidade térmica da estrutura.

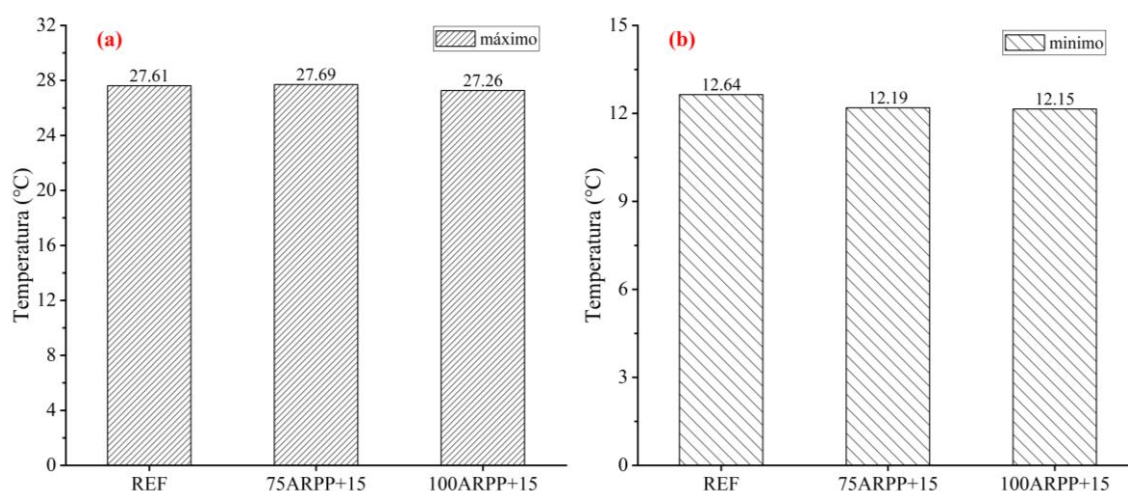


Figura 7.13 – Temperatura simulação de primavera a) temperatura máxima; b) temperatura mínima.

A Figura 7.14 apresenta o gradiente térmico, definido como a diferença entre a temperatura interna do betão contendo 15% de PCM livre e a temperatura interna do betão sem PCM livre, conforme calculado

pela expressão 7.1. Durante os ensaios, a variação do gradiente térmico foi influenciada pelo processo de acumulação e libertação de calor, refletindo o desempenho térmico do betão em termos de armazenamento e dissipação de energia térmica.

$$\Delta T = T_{\text{betão com PCM livre}} - T_{\text{betão referência}} \quad 7.1$$

No caso do betão contendo PCM livre, quando a diferença no gradiente térmico é maior (como mostrado na Figura 7.14), indica uma maior capacidade de regulação térmica do betão. Por outro lado, quando a curva do gradiente térmico apresenta menores diferenças, a capacidade de regulação térmica do material é inferior. Os resultados apresentados na Figura 7.14 mostram que o betão 100ARPP+15 exibe um maior gradiente térmico, indicando um melhor desempenho no que diz respeito à absorção e dissipação de calor o que pode ser justificado pelo fato do betão 100ARPP+15 apresentar uma distribuição mais densa de PCM, o que, juntamente com um maior teor de PCM, aumenta a capacidade do material em armazenar calor.

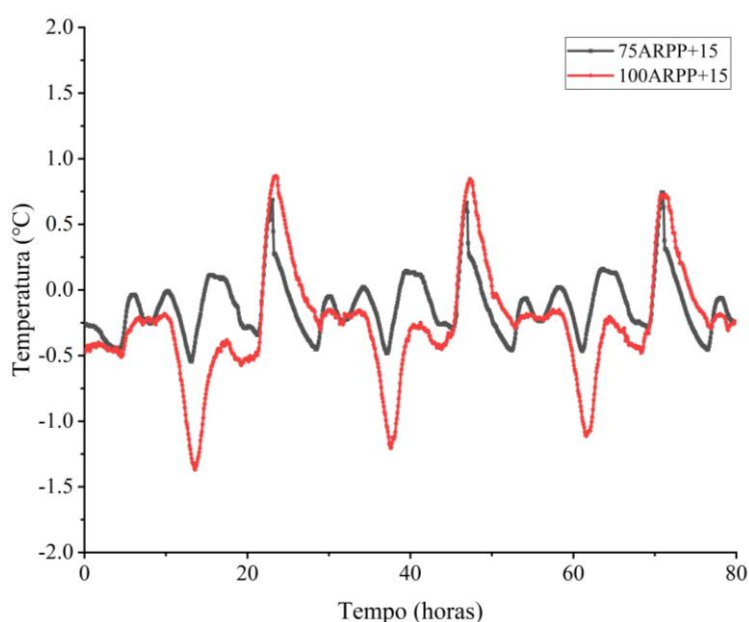


Figura 7.14 – Gradiente térmico simulação de primavera.

De acordo com a equação de quantificação das necessidades energéticas definida na seção 6.6.1, a Tabela 7.2 apresenta o consumo energético para a situação de aquecimento e arrefecimento em betões contendo 15% de PCM livre. Os resultados do estudo indicam que, ao adicionar 15% de PCM livre ao betão com 75% de ARPP, a necessidade de aquecimento diminuiu em 1.4%, enquanto a necessidade de arrefecimento foi reduzida em 6.1%. Para o betão com incorporação de 100% de ARPP, as necessidades de aquecimento e arrefecimento foram reduzidas em 0.7% e 19%, respetivamente. Estes resultados sugerem que o aumento do teor de PCM livre melhora a capacidade de libertação de calor do

betão, o que reduz eficazmente a quantidade de energia necessária para aquecer ou arrefecer o ambiente interno.

Tabela 7.2 – Necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento para a estação de primavera.

	Necessidades de aquecimento (J/m ³)	Necessidades de arrefecimento (J/m ³)
REF	253792.3	263098.6
75CP+15P	250166.4	246957.9
100CP+15P	251825.0	215771.4

A Tabela 7.3 quantifica a economia relativa de energia nos betões contendo PCM livre em comparação com o betão de referência. Desta forma, os resultados demonstram que os betões contendo PCM livre apresentaram uma economia de energia tanto para aquecimento quanto para arrefecimento, indicando que a adição de PCM otimiza as propriedades térmicas do material, resultando em um uso mais eficiente da energia. Isso não só contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também pode desempenhar um papel importante no design de edifícios de baixo consumo energético, fornecendo uma solução inovadora para a melhoria da eficiência térmica e redução dos custos energéticos na construção.

Tabela 7.3 – Poupança energéticas por dia na estação de primavera.

	Necessidades de aquecimento (J/m ³)	Necessidades de arrefecimento (J/m ³)
75CP+15P	3625.9 ↓	16140.7 ↓
100CP+15P	1967.3 ↓	47327.2 ↓

Nota: “↓” indica uma poupança de energia em relação ao betão de referência.

7.5.2. Estação de verão

A Figura 7.15 apresenta a resposta térmica do betão de referência e do betão contendo 15% de PCM livre sob condições de temperatura de verão. Os resultados indicam que as curvas de variação térmica dos diferentes betões exibem tendências globais semelhantes, com sobreposição em alguns períodos. No betão contendo PCM livre, observa-se um efeito de atraso térmico. Esse efeito é principalmente causado pela absorção e liberação de calor latente durante a transição de fase sólido-líquido do PCM. Devido ao calor armazenado e liberado durante esse processo, a taxa de aquecimento e resfriamento do betão é significativamente reduzida. Esse efeito de inércia térmica indica que o PCM, ao liberar e absorver calor de maneira gradual, pode efetivamente atenuar as oscilações térmicas, melhorando a estabilidade térmica do material e reduzindo o impacto das variações térmicas extremas na estrutura do betão [309].

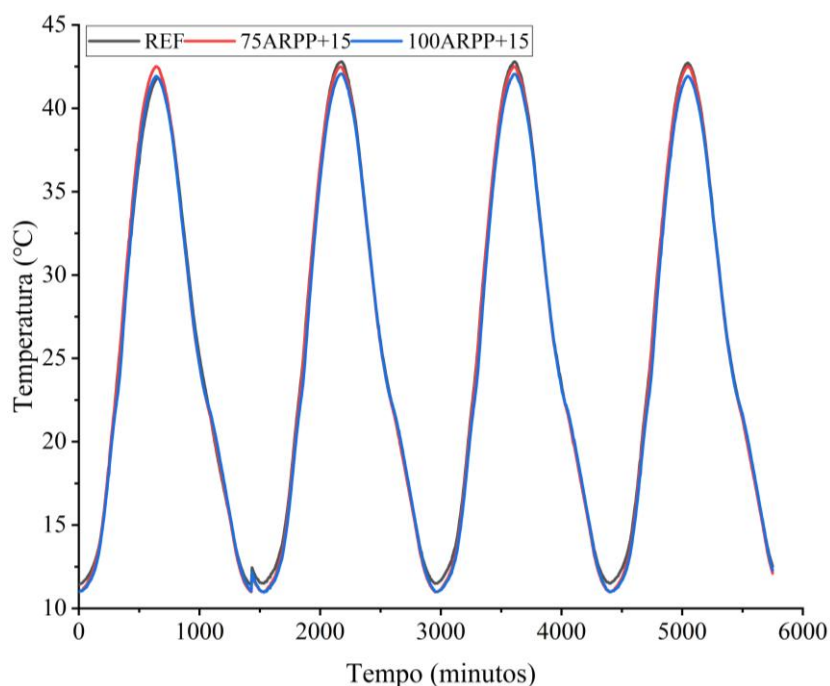


Figura 7.15 – Comportamento térmico de verão dos betões.

A Figura 7.16 analisa sistematicamente a resposta térmica de betões com diferentes composições sob condições de verão, considerando suas temperaturas máximas e mínimas. A Figura 7.16 (a) apresenta a variação da temperatura dos diferentes betões em condições de alta temperatura, demonstrando que, com o aumento do teor de PCM, a capacidade de regulação térmica do betão na situação de arrefecimento foi melhorada. Especificamente, em comparação com o betão de referência, o betão com incorporação de 75% de ARPP e 15% de PCM livre apresentou uma redução de aproximadamente 0.9% na temperatura máxima, enquanto o betão com incorporação de 100% de ARPP e 15% de PCM livre reduziu a temperatura máxima em cerca de 1.9%. Essa tendência indica que, à medida que a quantidade de PCM aumenta, a capacidade do betão de mitigar o impacto das altas temperaturas é reforçada, com o betão 100ARPP+15 apresentando o melhor desempenho de regulação térmica em condições de calor intenso.

A Figura 7.16 (b) explora a capacidade dos diferentes betões de estabilizar a temperatura sob condições de baixas temperaturas no verão. Os resultados mostram que, embora o betão 100ARPP+15 tenha demonstrado excelente desempenho na atenuação das temperaturas elevadas, sua capacidade de regulação térmica foi relativamente inferior em temperaturas mais baixas. Por outro lado, o betão 75ARPP+15 exibiu uma maior estabilidade térmica em condições de baixa temperatura, enquanto o betão de referência apresentou a melhor inércia térmica nesse cenário. Esse comportamento pode estar relacionado às características da transição de fase do PCM, que permite um armazenamento e libertação

eficientes de calor dentro de uma faixa específica de temperatura, mas apresenta menor eficácia quando a temperatura ambiente se encontra fora dessa faixa. Além disso, fatores como a estrutura porosa da matriz cimentícia, a condutividade térmica e a distribuição do PCM podem influenciar o desempenho térmico global [305]. Assim, a otimização do teor de PCM e da taxa de substituição por agregados reciclados pode permitir a maximização da capacidade de mitigação térmica do betão em condições de verão, equilibrando a eficiência térmica tanto em temperaturas elevadas quanto em baixas temperaturas, contribuindo para o desenvolvimento de betões funcionais mais sustentáveis e energeticamente eficientes.

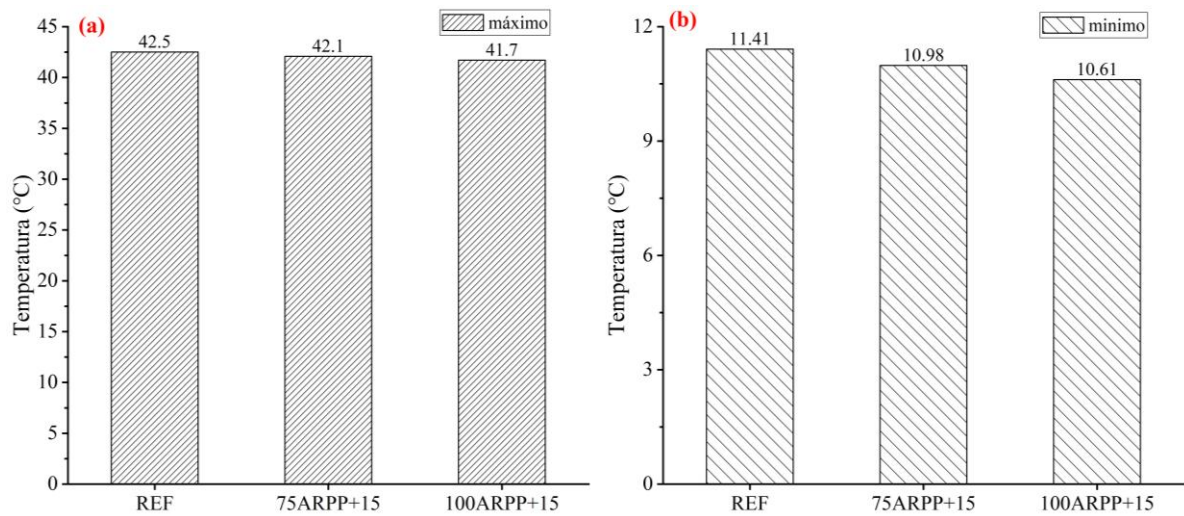


Figura 7.16 – Temperatura simulação de verão a) temperatura máximo; b) temperatura mínimo.

A Figura 7.17 apresenta a distribuição do gradiente térmico no betão contendo PCM livre. Os resultados demonstram que o betão 100ARPP+15 exibe um gradiente térmico relativamente elevado, indicando uma capacidade aprimorada de amortecimento térmico. Esse comportamento pode ser atribuído ao aumento do efeito de calor latente proporcionado pela maior quantidade de PCM incorporado. Especificamente, sob temperaturas elevadas, o PCM absorve uma quantidade significativa de calor durante a transição de fase, reduzindo o fluxo térmico e minimizando os picos de temperatura. Em temperaturas mais baixas, o PCM libera gradualmente o calor armazenado, evitando quedas bruscas de temperatura e promovendo uma resposta térmica mais estável do material. Esse mecanismo de regulação térmica é fundamental para melhorar a inércia térmica dos materiais de construção, contribuindo para a redução das oscilações térmicas diurnas, aumentando o conforto térmico interno e reduzindo a dependência de sistemas ativos de climatização, promovendo, assim, a eficiência energética global das edificações.

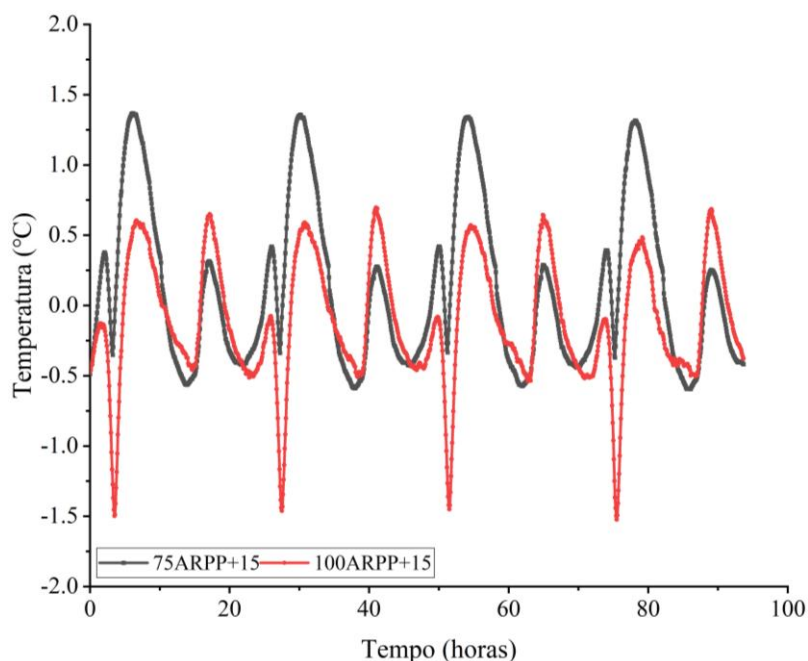


Figura 7.17 – Gradiente térmico simulação de verão.

A Tabela 7.4 apresenta as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento das diferentes composições de betão. Os resultados do estudo indicam que a incorporação de 15% de PCM livre levou a uma redução na necessidade de energia para ambos os processos, evidenciando que o efeito do calor latente do PCM contribui significativamente para a capacidade de armazenamento térmico do betão. Em comparação com o betão de referência, a incorporação de 15% de PCM livre nos betões contendo 75% de ARPP resultou numa redução de aproximadamente 1.8% nas necessidades de aquecimento e 2.1% nas necessidades de arrefecimento. Para o betão com incorporação de 100% de ARPP, os valores de redução foram ainda mais expressivos, atingindo cerca de 2.6% na situação de aquecimento e 4.5% na situação de arrefecimento. Esses resultados demonstram que a introdução de PCM não apenas aumenta a capacidade térmica do betão, mas também atua como um regulador térmico eficaz, reduzindo a necessidade de energia para manter as condições térmicas internas estáveis.

Tabela 7.4 – Necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento para a estação de verão.

	Necessidades de aquecimento (J/m³)	Necessidades de arrefecimento (J/m³)
REF	252083.6	270567.0
75ARPP+15	248092.4	264960.1
100ARPP+15	245928.8	258822.2

A Tabela 7.5 quantifica com maior precisão o impacto da incorporação de PCM na eficiência energética do betão. Os resultados evidenciam que, sob condições de verão, a introdução de PCM livre melhora

significativamente a capacidade de regulação térmica do material. Esse efeito é atribuído à sua capacidade de armazenar calor em temperaturas elevadas e libertá-lo gradualmente à medida que a temperatura diminui, o que reduz a carga térmica do edifício, minimizando tanto o consumo de energia para aquecimento e arrefecimento. Esse comportamento confirma que uma proporção otimizada de PCM pode aumentar a inércia térmica do betão, reduzindo as oscilações de temperatura interna e melhorando a eficiência energética geral do edifício. Assim, a distribuição adequada do PCM dentro da matriz cimentícia é fundamental para maximizar seus benefícios térmicos, promovendo o desempenho energético sustentável das construções.

Tabela 7.5 – Poupança energéticas por dia na estação de verão.

	Necessidades de aquecimento (J/m ³)		Necessidades de arrefecimento (J/m ³)	
75CP+15P	3991.2	↓	5606.9	↓
100CP+15P	6154.8	↓	11744.8	↓

Nota: “↓” indica uma poupança de energia em relação ao betão de referência.

7.5.3. Estação de outono

Figura 7.18 apresenta o desempenho térmico do betão de referência e do betão com incorporação de 15% de PCM livre numa situação de outono.

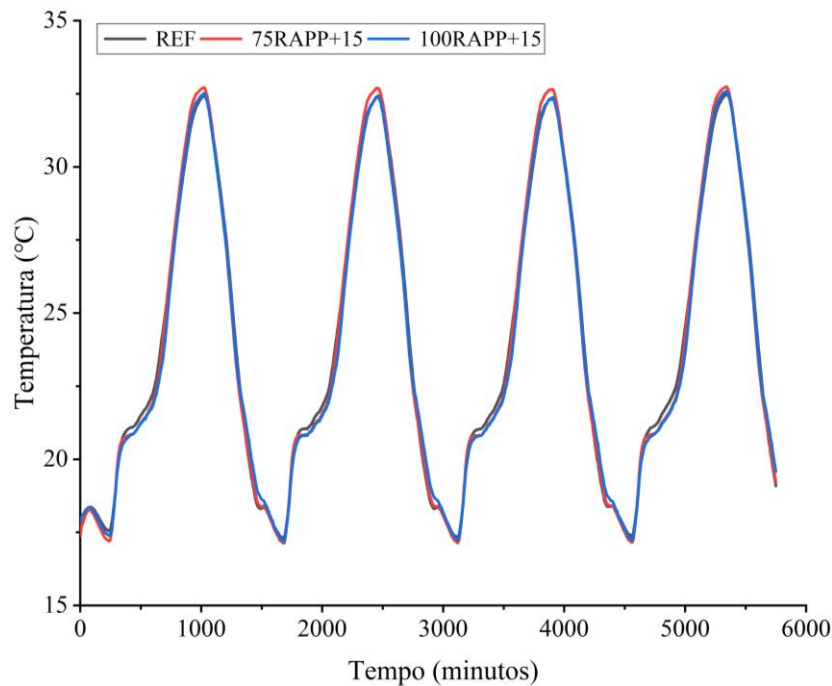


Figura 7.18 – Comportamento térmico de outono dos betões.

Na Figura 7.18, os resultados demonstram que a curva de variação térmica do betão com PCM livre exibe um efeito significativo de atraso térmico. Esse fenómeno indica que, durante o processo de mudança de fase, o PCM absorve e liberta calor latente, melhorando a capacidade de amortecimento térmico do betão e reduzindo as flutuações bruscas de temperatura. Como consequência, a presença do PCM contribui para a regulação das oscilações térmicas no ambiente interno, promovendo maior conforto térmico em edifícios. Esse efeito está diretamente relacionado à faixa de temperatura de transição de fase do PCM, uma vez que, dentro desse intervalo, o material pode regular eficientemente o fluxo térmico, reduzindo a propagação de ondas térmicas transitórias.

Relativamente à capacidade de regulação de temperaturas extremas, a Figura 7.19 (a) indica que a temperatura máxima do betão de referência e do betão com PCM livre não apresenta diferenças significativas. Comparação com betão de referência, a temperatura do betão com incorporação de 75% de ARPP e 15% de PCM livre aumentou 0.5%, e do betão com incorporação de 100% de ARPP e 15% de PCM livre diminuiu 0.3%. Isso sugere que, sob as condições climáticas de outono, a absorção de calor latente pelo PCM não foi suficiente para reduzir substancialmente o pico térmico do material. Essa limitação pode estar associada ao facto de que, sob temperaturas elevadas, o PCM pode ter atingido completamente seu estado fundido, tornando-se incapaz de armazenar calor adicional e, consequentemente, de atenuar de forma eficaz os picos térmicos.

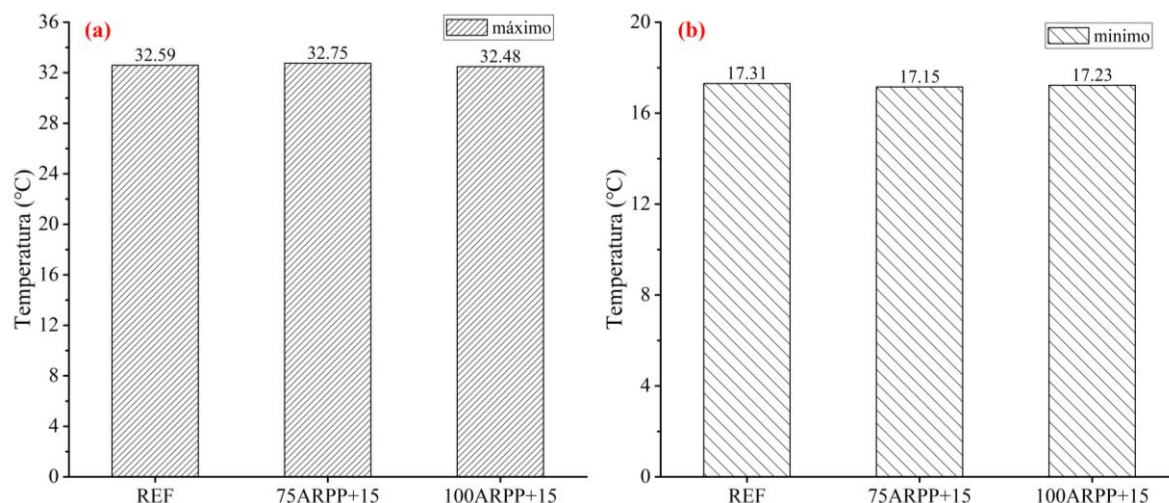


Figura 7.19 – Temperatura simulação de outono a) temperatura máxima; b) temperatura mínima.

Por outro lado, a Figura 7.19 (b) revela que, sob temperaturas mínimas, as temperaturas do betão com PCM livre e do betão de referência são bastante próximas. Comparação com betão de referência, a temperatura do betão com incorporação de 75% de ARPP e 15% de PCM livre e do betão com incorporação de 100% de ARPP e 15% de PCM livre diminuiu 0.9% e 0.4%, respetivamente. Esse

comportamento sugere que, durante a fase de libertação de calor, a taxa de transferência térmica do PCM pode não ser suficientemente rápida para fornecer um amortecimento térmico significativo, o que pode estar relacionado à condutividade térmica do PCM, à sua distribuição na matriz cimentícia e às propriedades térmicas globais do betão. Além disso, a libertação do calor armazenado pelo PCM pode ocorrer de forma gradual, enquanto a queda da temperatura ambiente ocorre rapidamente, limitando a eficácia do material na regulação de temperaturas noturnas.

A Figura 7.20 mostra a distribuição do gradiente térmico do betão ao longo do tempo sob condições de temperatura outonal, analisando mais detalhadamente o impacto do PCM livre no desempenho térmico do betão. O gradiente térmico é um indicador importante da capacidade de regulação térmica do material, definido como a diferença de temperatura entre o betão de referência e o betão com incorporação de agregado reciclado funcionalizado e PCM livre. Gradientes térmicos mais elevados indicam que o material é capaz de armazenar de forma eficaz a energia térmica ambiental durante o dia e liberá-la gradualmente durante a noite, otimizando assim as flutuações de temperatura diurnas e noturnas, melhorando a estabilidade térmica.

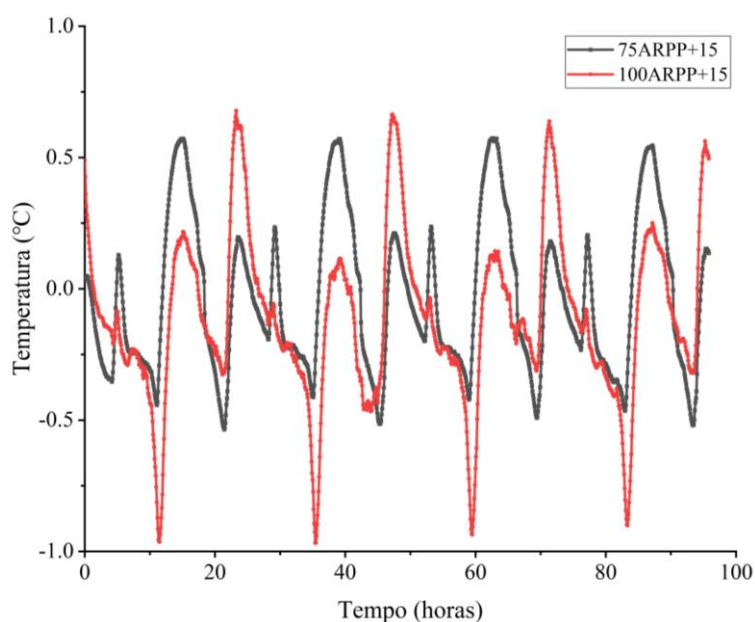


Figura 7.20 – Gradiente térmico simulação de outono.

Os resultados indicam que o betão com incorporação de 100% de ARPP e 15% PCM livre continua a apresentar os maiores gradientes térmicos, confirmando a sua capacidade superior de armazenamento e libertação de calor. Um gradiente térmico mais elevado sugere que o material pode armazenar uma maior quantidade de energia térmica durante o dia e libertá-la progressivamente durante a noite, contribuindo para a estabilidade térmica ao longo do ciclo diário. Durante o período diurno, o PCM

absorve calor e passa pelo processo de mudança de fase, reduzindo o aumento abrupto da temperatura interna do betão. À noite, o calor armazenado é gradualmente libertado, retardando a queda da temperatura e proporcionando um melhor equilíbrio térmico. Esse comportamento reforça o potencial da incorporação de PCM em betões contendo agregados reciclados para a melhoria do desempenho térmico do material. No entanto, a presença excessiva de PCM livre pode alterar a estrutura porosa do betão, afetando os caminhos de condução térmica e, em alguns casos, reduzindo a eficiência do processo de transferência de calor. Assim, é essencial otimizar a dosagem de PCM para garantir um desempenho térmico eficiente em diferentes condições ambientais.

A Tabela 7.6 apresenta as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento dos betões sob condições de outono. Os resultados indicam que a incorporação de 15% de PCM livre pode reduzir significativamente o consumo energético. No betão contendo 75% de ARPP, as necessidades de aquecimento e arrefecimento diminuíram cerca de 2.7% e 2.6%, respetivamente. No betão contendo 100% de ARPP, essas reduções foram ainda mais expressivas, atingindo aproximadamente 5.6% e 5.4%. Esses achados demonstram que um teor mais elevado de PCM pode melhorar a capacidade de regulação térmica do betão ao armazenar e redistribuir calor de forma mais eficaz, reduzindo a dependência de sistemas mecânicos de climatização. A economia energética associada à presença de PCM sugere que sua incorporação pode contribuir para a eficiência energética de edifícios, reduzindo os custos operacionais de aquecimento e arrefecimento. No entanto, a eficácia do PCM depende de sua capacidade térmica, da faixa de temperatura de transição de fase e da sua distribuição homogênea na matriz do betão [109]. Quantidades excessivas de PCM podem comprometer a integridade estrutural do material e alterar suas propriedades térmicas, limitando os benefícios esperados [92]. Assim, a otimização da dosagem de PCM e a seleção de sua faixa de temperatura de fusão são fatores críticos para garantir sua aplicação eficiente em betões de alto desempenho.

Tabela 7.6 – Necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento para a estação de outono.

	Necessidades de aquecimento (J/m³)	Necessidades de arrefecimento (J/m³)
REF	255794.6	265731.2
75ARPP+15	248934.9	258866.1
100ARPP+15	241343.3	251446.4

A Tabela 7.7 apresenta a economia diária de energia dos betões contendo 15% de PCM livre em comparação com o betão de referência sob condições de temperatura do outono. Os resultados indicam

que o impacto do PCM não é uniforme em todas as composições, sendo altamente dependente da sua dosagem, da interação com os materiais constituintes do betão e das variações ambientais sazonais. Essa variação reforça a importância de um controlo preciso da formulação do betão com PCM para assegurar que o material possa desempenhar um papel eficiente na regulação térmica ao longo do ano. Como a eficiência do PCM está diretamente relacionada às condições climáticas, sua incorporação deve considerar fatores como a amplitude térmica do local de aplicação, a capacidade térmica da envolvente do edifício e a compatibilidade das propriedades térmicas do betão com as características do PCM. Uma formulação inadequada pode resultar na redução da eficácia térmica ou até mesmo no aumento do consumo energético.

Em síntese, a incorporação de PCM pode melhorar significativamente a capacidade de amortecimento térmico do betão, contribuindo para a redução do consumo energético e para o aumento do conforto térmico em edifícios. No entanto, a sua eficácia depende da dosagem adequada, da distribuição homogênea na matriz cimentícia e da interação com os agregados reciclados. O uso excessivo de PCM pode comprometer a condutividade térmica do betão e alterar suas propriedades mecânicas, limitando sua eficiência térmica. Assim, para maximizar os benefícios térmicos e energéticos, é essencial equilibrar cuidadosamente a quantidade de PCM incorporado, sua forma de incorporação e sua interação com os demais constituintes do betão [50].

Tabela 7.7 – Poupança energéticas por dia na estação de outono.

	Necessidades de aquecimento (J/m³)		Necessidades de arrefecimento (J/m³)	
75ARPP+15	6859.7	↓	6865.1	↓
100ARPP+15	14451.3	↓	14284.8	↓

Nota: “↓” indica uma poupança de energia em relação ao betão de referência.

7.5.4. Estação de inverno

Como o PCM só pode armazenar e liberar calor latente de forma eficaz após atingir sua temperatura de transição (22 °C), e o intervalo de temperatura simulado nas condições de inverno varia de 3 °C a 22 °C, isso compromete significativamente sua capacidade de regulação térmica. Consequentemente, os resultados experimentais em condições inverniais concentram-se na avaliação da resposta térmica do betão dentro desse intervalo de temperatura, bem como na análise das variações térmicas associadas.

Como mostrado na Figura 7.21, todos os betões contendo PCM mantiveram suas temperaturas internas

consistentemente abaixo dos limites de conforto térmico durante todo o teste. Este comportamento comprova uma vez mais, que tal como referido anteriormente, devido à temperatura do teste não ter alcançado o ponto de fusão do PCM e ao aquecimento contínuo não ter permitido a acumulação suficiente de calor, o PCM não conseguiu desempenhar seu papel na regulação térmica, limitando a sua eficácia nas condições de inverno.

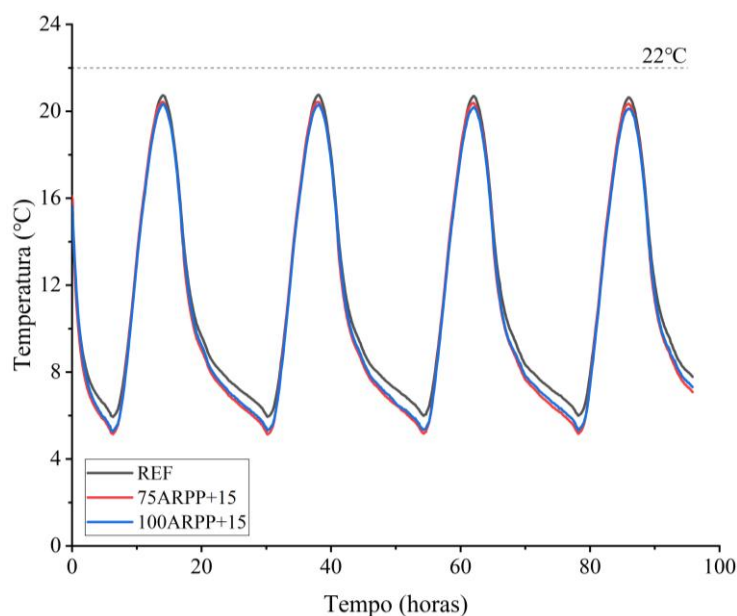


Figura 7.21 – Comportamento térmico de inverno dos betões.

Durante os ciclos de aquecimento e arrefecimento, o betão com incorporação de 100% de ARPP e 15% de PCM livre demonstrou capacidade de regulação térmica em altas temperaturas. Especificamente, mesmo sob condições térmicas elevadas, a temperatura interna do betão permaneceu relativamente baixa, indicando que as propriedades de mudança de fase do PCM continuaram a desempenhar um papel essencial no armazenamento e na libertação de calor latente, contribuindo para a atenuação das variações térmicas e a otimização do desempenho térmico. No entanto, como a temperatura ambiente não atingiu o limiar ideal para a transição de fase do PCM, esse efeito não pôde ser plenamente maximizado. Além disso, sob as condições simuladas de inverno, o betão com incorporação de 15% de PCM livre não apresentou um desempenho térmico significativamente superior, sugerindo que, em ambientes de baixa temperatura, o aumento da quantidade de PCM tem um impacto limitado na melhoria da capacidade de armazenamento e libertação de calor, restringindo assim a eficácia geral da regulação térmica do betão.

Embora o PCM tenha o potencial de regular o ambiente térmico em condições específicas, sua eficácia nas faixas de temperatura de inverno foi limitada por não atingir a temperatura de transição e pela

quantidade elevada de PCM não ter melhorado significativamente o comportamento térmico do betão.

7.5.5. Análise de custo

Nesta seção, é analisado o custo-benefício energético gerado pela adição de 15% de PCM livre ao betão. Através dos cálculos preliminares das necessidades de aquecimento e arrefecimento dos betões contendo 15% de PCM livre e do betão de referência (conforme apresentado nas Tabelas 7.3, 7.5 e 7.7), foi possível determinar o consumo energético associado a essas diferentes formulações de betão. Em seguida, a poupança mensal foi calculada com base na expressão 6.6 e 6.7, conforme mostrado na Tabela 7.8.

Tabela 7.8 – Poupanças de climatização mensais (J/m³).

Composições	Primavera	Verão	Outono
75ARPP+15	592998.0 ↓	287943.0 ↓	411744.0 ↓
100ARPP+15	1478835.0 ↓	536988.0 ↓	862083.0 ↓

Nota: “↓” indica uma poupança de climatização mensais em relação ao betão de referência.

Subsequentemente, foi calculado o consumo mensal médio de energia para as diferentes formulações de betão em cada estação do ano, expresso em quilowatt-hora por metro cúbico (kWh/m³), de acordo com a expressão 6.8. Tabela 7.9 mostra as poupanças de climatização mensais (kWh/m³).

Tabela 7.9 – Poupanças de climatização mensais (kWh/m³).

Composições	Primavera	Verão	Outono
75ARPP+15	0.164773 ↓	0.080009 ↓	0.114409 ↓
100ARPP+15	0.410915 ↓	0.149210 ↓	0.239542 ↓

Nota: “↓” indica uma poupança de climatização mensais em relação ao betão de referência.

De acordo com a expressão 6.9, foram calculadas as poupanças de climatização anuais (kWh/m³), apresentadas na Tabela 7.10.

Tabela 7.10 – Poupanças de climatização anual (kWh/m³).

Composições	P_{NCA} (kWh/m³)
75ARPP+15	1.08 ↓
100ARPP+15	2.40 ↓

Nota: “↓” indica uma poupança de climatização anual em relação ao betão de referência.

Tabela 7.11 mostra a poupança monetária anual associada aos betões com PCM livre (1 kWh = 0.196 euro [307]). Comparação com a poupança monetária anual do betão com incorporação de 75% de ARPP e 15% PCM livre, a poupança de monetária anual do betão 100ARPP+15 diminui 122.7%. Isso indica que a incorporação de 15% de PCM livre no betão contendo 100% de ARPP pode melhorar significativamente a eficiência energética e reduzir o consumo operacional, resultando em uma maior viabilidade económica. Esse resultado reforça ainda mais o impacto positivo de uma configuração otimizada com maior teor de PCM na melhoria do desempenho térmico e da eficiência energética do betão, destacando a importância de um projeto adequado da dosagem de PCM para alcançar a sustentabilidade energética e a viabilidade económica dos edifícios.

Tabela 7.11 – Poupança monetária anual (€/m³).

Composições	Poupança monetária anual (€/m³)
75ARPP+15	0.211 ↓
100ARPP+15	0.470 ↓

Nota: “↓” indica uma poupança monetária anual em relação ao betão de referência.

A análise quantifica o consumo energético e o custo diário associados ao uso de ar condicionado para manter a temperatura interna de um edifício típico em Portugal (110 m², com 2.7 m de altura) dentro da faixa de conforto em diferentes estações. De acordo com os dados da Tabela 7.11, quando são os betões com incorporação de 75% e 100% de agregados reciclados funcionalizados e 15% de PCM livre, os custos anuais de funcionamento do ar condicionado diminuem aproximadamente 62.67 euros e 139.59 euros, respetivamente. Essa economia é principalmente atribuída à capacidade do PCM de armazenar e liberar calor por meio de sua mudança de fase, bem como à otimização do desempenho térmico do betão com agregados reciclados funcionalizados, resultando em uma melhoria na eficiência energética da envolvente do edifício e uma redução no consumo de energia.

CAPÍTULO

8. CONCLUSÃO

8.1. Considerações finais

Este estudo investigou de forma sistemática os efeitos da modificação de AR por meio da absorção de PCM e sua incorporação em betão, avaliando suas propriedades físicas, mecânicas, térmicas e durabilidade. Além disso, também foram analisadas as influências da adição direta de 7.5% e 15% de PCM livre nas propriedades do betão. Os resultados experimentais demonstram que a combinação de agregados reciclados com PCM pode melhorar significativamente a capacidade de regulação térmica do betão, aumentar sua durabilidade e reduzir a dependência de fontes de energia não renováveis, conferindo grande potencial para aplicações em engenharia. Do ponto de vista da durabilidade, o betão com agregados reciclados modificados apresentou melhor resistência à penetração de cloretos, ciclos de gelo-degelo, ataque por sulfato de magnésio e carbonatação, contribuindo para o desenvolvimento de materiais de construção sustentáveis.

Comparação entre Processos de Funcionalização dos Agregados Reciclados

Foram comparados dois métodos de absorção de PCM nos AR: i) sob vácuo; ii) sob pressão atmosférica. Os resultados indicaram que, após 4 horas de absorção sob vácuo, a quantidade de PCM incorporada foi significativamente a mesma em relação ao processo realizado sob pressão atmosférica. No entanto, devido ao elevado consumo energético dos equipamentos sob vácuo e à maior complexidade operacional no processo produtivo, optou-se pelo método de absorção sob pressão atmosférica durante 4 horas. Para garantir uma distribuição homogênea do PCM na superfície dos agregados, foi necessário misturá-los a cada 15 minutos, minimizando os efeitos de aglomeração entre partículas. De forma a finalizar, gostaria de destacar que o método adotado é simples, económico e fácil de aplicar em escala industrial. Este aspeto torna-o particularmente valioso, pois, além de ser eficiente, alinha-se diretamente com as práticas da construção civil, oferecendo uma solução acessível para a indústria de materiais de construção, especialmente no contexto da produção de betão pré-fabricado. A aplicação deste método pode proporcionar benefícios significativos para a produção em larga escala, otimizando os custos e melhorando a eficiência térmica dos materiais, sem a necessidade de processos complexos ou onerosos, o que é crucial para a viabilidade económica na indústria de construção.

Betão com AR aditivado com PCM

Propriedades físicas. A irregularidade na superfície dos agregados reciclados aumentou a necessidade de água no processo de mistura. Sobre o betão endurecido, o betão com 100% de agregados reciclados funcionalizados apresentou uma redução de até 70% na absorção de água por capilaridade em

comparação com o betão contendo 100% de AR. Este comportamento indica que o tratamento funcionalizado do AR reduz significativamente a microporosidade do betão. Embora a camada de parafina sobre a superfície do AR aumente a necessidade de água no processo de mistura, sua presença na matriz endurecida contribui para a redução da porosidade total e para o aumento da compacidade do betão. Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (SEM) confirmam que os AR apresentam maior poros, enquanto os ARPP demonstram um preenchimento mais eficiente dos vazios devido à migração da parafina durante a transição de fase, otimizando a estrutura interna do betão.

Propriedades mecânicas. Com o aumento da substituição de agregados naturais por AR, observou-se uma redução progressiva na resistência à compressão do betão, principalmente devido ao aumento da formação de fissuras na zona de transição interfacial (ITZ). No entanto, o betão contendo ARPP apresentou uma diminuição significativamente menor na resistência à compressão, sugerindo que a qualidade dos AR é um fator determinante para o desempenho mecânico do betão. Além disso, a resistência à flexão seguiu uma tendência semelhante, corroborando que o tratamento funcionalizado do agregado reciclado pode mitigar os efeitos negativos dos AR não tratados nas propriedades mecânicas do betão. Em temperaturas elevadas (200 °C), a resistência à compressão do betão com AR apresentou uma ligeira melhoria, enquanto o betão contendo ARPP demonstrou uma redução na resistência à compressão, atribuída à evaporação do PCM (150 °C), gerando um aumento da porosidade interna e, consequentemente, uma maior degradação mecânica.

Durabilidade. Os RA possuem maior absorção de água em comparação aos agregados naturais, aumentando a quantidade de poros interconectados no betão e facilitando a penetração de iões agressivos. Os testes de durabilidade indicaram que a incorporação de AR reduziu a resistência à penetração de cloretos, a resistência ao sulfato de magnésio e aumentou a sensibilidade à carbonatação. No entanto, o uso de ARPP melhorou significativamente o desempenho do betão em relação à durabilidade. A parafina preencheu os poros dos AR e, durante a absorção de calor e transição de fase (sólido-líquido), o PCM migra para os poros circundantes na matriz cimentícia, bloqueando a entrada de agentes agressivos. Este comportamento resultou em melhorias significativas na resistência à penetração de cloretos, maior resistência aos ciclos de gelo-degelo e uma proteção mais eficaz contra a carbonatação.

Comportamento térmico. Os resultados indicaram que o betão com incorporação de 100% de ARPP apresentou a melhor capacidade de regulação térmica, devido à elevada capacidade de armazenamento de calor latente do PCM e à distribuição otimizada dos agregados reciclados. No entanto, quando a

proporção de ARPP foi reduzida para 75%, o desempenho térmico foi inferior ao do betão com 75% de AR. Esse fenómeno pode ser explicado pelo efeito isolante gerado pela elevada porosidade dos AR, que acaba reduzindo a capacidade de armazenamento térmico do PCM de baixa dosagem. Esse mesmo efeito foi evidenciado na comparação entre betões com 100% e 75% de AR, onde o betão com maior proporção de AR apresentou um melhor desempenho térmico.

Perspetivas para aplicações em engenharia. Os resultados deste estudo demonstraram que os ARPP podem ser incorporados com sucesso em betões, proporcionando melhorias na regulação térmica e na durabilidade, além de minimizar os impactos negativos dos AR sobre as propriedades mecânicas. Especialmente no que diz respeito à durabilidade, o betão com maior quantidade de agregados reciclados funcionalizados demonstrou melhor resistência à penetração de iões cloreto, resistência a ciclos de gelo-degelo, resistência ao ataque de sulfato de magnésio e obteve completa resistência à carbonatação. Pesquisas futuras podem explorar técnicas de encapsulamento e outras técnicas de incorporação do PCM para aumentar sua estabilidade no betão, bem como avaliar a aplicabilidade de PCM com diferentes faixas de temperatura de transição para atender às necessidades das diferentes condições climáticas. De maneira geral, o desenvolvimento e aplicação de ARPP representam uma solução viável para a produção de betão sustentável, promovendo maior eficiência energética e redução do impacto ambiental na construção civil.

Betão com AR aditivado com PCM e PCM livre

Este estudo avaliou o impacto do aumento do teor de PCM livre no desempenho térmico do betão. Para maximizar a incorporação de PCM, foram adotadas duas abordagens: estabilização e incorporação direta. Nesse contexto, foram formuladas quatro novas misturas de betão, utilizando 75% e 100% de ARPP como base, com a adição de 7.5% e 15% de PCM livre. A pesquisa avaliou sistematicamente as propriedades físicas, mecânicas, durabilidade e o comportamento térmico desses betões, visando explorar o potencial de otimização do material.

Propriedades físicas. Os resultados indicaram que, para misturas com o mesmo teor de ARPP, o aumento da fração de PCM livre resultou em um aumento significativo da trabalhabilidade do betão fresco (maior abaixamento), uma redução da densidade e um aumento na absorção de água por imersão. Estes resultados sugerem que a presença de PCM livre influencia fortemente a reologia do betão. Além disso, devido à sua menor densidade, o PCM contribuiu para a formação de betão leve. No entanto, durante o processo de secagem, verificou-se que parte do PCM livre pode ter sido perdido da superfície do betão

devido à ação da gravidade, comprometendo a integridade da matriz de pasta de cimento superficial e impactando negativamente a durabilidade do material.

Propriedades mecânicas. Em termos de resistência à compressão, observou-se que a incorporação de PCM livre reduziu a resistência à compressão do betão, mesmo para misturas com o mesmo teor de ARPP. A análise da microestrutura revelou uma distribuição densa de PCM livre dentro da matriz cimentícia, o que restringiu a hidratação do cimento ao reduzir a superfície de contato entre as partículas de cimento e a água. Esse efeito prejudicial à hidratação do cimento destaca a importância de uma proporção otimizada de PCM livre para garantir a integridade estrutural do betão e minimizar perdas na resistência mecânica.

Durabilidade. Os ensaios de durabilidade demonstraram que o aumento do teor de PCM livre melhorou significativamente a resistência do betão à migração de íons cloreto. No betão 100ARPP+15P, o coeficiente de difusão de cloretos foi reduzido em 18.5%, evidenciando um efeito positivo do PCM na redução da permeabilidade ao cloreto. Contudo, a resistência do betão aos ciclos de gelo-degelo foi negativamente afetada pelo alto teor de PCM livre, pois a estrutura da matriz cimentícia tornou-se mais frágil. Além disso, nos ensaios de resistência ao ataque por sulfato de magnésio, verificou-se que betões com maior teor de PCM livre apresentaram menor resistência à degradação por sulfatos. Esse comportamento pode ser atribuído à perda de PCM da superfície do betão durante ciclos de secagem a alta temperatura (105 °C), o que aumentou a porosidade e facilitou a penetração da solução de sulfato de magnésio na matriz cimentícia. Por outro lado, todas as amostras de betão demonstraram total resistência à carbonatação, devido à formação de uma camada densa de PCM (parafina) na superfície, impedindo a difusão de dióxido de carbono e contribuindo para a durabilidade do material.

Comportamento térmico. A análise do desempenho térmico revelou que a incorporação de PCM livre melhorou a eficiência térmica do betão. A análise microestrutural mostrou que a incorporação de 15% de PCM livre aumentou efetivamente a cobertura de PCM dentro do betão, o que resultou em uma maior capacidade de armazenamento térmico do material. Assim, o betão 100ARPP+15 demonstrou desempenho térmico e viabilidade econômica superiores ao betão 75ARPP+15, evidenciando que a introdução de PCM livre em betões com maior teor de agregado reciclado pode ser uma estratégia viável para construções sustentáveis.

Este estudo destaca o potencial da incorporação de PCM no betão para aprimorar suas propriedades e promover a sustentabilidade dos materiais de construção. No entanto, os resultados evidenciam que a

dosagem do PCM deve ser cuidadosamente otimizada para equilibrar as propriedades físicas, mecânicas, durabilidade e comportamento térmico, evitando efeitos adversos, como a redução da resistência mecânica ou a perda de durabilidade. Assim, um projeto adequado do teor e da distribuição do PCM no betão é essencial para garantir sua aplicação eficiente em projetos de engenharia civil, contribuindo para o desenvolvimento de materiais de construção energeticamente mais eficientes e duráveis.

Com base na análise deste estudo, o betão com 100% de ARPP demonstrou um desempenho superior em termos de propriedades físicas, durabilidade e comportamento térmico. Sua menor massa volúmica contribui para a leveza do material, enquanto sua resistência à penetração de íões cloreto e total resistência à carbonatação garantem maior durabilidade. Embora o alto teor de PCM tenha reduzido ligeiramente a resistência mecânica e afetado a resistência ao ciclo gelo-degelo, a análise custo-benefício confirma seu potencial na construção sustentável. Assim, a incorporação de 100% ARPP com PCM é uma estratégia eficaz para otimizar a funcionalidade e sustentabilidade do betão.

8.2. Trabalhos futuros

Com base nos resultados deste estudo, futuras pesquisas devem otimizar a combinação de PCM e AR no betão, a fim de maximizar seus benefícios e superar as possíveis limitações.

Primeiramente, devem ser exploradas tecnologias mais eficientes de encapsulamento de PCM, como revestimentos nanométricos ou fixação em matrizes poliméricas, para reduzir a perda superficial de PCM livre e melhorar o comportamento térmico do betão.

Além disso, pode-se ajustar a composição da matriz de cimento ou introduzir novos aditivos (como materiais minerais ultrafinos, grafeno, etc.) para aprimorar o desempenho mecânico e a microestrutura do betão com PCM, melhorando a sua estabilidade estrutural global. Futuramente, otimizações adicionais sobre a durabilidade a longo prazo devem ser realizadas, especialmente em condições ambientais complexas (como elevada humidade, variações extremas de temperatura e corrosão química), para garantir a confiabilidade e a sustentabilidade do material em aplicações reais.

Por fim, através da combinação de simulações numéricas e ensaios a escala real, deve-se avaliar-se os efeitos de economia de energia e a pegada de carbono do betão com incorporação de PCM em ambientes de construção reais, fornecendo suporte teórico e experimental para implementação e difusão desta tecnologia.

CAPÍTULO

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] United Nations Environment Programme (UNEP), 2020 Global Status Report for Buildings and Construction, 2020.
- [2] N. Elshaboury, A. Al-sakkaf, E.M. Abdelkader, G. Alfalah. Construction and Demolition Waste Management Research : A Science Mapping Analysis, *Environmental Research and Public Health*. 19 (2022), e4496. <https://doi.org/doi.org/10.3390/ijerph19084496>.
- [3] I.P. on C.C. (IPCC), Special Report on Global Warming of 1.5°C, 2018.
- [4] S.W. Sharshir, A. Joseph, M. Elsharkawy, M.A. Hamada, A.W. Kandeal, M.R. Elkadeem, A. Kumar Thakur, Y. Ma, M. Eid Moustapha, M. Rashad, M. Arıcı. Thermal energy storage using phase change materials in building applications: A review of the recent development, *Energy and Buildings*. 285 (2023), e112908. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112908>.
- [5] Y. Farnam, H.S. Esmaeeli, P.D. Zavattieri, J. Haddock, J. Weiss. Incorporating phase change materials in concrete pavement to melt snow and ice, *Cement and Concrete Composites*. 84 (2017), 134–145. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.002>.
- [6] A. Ben Fraj, R. Idir. Concrete based on recycled aggregates – Recycling and environmental analysis : A case study of paris ' region, *Construction and Building Materials*. 157 (2017), 952–964. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.059>.
- [7] L. Phutthimethakul, P. Kumpueng, N. Supakata. Use of flue gas desulfurization gypsum, construction and demolition waste, and oil palm waste trunks to produce concrete bricks, *Crystals*. 10 (2020), e709. <https://doi.org/10.3390/cryst10080709>.
- [8] M.S. Aslam, B. Huang, L. Cui. Review of construction and demolition waste management in China and USA, *Journal of Environmental Management*. 264 (2020), e110445. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110445>.
- [9] B. Estanqueiro, J. Dinis Silvestre, J. de Brito, M. Duarte Pinheiro. Environmental life cycle assessment of coarse natural and recycled aggregates for concrete, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 22 (2018), 429–449. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1197161>.
- [10] A. Singh, X. Miao, X. Zhou, Q. Deng, J. Li, S. Zou, Z. Duan. Use of recycled fine aggregates and recycled powders in sustainable recycled concrete, *Journal of Building Engineering*. 77 (2023), e107370. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107370>.
- [11] R.L.S. Ferreira, M.A.S. Anjos, A.K.C. Nóbrega, J.E.S. Pereira, E.F. Ledesma. The role of powder content of the recycled aggregates of CDW in the behaviour of rendering mortars, *Construction and Building Materials*. 208 (2019), 601–612. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.058>.
- [12] C.P. Ginga, J.M.C. Ongpeng, M.K.M. Daly. Circular economy on construction and demolition waste, *Materials*. 13 (2020), e2970. <https://doi.org/10.3390/ma13132970>.
- [13] United States Environmental Agency. Construction and Demolition Debris: Material-Specific Data, United States Environmental Agency. (2021). <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/construction-and-demolition-debris-material#C&Doverview>.
- [14] M.A. Hossain, S.R. Chowdhury, M.F.R. Anik. Study on carbonation of low strength concrete made of brick aggregate, *Case Studies in Construction Materials*. 20 (2024), e03073. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03073>.
- [15] United Nations, Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, New York, 2015. <https://doi.org/10.1163/15718093-12341375>.
- [16] P. Limei, Ma; Dan, Shi; Qingbin. Low-carbon transformation of China's energy in 2015–2050:renewable energy development and feasible path, *China Population,Resources and Environment*. 2 (2018), 8–18.
- [17] H. Jouhara, A.G. Olabi. Editorial: Industrial waste heat recovery, *Energy*. 160 (2018), 1–2. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.013>.

- [18] C. Forman, I.K. Muritala, R. Pardemann, B. Meyer. Estimating the global waste heat potential, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 57 (2016), 1568–1579. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.192>.
- [19] K. Faraj, M. Khaled, J. Faraj, F. Hachem, C. Castelain. Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 119 (2020), 109579. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109579>.
- [20] N. Kumar, S.K. Gupta, V.K. Sharma. Application of phase change material for thermal energy storage: An overview of recent advances, *Materials Today: Proceedings*. 44 (2021), 368–375. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.745>.
- [21] Z. Li, Y. Lu, R. Huang, J. Chang, X. Yu, R. Jiang, X. Yu, A.P. Roskilly. Applications and technological challenges for heat recovery, storage and utilisation with latent thermal energy storage, *Applied Energy*. 283 (2021), 23. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116277>.
- [22] P.K.S. Rathore, N.K. Gupta, D. Yadav, S.K. Shukla, S. Kaul. Thermal performance of the building envelope integrated with phase change material for thermal energy storage: an updated review., *Sustainable Cities and Society*. 79 (2022), e103690. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103690>.
- [23] V. V. Tyagi, K. Chopra, B. Kalidasan, A. Chauhan, U. Stritih, S. Anand, A.K. Pandey, A. Sari, R. Kothari. Phase change material based advance solar thermal energy storage systems for building heating and cooling applications: A prospective research approach, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 47 (2021), 44. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101318>.
- [24] European Commission. Energy storage – the role of electricity, Commission Staff Working Document. (2017) 25. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/swd2017_61_document_travail_service_part1_v6.pdf.
- [25] Y. Yaling, J. He. Efficient storage of energy in distributed energy systems, (2020), 1-9.
- [26] M. Medrano, A. Gil, I. Martorell, X. Potau, L.F. Cabeza. State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2-Case studies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14 (2010), 56–72. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.036>.
- [27] L. Shuankui, L. Yuan, P. Feng. Research Progress in thermal energy Storage and conversion technology, *Energy Storage Science and Technology*. (2020), 12. <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0530>.
- [28] International Energy Agency (IEA), Building energy consumption, (2025). <https://www.iea.org/energy-system/buildings>.
- [29] Alda Mota. Programa Edifícios Mais Sustentáveis: como funciona e a quem se destina?, (2022) 2. <https://www.deco.proteste.pt/casa-energia/aquecimento/noticias/programa-edificios-mais-sustentaveis-como-funciona-quem-se-destina>.
- [30] João Pedro Matos Fernandes. Programa do Fundo Ambiental disponibiliza 4.5 milhões de euros para melhorar a eficiência energética dos edifícios, (2020) 2. <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc22/comunicacao/noticia?i=programa-do-fundo-ambiental-disponibiliza-45-milhoes-de-euros-para-melhorar-a-eficiencia-energetica-dos-edificios>.
- [31] CNESA, Zhongguancun Energy Storage Industry Technology Alliance Database, (2025) 1. <https://en.cnesa.org/latest-news/2023/2/9/cnesa-data-release-1>.
- [32] Analysis of current situation and prospects of China's temperature-controlled energy storage industry (2025), (2025). http://www.360doc.com/content/23/0105/15/13672581_1062615307.shtml.
- [33] New Energy Storage 2025 Action Plan, GuangZhou, 2025. https://www.cnesa.org/information/detail/?column_id=3&id=6848.
- [34] G. Bianchi, G.P. Panayiotou, L. Aresti, S.A. Kalogirou, G.A. Florides, K. Tsamos, S.A. Tassou, P.

- Christodoulides. Estimating the waste heat recovery in the European Union Industry, *Energy, Ecology and Environment*. 4 (2019), 211–221. <https://doi.org/10.1007/s40974-019-00132-7>.
- [35] International Energy Agency (IEA), *Energy efficiency 2018*, Beijing, 2018. www.oecd.org/about/publishing/corrigenda.htm.
- [36] G.B. Hong, T.C. Pan, D.Y.L. Chan, I.H. Liu. Bottom-up analysis of industrial waste heat potential in Taiwan, *Energy*. 198 (2020), e117393. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117393>.
- [37] W. Wang, Z. Dong, Y. Lai. The Research and Application Progress of Phase Change Energy Storage Materials, *Refrigeration and Air Conditioning*. 34 (2020), 91–103.
- [38] C. Veerakumar, A. Sreekumar. Phase change material based cold thermal energy storage: Materials, techniques and applications - A review, *International Journal of Refrigeration*. 67 (2016), 271–289. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.12.005>.
- [39] H. Akeiber, P. Nejat, M.Z.A. Majid, M.A. Wahid, F. Jomehzadeh, I. Zeynali Famileh, J.K. Calautit, B.R. Hughes, S.A. Zaki. A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 60 (2016), 1470–1497. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.036>.
- [40] G. Li. Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 53 (2016) 897–923. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.006>.
- [41] A. De Gracia, L.F. Cabeza. Phase change materials and thermal energy storage for buildings, *Energy & Buildings*. 103 (2015), 414–419. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.007>.
- [42] S. Cunha. Desenvolvimento e Caraterização de Argamassas com Incorporação de Materiais de Mudança de Fase Sandra Raquel Leite da Cunha Desenvolvimento e Caraterização de Argamassas com Incorporação de Materiais de Mudança de Fase, (2018), 263.
- [43] Y.B. Tao, Y.L. He. A review of phase change material and performance enhancement method for latent heat storage system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 93 (2018), 245–259. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.028>.
- [44] W. Villasmil, L.J. Fischer, J. Worlitschek. A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 103 (2019), 71–84. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.040>.
- [45] S. Cunha, J. Aguiar. Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge, *Journal of Energy Storage*. 27 (2020), e101083. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101083>.
- [46] C. Suresh, R.P. Saini. An experimental study on the performance evaluation of a combined sensible-latent heat thermal energy storage, *International Journal of Energy Research*. 45 (2021), 5730–5746. <https://doi.org/10.1002/er.6196>.
- [47] M.K. Koukou, M.G. Vrachopoulos, N.S. Tachos, G. Dogkas, K. Lymperis, V. Stathopoulos. Experimental and computational investigation of a latent heat energy storage system with a staggered heat exchanger for various phase change materials, *Thermal Science and Engineering Progress*. (2018), 87–98. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.05.004>.
- [48] D. Aydin, S.P. Casey, S. Riffat. The latest advancements on thermochemical heat storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 41 (2015), 356–367. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.054>.
- [49] Bo Nordell. Large-scale Thermal Energy Storage, (2000) 10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.03.009><http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.033><http://dx.doi.org/10.1533/9781782420965.1.31><http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.062><http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2013.05.007><http://pl>.
- [50] S. Riffat, B. Mempo, W. Fang. Phase change material developments: a review, *International Journal of Ambient Energy*. 36 (2015), 102–115. <https://doi.org/10.1080/01430750.2013.823106>.

- [51] S. Cunha, J. Aguiar. Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge, *Journal of Energy Storage*. 27 (2020), 13. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101083>.
- [52] G.A. Lane. *Solar Heat Storage: Volume II: Latent Heat Material*, Boca Raton, Florida, 2018. <https://books.google.pt/books?id=IL1HDwAAQBAJ&lpg=PT136&ots=eH1MQzhpJv&dq=Dr. Maria Telkes observed the effect of borax's phase change on heat absorption and cooling%2C and studied the number of phase change cycles&lr&hl=zh-CN&pg=PP1#v=onepage&q&f=false>.
- [53] X. Sun, Y. Gong, B. Xu. Research on Latent Heat Storage Material of Sodium Sulfate Decahydrate System, *Journal of HangZhou University*. 11 (1998), 6.
- [54] World bank group, Urban population (% of total population), The World Bank. (2020) 1. <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS?view=map>.
- [55] M. Shapiro, D. Feldman, D. Hawes, D. Banu. Thermal storage in drywall using organic phase-change material, *Passive Solar Journal*. 4 (1987), 419–438. [papers2://publication/uuid/B68594D5-4FAD-4982-829E-BDC1DDA8FC89](https://publication/uuid/B68594D5-4FAD-4982-829E-BDC1DDA8FC89).
- [56] DEEH, Decreto-Lei n.º 118/2013, (2013) 1–21. <https://dre.pt/dre/legislacao-consolidada/decreto-lei/2013-70852579>.
- [57] C.M. Lai, R.H. Chen, C.Y. Lin. Heat transfer and thermal storage behaviour of gypsum boards incorporating micro-encapsulated PCM, *Energy and Buildings*. 42 (2010), 1259–1266. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.018>.
- [58] B. Zalba, B. Marin. Review on Phase changing materials to store energy, *Appl Therm Eng.* 23 (2003), 251–283. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8).
- [59] K. Ghasemi, S. Tasnim, S. Mahmud. PCM, nano/microencapsulation and slurries: A review of fundamentals, categories, fabrication, numerical models and applications, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 52 (2022), 34. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102084>.
- [60] Z. Lu, C. Lu, C.K.Y. Leung, Z. Li. Graphene oxide modified Strain Hardening Cementitious Composites with enhanced mechanical and thermal properties by incorporating ultra-fine phase change materials, *Cement and Concrete Composites*. 98 (2019), 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.02.010>.
- [61] Z. Zhao, C. Qin, X. Piao, Y. Yan, Y. Cao, Z. Wang, C. Jin. Improving the hydrophobicity , dimensional stability and mold resistance of bamboo by paraffin / microcrystalline wax / stearic acid modification, *Construction and Building Materials*. 414 (2024), e134902. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134902>.
- [62] Y. Chen, Q. Jiang, J. Xin, X. Li, B. Yang, J. Yang. Research status and application of phase change materials, *Journal of Materials Engineering*. 47 (2019), 1–10. <https://doi.org/10.11868/j.issn.1001-4381.2018.000876>.
- [63] S. Peng, A. Fuchs, R.A. Wirtz. Polymeric phase change composites for thermal energy storage, *Journal of Applied Polymer Science*. 93 (2004), 1240–1251. <https://doi.org/10.1002/app.20578>.
- [64] B.K. Purohit, V.S. Sistla. Inorganic salt hydrate for thermal energy storage application: A review, *Energy Storage*. 3 (2021), 1–26. <https://doi.org/10.1002/est2.212>.
- [65] J. Ou, S. Kang, J. Chen, J. E, G. Liao, F. Zhang, E. Leng. Study on the selective recovery of metals from lithium iron phosphate cathode materials based on hydrothermal oxidation, *Journal of Energy Storage*. 101 (2024), e113832. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113832>.
- [66] P. Yang, Y. Wang, Y. Yu, X. Wu. Numerical investigations on performance improvement of molten salt-based horizontal latent heat thermal energy storage unit with optimized structures, *Journal of Energy Storage*. 98 (2024), e113203. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113203>.
- [67] Y. min Wang, Wenxin; Qi, Hong; Ding. Research Progress in Hydrated Salt Composite Phase Change Energy Storage Materials, *Huaxue Tongbao*. 84 (2021), 330–338. <http://www.hxtb>.

- org.
- [68] X. Jin, M.Z. Haider, J.W. Hu. Enhancing thermal energy storage efficiency at low temperatures with innovative macro-encapsulation of nano phase change material in cementitious composites, *Construction and Building Materials*. 449 (2024), e138187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138187>.
 - [69] R. Fan, M. Wan, T. Zhou, N. Zheng, Z. Sun. Graphene-enhanced phase change material systems: Minimizing optical and thermal losses for solar thermal applications, *Energy*. 289 (2024), e129979. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129979>.
 - [70] M.M. Kenisarin. High-temperature phase change materials for thermal energy storage, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14 (2010), 955–970. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.011>.
 - [71] G. Alva, Y. Lin, G. Fang. An overview of thermal energy storage systems, *Energy*. 144 (2018), 341–378. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.037>.
 - [72] Y. Yuan, N. Zhang, W. Tao, X. Cao, Y. He. Fatty acids as phase change materials: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 29 (2014), 482–498. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.107>.
 - [73] A. Sharma, V. V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13 (2009), 318–345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>.
 - [74] M.F. Junaid, Z. ur Rehman, M. Čekon, J. Čurpek, R. Farooq, H. Cui, I. Khan. Inorganic phase change materials in thermal energy storage: A review on perspectives and technological advances in building applications, *Energy and Buildings*. 252 (2021), e111443. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111443>.
 - [75] M. Kenisarin, K. Mahkamov. Solar energy storage using phase change materials, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 11 (2007), 1913–1965. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.005>.
 - [76] Z. Ma, W. Lin, M.I. Sohel. Nano-enhanced phase change materials for improved building performance, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 58 (2016), 1256–1268. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.234>.
 - [77] N. Philip, G. Raam Dheep, A. Sreekumar. Cold thermal energy storage with lauryl alcohol and cetyl alcohol eutectic mixture: Thermophysical studies and experimental investigation, *Journal of Energy Storage*. 27 (2020), 10. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101060>.
 - [78] R. Dinesh, S.I. Hussain, A.A. Roseline, S. Kalaiselvam. Experimental investigation on heat transfer behavior of the novel ternary eutectic PCM embedded with MWCNT for thermal energy storage systems, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 145 (2021), 15. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09726-4>.
 - [79] A. Safari, R. Saidur, F.A. Sulaiman, Y. Xu, J. Dong. A review on supercooling of Phase Change Materials in thermal energy storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 70 (2017), 905–919. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.272>.
 - [80] H. Yang, Y. Zou, H. Cui. Advancements and challenges in enhancing salt hydrate phase change materials for building energy storage: Optimization methodologies and mechanisms, *National Science Open*. 3 (2024), e20230056. <https://doi.org/10.1360/nso/20230056>.
 - [81] S. Karthika, T.K. Radhakrishnan, P. Kalaichelvi. A Review of Classical and Nonclassical Nucleation Theories, *Crystal Growth and Design*. 16 (2016), 6663–6681. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.6b00794>.
 - [82] H.K. Singh, D. Buddhi. Experimental investigation on CaCl₂·6H₂O for subcooling behavior and its correction for low temperature thermal energy storage, *International Journal of Applied Engineering Research*. 13 (2018), 10.

- [83] B. Kalidasan, A.K. Pandey, R. Saidur, M. Samykano, V. V. Tyagi. Nano additive enhanced salt hydrate phase change materials for thermal energy storage, *International Materials Reviews*. 68 (2023), 140–183. <https://doi.org/10.1080/09506608.2022.2053774>.
- [84] V. Saydam, X. Duan. Dispersing different nanoparticles in paraffin wax as enhanced phase change materials: A study on the stability issue, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 135 (2019), 1135–1144. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7484-4>.
- [85] W.P. Wong, A. Kagalkar, R. Patel, P. Patel, S. Dharaskar, R. Walvekar, M. Khalid, V. V. Gedam. Nano-enhanced phase change materials for thermal energy storage: A comprehensive review of recent advancements, applications, and future challenges, *Journal of Energy Storage*. 74 (2023), e109265. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109265>.
- [86] G. Dou, M. Xu, Y. Hu, Y. Sun, H. Jiang, G. Peng. Improving the mechanical performance of phase change microcapsule/epoxy composites via alternately enhancing interface bonding and strength of microcapsules, *Journal of Energy Storage*. 73 (2023), e109212. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109212>.
- [87] A. Moradikazerouni. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using single and multi-phase cooled heat sinks: A review, *Journal of Energy Storage*. 49 (2022), e104097. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104097>.
- [88] D. Dsilva Winfred Rufuss, L. Suganthi, S. Iniyan, P.A. Davies. Effects of nanoparticle-enhanced phase change material (NPCM) on solar still productivity, *Journal of Cleaner Production*. 192 (2018), 9–29. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.201>.
- [89] Q. He, S. Wang, M. Tong, Y. Liu. Experimental study on thermophysical properties of nanofluids as phase-change material (PCM) in low temperature cool storage, *Energy Conversion and Management*. 64 (2012), 199–205. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.04.010>.
- [90] T. Wang, S. Wang, W. Wu. Experimental study on effective thermal conductivity of microcapsules based phase change composites, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 109 (2017), 930–937. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.02.068>.
- [91] S. Cunha, P. Leite, J. Aguiar. Characterization of innovative mortars with direct incorporation of phase change materials, *Journal of Energy Storage*. 30 (2020), e101439. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101439>.
- [92] K. Cellat, B. Beyhan, B. Kazanci, Y. Konuklu, H. Paksoy. Direct Incorporation of Butyl Stearate as Phase Change Material into Concrete for Energy Saving in Buildings, *Journal of Clean Energy Technologies*. 5 (2017), 64–68. <https://doi.org/10.18178/jocet.2017.5.1.345>.
- [93] S. Cunha, M. Silva, J. Aguiar. Behavior of cementitious mortars with direct incorporation of non-encapsulated phase change material after severe temperature exposure, *Construction and Building Materials*. 230 (2020), e117011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117011>.
- [94] J. Paul, M. Samykano, A.K. Pandey, K. Kadirgama, V.V. Tyagi. Nano Engineered Paraffin-Based Phase Change Material for Building Thermal Management, *Buildings*. 13 (2023), e900. <https://doi.org/10.3390/buildings13040900>.
- [95] T.C. Ling, C.S. Poon. Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: An overview, *Construction and Building Materials*. 46 (2013), 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.031>.
- [96] J. Sun, W. Shang, A. Chen. Mechanical and Thermal Properties of Phase Change Aerated Concrete with Paraffin Microcapsule, *Journal of Aerospace Engineering*. 36 (2022), e4470. <https://doi.org/10.1061/JAEEZ.ASENG-4770>.
- [97] M. Lachheb, Z. Younsi, N. Youssef, S. Bouadila. Enhancing building energy efficiency and thermal performance with PCM-Integrated brick walls: A comprehensive review, *Building and Environment*. 256 (2024), e111476. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111476>.

- [98] A.-S. Refat, M. Farid Mohammed. 10-Microencapsulation of phase change materials for thermal energy storage systems, in: *Advances in Thermal Energy Storage Systems (Second Edition)*, 2021: pp. 269–329. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819885-8.00010-3>.
- [99] A. Sari, C. Alkan, C. Bilgin, A. Bicer, Preparation. Characterization and Thermal Energy Storage Properties of Micro/Nano Encapsulated Phase Change Material with Acrylic-Based Polymer, *Polymer Science - Series B*. 60 (2018), 58–68. <https://doi.org/10.1134/S1560090418010128>.
- [100] C. Liu, Z. Rao, J. Zhao, Y. Huo, Y. Li. Review on nanoencapsulated phase change materials: Preparation, characterization and heat transfer enhancement, *Nano Energy*. 13 (2015), 814–826. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.02.016>.
- [101] X. Lu, R. Qian, X. Xu, M. Liu, Y. Liu, D. Zou. Modifications of microencapsulated phase change materials: Supercooling suppression, thermal conductivity enhancement and stability improvement, *Nano Energy*. 124 (2024), e109520. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.109520>.
- [102] G. Cheng, X. Wang, Y. He. 3D graphene paraffin composites based on sponge skeleton for photo thermal conversion and energy storage, *Applied Thermal Engineering*. 178 (2020), e115560. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115560>.
- [103] M. Rida, S. Hoffmann. The influence of macro-encapsulated PCM panel's geometry on heat transfer in a ceiling application, *Advances in Building Energy Research*. (2021), 21. <https://doi.org/10.1080/17512549.2021.1965022>.
- [104] S. Höhlein, A. König-Haagen, D. Brüggemann. Macro-encapsulation of inorganic phase-change materials (PCM) in metal capsules, *Materials*. 11 (2018), e1752. <https://doi.org/10.3390/ma11091752>.
- [105] S. Paneliya, S. Khanna, Utsav, A.P. Singh, Y.K. Patel, A. Vanpariya, N.H. Makani, R. Banerjee, I. Mukhopadhyay. Core shell paraffin/silica nanocomposite: A promising phase change material for thermal energy storage, *Renewable Energy*. 167 (2021), 591–599. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.118>.
- [106] S.A. Tat, P. Muthukumar, P.K. Mondal. Design development and performance investigations of a latent heat storage with PCM encapsulation, *Journal of Energy Storage*. 72 (2023), e108695. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108695>.
- [107] P.K.S. Rathore, S.K. Shukla. Enhanced thermophysical properties of organic PCM through shape stabilization for thermal energy storage in buildings: A state of the art review, *Energy and Buildings*. 236 (2021), 29. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110799>.
- [108] J. Yan. Study on thermal management system of power battery based on phase change heat dissipation, (2017), 160. <https://wap.cnki.net/touch/web/Dissertation/Article/10358-1017073532.nh.html>.
- [109] P. Lv, C. Liu, Z. Rao. Review on clay mineral-based form-stable phase change materials: Preparation, characterization and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 68 (2017), 707–726. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.014>.
- [110] Y. Shen, S. Liu, C. Zeng, Y. Zhang, Y. Li, X. Han, L. Yang, X. Yang. Experimental thermal study of a new PCM-concrete thermal storage block (PCM-CTSB), *Construction and Building Materials*. 293 (2021), e123540. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123540>.
- [111] S. Cunha, J. Aguiar, V. Ferreira, A. Tadeu. Mortars based in different binders with incorporation of phase-change materials: Physical and mechanical properties, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 19 (2015), 1216–1233. <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1008651>.
- [112] S. Cunha, J. Aguiar, V. Ferreira, A. Tadeu. Argamassas com incorporação de Materiais de Mudança de Fase (PCM): Caracterização física, mecânica e durabilidade TT - Mortars with incorporation of Phase Change Materials (PCM): Physical and mechanical properties and

- durability, *Matéria* (Rio de Janeiro). 20 (2015), 245–261. http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762015000100023&lang=pt%0Ahttp://www.scielo.br/pdf/rmat/v20n1/1517-7076-rmat-20-01-00245.pdf.
- [113] S. Cunha, J. Aguiar, V. Ferreira. Durability of Mortars With Incorporation of Phase Change Materials Microcapsules, *Revista Romana de Materiale*. 47 (2017), 166–175. https://search.proquest.com/docview/1915317064?accountid=10297%0Ahttp://resolver.ebscohost.com/openurl?ctx_ver=Z39.88-2004&ctx_enc=info:ofi/enc:UTF-8&rft_id=info:sid/ProQ%3Aabitrade&rft_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:journal&rft.genre=article&rft.jtitle=Rev.
- [114] S. Cunha, J.B. Aguiar, A. Tadeu. Thermal performance and cost analysis of mortars made with PCM and different binders, *Construction and Building Materials*. 122 (2016), 637–648. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.114>.
- [115] S. Cunha, J. Aguiar, F. Pacheco-Torgal. Effect of temperature on mortars with incorporation of phase change materials, *Construction and Building Materials*. 98 (2015), 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.077>.
- [116] S. Cunha, M. Lima, J. Aguiar. Influence of adding phase change materials on the physical and mechanical properties of cement mortars, *Construction and Building Materials*. 127 (2016), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.119>.
- [117] M. Guixiang. Preparation and Properties of Stearic Acid–Acetanilide Eutectic Mixture/Expanded Graphite Composite Phase-Change Material for Thermal Energy Storage, *Energy Technology*. 6 (2018), 153–160. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ente.201700352>.
- [118] C. Ramesh Kumar. Experimental Investigation on the Properties of Cement-PCM Mortars, *Iranian Journal of Science and Technology*. (2022), 9. <https://doi.org/10.1007/s40996-022-00874-1>.
- [119] A. Sarcinella, S. Cunha, N. Reis, J. Aguiar. Analysis of Freeze – Thaw Damage of Cement Mortars Doped with Polyethylene Glycol-Based Form Stable Phase Change Materials, *Materials*. 17 (2024), e3731. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma17153731>.
- [120] L.F. Cabeza, C. Castellón, M. Nogués, M. Medrano, R. Leppers, O. Zubillaga. Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings, *Energy and Buildings*. 39 (2007), 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.030>.
- [121] L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. De Gracia, A.I. Fernández. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15 (2011), 1675–1695. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018>.
- [122] M. Bahrar, Z.I. Djamai, M. EL Mankibi, A. Si Larbi, M. Salvia. Numerical and experimental study on the use of microencapsulated phase change materials (PCMs) in textile reinforced concrete panels for energy storage, *Sustainable Cities and Society*. 41 (2018), 455–468. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.014>.
- [123] A.G. Entrop, H.J.H. Brouwers, A.H.M.E. Reinders. Experimental research on the use of micro-encapsulated Phase Change Materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in Dutch houses, *Solar Energy*. 85 (2011), 1007–1020. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.02.017>.
- [124] R. Wang, M. Ren, X. Gao, L. Qin. Preparation and properties of fatty acids based thermal energy storage aggregate concrete, *Construction and Building Materials*. 165 (2018), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.034>.
- [125] P. Sukontasukkul, P. Uthaichotirat, T. Sangpet, K. Sisomphon, M. Newlands, A. Siripanichgorn, P. Chindapasirt. Thermal properties of lightweight concrete incorporating high contents of phase change materials, *Construction and Building Materials*. 207 (2019), 431–439.

- <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.152>.
- [126] A. Athienitis, C. Liu, D. Hawes, D. Banu, D. Feldman. Investigation of the Thermal Performance of a Passive Solar Test-Room with Wall Latent Heat Storage, *Building and Environment*. 32 (1997), 405–410. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(97\)00009-7](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(97)00009-7).
- [127] L. Shilei, Z. Neng, F. Guohui. Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter, *Energy and Buildings*. 38 (2006), 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.02.007>.
- [128] L. Shilei, F. Guohui, Z. Neng, D. Li. Experimental study and evaluation of latent heat storage in phase change materials wallboards, *Energy and Buildings*. 39 (2007), 1088–1091. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.11.012>.
- [129] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez, L.F. Cabeza. Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling, *Energy and Buildings*. 42 (2010), 534–540. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.022>.
- [130] R. Saxena, D. Rakshit, S.C. Kaushik. Phase change material (PCM) incorporated bricks for energy conservation in composite climate: A sustainable building solution, *Solar Energy*. 183 (2019), 276–284. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.035>.
- [131] X. Chen, C. Liu, X. Yu. Urbanization, Economic Development, and Ecological Environment: Evidence from Provincial Panel Data in China, *Sustainability (Switzerland)*. 14 (2022), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su14031124>.
- [132] Housing and Urban-Rural Development, China promotes construction waste management and resource utilization, (2021). http://www.gov.cn/xinwen/2021-12/09/content_5659650.htm.
- [133] Agência portuguesa da ambiente, Resíduos de Construção e Demolição, (2025). <https://apambiente.pt/index.php/residuos/residuos-de-construcao-e-demolicao>.
- [134] X. Zhao, R. Webber, P. Kalutara, W. Browne, J. Pienaar. Construction and demolition waste management in Australia: A mini-review, *Waste Management and Research*. 40 (2022), 34–46. <https://doi.org/10.1177/0734242X211029446>.
- [135] M. Ibrahim, W. Alimi, R. Assaggaf, B.A. Salami, E.A. Oladapo. An overview of factors influencing the properties of concrete incorporating construction and demolition wastes, *Construction and Building Materials*. 367 (2023), e130307. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130307>.
- [136] A. Singh, X. Miao, X. Zhou, Q. Deng, J. Li, S. Zou, Z. Duan. Use of recycled fine aggregates and recycled powders in sustainable recycled concrete, *Journal of Building Engineering*. 77 (2023), 107370. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107370>.
- [137] Li Mifang. Recycling and treatment methods of construction waste and utilization methods, *Journal of Brick-Tile*. 2 (2009), 9.
- [138] B. Wang, L. Yan, Q. Fu, B. Kasal. A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete, *Resources, Conservation and Recycling*. 171 (2021), 29. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105565>.
- [139] R.J.S.-C. Sabina. Construction and demolition waste as partial cement replacement, *Advances in Cement Research*. 31 (2019), 411–422. <https://doi.org/10.1680/jadcr.16.00132>.
- [140] R.V. Catarina Neno, J. Brito. Using Fine Recycled Concrete Aggregate for Mortar Production, *Materials Research*. 17 (2014), 168–177. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392013005000164>.
- [141] I. Vegas, I. Azkarate, A. Juarrero, M. Frias. Design and performance of masonry mortars made with recycled concrete aggregates, *Materiales de Construcción*. 59 (2009), 5–18. <https://doi.org/10.3989/mc.2009.44207>.
- [142] A. Seco, J. Omer, S. Marcelino, S. Espuelas, E. Prieto. Sustainable unfired bricks manufacturing

- from construction and demolition wastes, *Construction and Building Materials*. 167 (2018), 154–165. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.026>.
- [143] E. Setyowati, P. Purwanto. The Polymer Brick as Nano-Technology based Material to Support Green Building Construction, (2015), 5. https://doi.org/10.5176/2301-394x_ace15.32.
- [144] M. Arreola-Sanchez, W. Martinez-Molina, H.L. Chavez-Garcia, M.A. Navarrete-Seras, J.A. Borrego-Perez, J.A. Velazquez-Perez, R. Ruiz-Ruiz, A.I. Cervantes-Servin, A. Pelagio-Chávez, E.M. Alonso-Guzman. Physical-Mechanical Behavior of CDW and Tire Flake Integration in Building Block Manufacturing, *Sustainability*. 15 (2023), e15418. <https://doi.org/10.3390/su152115418>.
- [145] P. Favaretto, G.E.N. Hidalgo, C.H. Sampaio, R. de Almeida Silva, R.T. Lermen. Characterization and use of construction and demolition waste from South of Brazil in the production of foamed concrete blocks, *Applied Sciences*. 7 (2017), e1090. <https://doi.org/10.3390/app7101090>.
- [146] Tianjin Municipal Commission of Urban Mangement, Nanping Park mountain landscaping, (2019). https://csgl.tj.gov.cn/zl/cslhjs/ssgy/202009/t20200922_3777798.html.
- [147] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC E 471-2007 – Especificação LNEC para agregados reciclados de resíduos de betão para betões de ligantes hidráulicos, (2007).
- [148] S. Eurostat, Recovery rate of construction and demolition waste, *Statistics Eurostat*. (2022) 1. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_wm040/default/table?lang=en.
- [149] B. Huang, X. Wang, H. Kua, Y. Geng, R. Bleischwitz, J. Ren. Construction and demolition waste management in China through the 3R principle, *Resources, Conservation and Recycling*. 129 (2018), 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.029>.
- [150] L. Zheng, H. Wu, H. Zhang, H. Duan, J. Wang, W. Jiang, B. Dong, G. Liu, J. Zuo, Q. Song. Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China, *Construction and Building Materials*. 136 (2017), 405–413. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.055>.
- [151] E.A. Al-ali, W.K. Eid. Effect of using recycled aggregates as road subbase materials : A case study from Kuwait City, *Kuwait Journal of Science*. 50 (2023), 739–745. <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2023.02.029>.
- [152] E. Güneysi, M. Gesoglu, Z. Algin, H. Yazici. Rheological and fresh properties of self-compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*. 113 (2016), 622–630. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.073>.
- [153] Weibo Consulting, Special research and in-depth analysis report on China's construction waste treatment industry in 2024, (2024). www.weiboizixun.com.
- [154] Z. Abdollahnejad, M. Mastali, M. Falah, T. Luukkonen, M. Mazari, M. Illikainen. Construction and demolition waste as recycled aggregates in alkali-activated concretes, *Materials*. 12 (2019), e4016. <https://doi.org/10.3390/ma12234016>.
- [155] F. de Andrade Salgado, F. de Andrade Silva. Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review, *Journal of Building Engineering*. 52 (2022), e104452. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104452>.
- [156] A. Eduardo, B. Cabral, V. Schalch, D. Carpena, C. Dal, J. Luis, D. Ribeiro. Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*. 24 (2010), 421–430. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.011>.
- [157] R. V Silva, J. De Brito, R.K. Dhir. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production, *Construction and Building Materials*. 65 (2014), 201–217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>.
- [158] M. Behera, S.K. Bhattacharyya, A.K. Minocha, R. Deoliya, S. Maiti. Recycled aggregate from C & D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector : A review, *Construction and Building Materials*. 68 (2014), 501–516. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003>.

- [159] P.K.M.H. Meryman. Tools for Reducing Carbon Emissions Due to Cement Consumption, *Structural Magazine*. (2009), 12–15.
- [160] A. Coelho, J. Brito. Influence of construction and demolition waste management on the environmental impact of buildings, *Waste Management*. 32 (2012), 532–541. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.11.011>.
- [161] Derek Chisholm, *Recycled Aggregates in New Concrete*, New Zealand, 2011. <https://docplayer.net/42010556-Recycled-aggregates-in-new-concrete.html>.
- [162] H. Shima, H. Tateyashiki, R. Matsushashi, Y. Yoshida. An Advanced Concrete Recycling Technology and its Applicability Assessment through Input-Output Analysis, *Journal of Advanced Concrete Technology*. 3 (2005), 53–67.
- [163] H.Y. Fang, F.L. Liu, J.H. Yang. High-quality coarse aggregate recycling from waste concrete by impact crushing, *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 22 (2020), 887–896. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-00984-w>.
- [164] Y. Gao, Y. Jiang, Y. Tao, P. Shen, C.S. Poon. Cement and Concrete Research Accelerated carbonation of recycled concrete aggregate in semi-wet environments : A promising technique for CO₂ utilization, *Cement and Concrete Research*. 180 (2024), e107486. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107486>.
- [165] C. Won, Sang-Joon Park. The Material Properties on the Crushing Effect of Recycled Aggregates, *J Korean Recycl Constr Resour Inst*. 5 (2010), 125–130.
- [166] J. Kim. Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes : An overview, *Construction and Building Materials*. 328 (2022), e127071. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127071>.
- [167] A. Haitham, S. Ferass, A. Ismail, T. Adil. Evaluation of Concrete Strength Made with Recycled Aggregate, *Buildings*. 9 (2019), e56. <https://doi.org/10.3390/buildings9030056>.
- [168] N.K. Bui, T. Satomi, H. Takahashi. Improvement of mechanical properties of recycled aggregate concrete basing on a new combination method between recycled aggregate and natural aggregate, *Construction and Building Materials*. 148 (2017), 376–385. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.084>.
- [169] D.Z. Hua, C.S. Poon. Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars, *Materials and Design*. 58 (2014), 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.044>.
- [170] K.. Hideo, M.. Yoshihiro, I.. Toshiyuki, T.. Hisashi, A.. Hisanobu, N.. Takafumi, T.. Masaki, Y. Kunio. Research and standardization of high-quality recycled aggregates for concrete in nuclear power plants, in: *25th Conference on Structure Mechanics in Reactor Technology*, Charlotte, USA, 2019: pp. 4–9.
- [171] T. Fumoto, Y. Imose, M. Yamada. Effects of Improving Recycled Fine Aggregate by Ball Mill, *Mem Fac Eng Osaka City Univ*. 4 (2000), 65–72.
- [172] Z. Feng, Y. Zhao, W. Zeng, Z. Lu, S.P. Shah. Using microbial carbonate precipitation to improve the properties of recycled fine aggregate and mortar, *Construction and Building Materials*. 230 (2020), e116949. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116949>.
- [173] G. Chinzorigt, M.K. Lim, M. Yu, H. Lee, O. Enkbold, D. Choi, Strength. shrinkage and creep and durability aspects of concrete including CO₂ treated recycled fine aggregate, *Cement and Concrete Research*. 136 (2020), e106062. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106062>.
- [174] H.S. Kim, J.M. Kim, B. Kim. Quality improvement of recycled fine aggregate using steel ball with the help of acid treatment, *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 20 (2018), 754–765. <https://doi.org/10.1007/s10163-017-0639-8>.
- [175] S. Cho, G. Kim, K. Kim, S. Seon, J. Park. A Study on Aggregate Waste Separation Efficiency Using Adsorption System with Rotating Separation Net, *J Korean Recycl Constr Resour Inst*. 9 (2021),

- 85–91.
- [176] F.T. Olorunsogo, N. Padayachee. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes, *Cement and Concrete Research*. 32 (2002), 179–185.
 - [177] S.C. Kou, C.S. Poon. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate, *Construction and Building Materials*. 35 (2012), 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.032>.
 - [178] A. Gorjinia, P. Shafigh, M. Moghimi, H. Bin. The role of 0 – 2 mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete, *JOURNAL OF MATERIALS&DESIGN*. 64 (2014), 345–354. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.048>.
 - [179] Y.Z.. J.G.S. Xu. Analyses and evaluation of the behaviour of recycled aggregate and recycled concrete, *Concrete*. 7 (2006), 41–46.
 - [180] P. Zhu, Y. Hao, H. Liu, D. Wei, S. Liu, L. Gu. Durability evaluation of three generations of 100 % repeatedly recycled coarse aggregate concrete, *Construction and Building Materials*. 210 (2019), 442–450. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.203>.
 - [181] C. Shi, Y. Li, J. Zhang, W. Li, L. Chong, Z. Xie. Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review, *Journal of Cleaner Production*. 112 (2016), 466–472. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>.
 - [182] Y.C.Y.H.L.J.W. Qiong. The researching and analysing of regenerated aggregate of concrete, *Recycling Resource Research*. 6 (2003), 34–37.
 - [183] R.K. Majhi, A.N. Nayak, B.B. Mukharjee. Development of sustainable concrete using recycled coarse aggregate and ground granulated blast furnace slag, *Construction and Building Materials*. 159 (2018), 417–430. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.118>.
 - [184] H.P. Sefidehkhani, Performance of fly ash-blended Portland cement concrete developed by using fine or coarse recycled concrete aggregate, 357 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129431>.
 - [185] J.A. Bogas, J. De Brito, J.M. Figueiredo. Mechanical characterization of concrete produced with recycled lightweight expanded clay aggregate concrete, *Journal of Cleaner Production*. 89 (2015), 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.015>.
 - [186] A.Z. Bendimerad, E. Rozière, A. Loukili. Plastic shrinkage and cracking risk of recycled aggregates concrete, *Construction and Building Materials*. 121 (2016), 733–745. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.056>.
 - [187] S.M.S. Kazmi, M.J. Munir, Y.F. Wu. Application of waste tire rubber and recycled aggregates in concrete products: A new compression casting approach, *Resources, Conservation and Recycling*. 167 (2021), 105353. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105353>.
 - [188] L. Evangelista, J. Brito. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites*. 32 (2010), 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005>.
 - [189] V. Revilla-cuesta, V. Ortega-lópez, M. Skaf, J. Manuel. Effect of fine recycled concrete aggregate on the mechanical behavior of self-compacting concrete, *Constr Build Mater*. 263 (2020), e120671. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120671>.
 - [190] O. Şimşek, H. Pourghadri Sefidehkhani, H.S. Gökçe. Performance of fly ash-blended Portland cement concrete developed by using fine or coarse recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*. 357 (2022), e129431. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129431>.
 - [191] B. Delsaute, S. Staquet. Development of strain-induced stresses in early age concrete composed of recycled gravel or sand, *Journal of Advanced Concrete Technology*. 17 (2019), 319–334. <https://doi.org/10.3151/jact.17.319>.

- [192] D. Pedro, J. de Brito, L. Evangelista. Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties, *Construction and Building Materials*. 154 (2017), 294–309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.215>.
- [193] S. Wang, P. Xia, K. Chen, F. Gong, H. Wang, Q. Wang, Y. Zhao, W. Jin. Prediction and optimization model of sustainable concrete properties using machine learning, deep learning and swarm intelligence: A review, *Journal of Building Engineering*. 80 (2023), e108065. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108065>.
- [194] S. Kou, C. Poon, H. Wan. Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates C & D Waste, *Construction and Building Materials*. 36 (2012), 881–889. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.060>.
- [195] N. Singh, S.P. Singh. Evaluating the performance of self compacting concretes made with recycled coarse and fine aggregates using non destructive testing techniques, *Construction and Building Materials*. 181 (2018), 73–84. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.039>.
- [196] M. Chakradhara Rao, S.K. Bhattacharyya, S. V. Barai. Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete, *Materials and Structures*. 44 (2011), 205–220. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9620-x>.
- [197] I.G.C. Qazi Ahmad Suhaib, Er Ravinderjeet Kaur, ER Ritu Goyal. Effect of Phase Change Materials (PCM's) on Recycled Aggregate Concrete, *International Journal of Engineering Research And*. 9 (2020), 939–944. <https://doi.org/10.17577/ijertv9is070408>.
- [198] L. Evangelista, J. Brito. Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Made with Fine Recycled Concrete Aggregates, *Structural Engineering*. 21 (2017), 353–363. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0653-8>.
- [199] C.J. Zega, Á. Antonio, D. Maio. Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements, *Waste Management*. 31 (2011), 2336–2340. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.011>.
- [200] C. Zheng, C. Lou, G. Du, X. Li, Z. Liu, L. Li. Mechanical properties of recycled concrete with demolished waste concrete aggregate and clay brick aggregate, *Results in Physics*. 9 (2018), 1317–1322. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.04.061>.
- [201] F. Cartuxo, J. De Brito, L. Evangelista, J.R. Jiménez. Increased Durability of Concrete Made with Fine Recycled Concrete Aggregates Using Superplasticizers, *Materials*. 9 (2016), e98. <https://doi.org/10.3390/ma9020098>.
- [202] H. Sasanipour, F. Aslani. Durability properties evaluation of self-compacting concrete prepared with waste fine and coarse recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*. 236 (2020), e117540. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117540>.
- [203] J.A. Bogas, J. Brito, D. Ramos. Freeze-thaw resistance of concrete produced with fine recycled concrete aggregates, *Journal of Cleaner Production*. 115 (2016), 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.065>.
- [204] C. Shi, Z. Wu, Z. Cao, T. Chai, J. Zheng. Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO₂ and pozzolan slurry, *Cement and Concrete Composites*. 86 (2018), 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.013>.
- [205] M. Nedeljkovi, J. Visser, B. Savija, S. Valcke, E. Schlangen. Use of fine recycled concrete aggregates in concrete : A critical review, *Journal of Building Engineering*. 38 (2021), e102196. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102196>.
- [206] T. Zhao, J. Bao, S. Liu, P. Zhang, Z. Liu. Water absorption of recycled aggregate concrete after repeated axial compressive loading, *Journal of Building Materials*. 24 (2021), 71–76.
- [207] Q. Gao, Z. Ma, J. Xiao, F. Li. Effects of Imposed Damage on the Capillary Water Absorption of Recycled Aggregate Concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018 (2018), 13.

- <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2018/2890931>.
- [208] J. Thomas, N.N. Thaickavil, P.M. Wilson. Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates, *Journal of Building Engineering*. 19 (2018), 349–365. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.05.007>.
- [209] B.S. Hamad, A.H. Dawi. Sustainable normal and high strength recycled aggregate concretes using crushed tested cylinders as coarse aggregates, *Case Studies in Construction Materials*. 7 (2017), 228–239. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.08.006>.
- [210] N. Farah, A. Jamaludin, L.L. Jie, K. Muthusamy, H.N. Ruslan. Materials Today : Proceedings Fresh and mechanical properties of concrete containing recycled fine aggregate as partial sand replacement, *Materials Today: Proceedings*. (2023). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.331>.
- [211] S. Taner, C. Meyer, S. Herfellner. Effects of internal curing on the strength , drying shrinkage and freeze – thaw resistance of concrete containing recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*. 91 (2015), 288–296. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.045>.
- [212] N. Haghighatnejad, S.Y. Mousavi, S.J. Khaleghi, A. Tabarsa, S. Yousefi. Properties of recycled PVC aggregate concrete under different curing conditions, *Construction and Building Materials*. 126 (2016), 943–950. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.047>.
- [213] Z. Li, W. Chen, H. Hao, N.S. Ha, T.M. Pham. Static and dynamic properties of novel ambient-cured lightweight geopolymer composites with fibre reinforced epoxy coated EPS aggregates, *Composites Part B: Engineering*. 250 (2023), e110439. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110439>.
- [214] I.B. Topçu, S. Şengel. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate, *Cement and Concrete Research*. 34 (2004), 1307–1312. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.019>.
- [215] Z. Zhao, S. Remond, D. Damidot, W. Xu. Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars, *Construction and Building Materials*. 81 (2015), 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.037>.
- [216] Z. Jia, J. Aguiar, C. de Jesus, F. Castro, S. Cunha. Physical and mechanical properties of lightweight concrete with incorporation of ceramic mold casting waste, *Materialia*. 28 (2023), e101765. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2023.101765>.
- [217] H. Amjad, M. Shah Zeb, R.A. Khushnood, N. Khan. Impacts of biomimetic self-healing of *Lysinibacillus boronitolerans* immobilized through recycled fine and coarse brick aggregates in concrete, *Journal of Building Engineering*. 76 (2023), 107327. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107327>.
- [218] W. Khaliq, M.B. Ehsan. Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques, *Construction and Building Materials*. 102 (2016), 349–357. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.006>.
- [219] T. Chandra Sekhara Reddy, A. Ravitheja. Macro mechanical properties of self healing concrete with crystalline admixture under different environments, *Ain Shams Engineering Journal*. 10 (2019), 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.01.005>.
- [220] C. Liang, B. Pan, Z. Ma, Z. He, Z. Duan. Utilization of CO₂ curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review, *Cement and Concrete Composites*. 105 (2020), 14. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103446>.
- [221] J.A. Bogas, A. Gomes. Non-steady-state accelerated chloride penetration resistance of structural lightweight aggregate concrete, *Cem Concr Compos*. 60 (2015), 111–122. <https://doi.org/http://10.1016/j.cemconcomp.2015.04.001>.
- [222] M. Medine, H. Trouzine, J. Aguiar, A. Asroun. Durability properties of five years aged lightweight concretes containing rubber aggregates, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 62 (2018),

- 386–397. <https://doi.org/10.3311/PPci.11363>.
- [223] G.S. Gagan, N. Singh. Reviewing the performance of concrete comprising recycled coarse aggregates using non-destructive tests, *Materials Today: Proceedings*. 93 (2023), 79–84. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.026>.
- [224] Z. Jia; J. Aguiar, S. Cunha, C. Jesus, F. Castro. Durability properties of lightweight concrete with ceramic mold casting waste, *Magazine of Concrete Research*. 76 (11) (2023), 548-556. <https://doi.org/https://doi.org/10.1680/jmacr.23.00125>.
- [225] J. Bao, S. Li, P. Zhang, X. Ding, S. Xue, Y. Cui, T. Zhao. Influence of the incorporation of recycled coarse aggregate on water absorption and chloride penetration into concrete, *Construction and Building Materials*. 239 (2020), e117845. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117845>.
- [226] H. Sasanipour, F. Aslani, J. Taherinezhad. Chloride ion permeability improvement of recycled aggregate concrete using pretreated recycled aggregates by silica fume slurry, *Construction and Building Materials*. 270 (2021), 121498. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121498>.
- [227] H. Liu, C. Liu, G. Bai, C. Zhu. Impact of chloride intrusion on the pore structure of recycled aggregate concrete based on the recycled aggregate porous interface, *Construction and Building Materials*. 259 (2020), 120397. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120397>.
- [228] Y. Yu, L. Lin. Modeling and predicting chloride diffusion in recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*. 264 (2020), 120620. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120620>.
- [229] P. Zhu, Y. Hao, H. Liu, X. Wang, L. Gu. Durability evaluation of recycled aggregate concrete in a complex environment, *Journal of Cleaner Production*. 273 (2020), 122569. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122569>.
- [230] K.K. Sagoe-Crentsil, T. Brown, A.H. Taylor. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate, *Cement and Concrete Research*. 31 (2001), 707–712. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00476-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00476-2).
- [231] I.F. Sáez del Bosque, P. Van den Heede, N. De Belie, M.I. Sánchez de Rojas, C. Medina. Carbonation of concrete with construction and demolition waste based recycled aggregates and cement with recycled content, *Construction and Building Materials*. 234 (2020), e117336. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117336>.
- [232] M. Limbachiya, M.S. Meddah, Y. Ouchagour. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete, *Construction and Building Materials*. 27 (2012), 439–449. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.023>.
- [233] P.S. Lovato, E. Possan, D.C.C.D. Molin, Â.B. Masuero, J.L.D. Ribeiro. Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes, *Construction and Building Materials*. 26 (2012), 437–447. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.043>.
- [234] B. Tang, M. Fan, Z. Yang, Y. Sun, L. Yuan. A comparison study of aggregate carbonation and concrete carbonation for the enhancement of recycled aggregate pervious concrete, *Construction and Building Materials*. 371 (2023), e130797. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130797>.
- [235] S. Omary, E. Ghorbel, G. Wardeh. Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties, *Construction and Building Materials*. 108 (2016), 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.042>.
- [236] C. Liang, S. Wang, Z. Cai, Y. Yin, Y. Gao, M.Z. Guo, X. Wang, Z. Ma. Effects of CO2 curing methods on frost resistance and mechanical properties of recycled aggregate concrete, *Case Studies in Construction Materials*. 20 (2024), e02973. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02973>.
- [237] A. Richardson, K. Coventry, J. Bacon. Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete, *Journal of Cleaner Production*. 19 (2011), 272–

277. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.09.014>.
- [238] S. Zhou, C. Wu, J. Li, Y. Shi, M. Luo, K. Guo. Study on the influence of fractal dimension and size effect of coarse aggregate on the frost resistance of hydraulic concrete, *Construction and Building Materials*. 431 (2024), e136526. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136526>.
- [239] K. Liu, K. Fu, Y. Sang, Y. Yang, C. Zou, T. Xie, X. Zhao. Frost resistance of recycled aggregate concrete: A critical review, *Journal of Building Engineering*. 90 (2024), e109450. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109450>.
- [240] J.Y.. Sun, J. Geng. Effect of particle size and content of recycled fine aggregate on frost resistance of concrete, *J Build Mater*. 15 (2012), 382–385.
- [241] D. Zhi, P. Xia, S. Wang, F. Gong, W. Cao, D. Wang, T. Ueda. RBSM-based mesoscale study of mechanical properties and frost damage behaviors for recycled fine aggregate concrete, *Construction and Building Materials*. 416 (2024), e135136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135136>.
- [242] NP-581, Determination of density and absorption of aggregates, (1969) 3.
- [243] NP-954 1973, Determination of density and absorption of river sand, (1973) 3.
- [244] EN 933-1, Tests of geometric properties of aggregates; Part 1: Particle size analysis; sieving method, (2012) 20.
- [245] EN 206-1, Concrete - Part 1: Specification, performance, production e conformity, Concrete. (2007).
- [246] NP-EN-12390-7 - Ensaio do betão endurecido, Parte 7: Massa volúmica do betão endurecido, (2003).
- [247] LNEC E 393, LNEC E-393 - Concrete: Determination of capillary water absorption, (1993).
- [248] LNEC E394, Determinação da Absorção de Água por Imersão - Ensaio à Pressão Atmosférica, (1993) 2.
- [249] EN 12390-3, Hardened concrete tests, Part 3: Compressive strength of test specimens, (2003) 22.
- [250] EN-12390-5, Tests of hardened concrete, Part 5: Flexural strength of specimens., (2003).
- [251] LNEC E 463 - Betão: Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário, (2004).
- [252] EN 12371 2006, Natural stone test methods - Determination of frost resistance, (2006) 22.
- [253] EN 1367-2 (2002) Ensaio das propriedades térmicas e de meteorização dos agregados. Parte 2: Ensaio do sulfato de magnésio, (2022) 16.
- [254] R.M. Ferreira. Avaliação de ensaios de durabilidade do betão, Dissertação Apresentada à Escola de Engenharia Do Minho Para a Obtenção Do Grau de Mestre Em Engenharia Civil - Materiais e Reabilitação Da Construção. (2000), 246. <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/40><http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/40>.
- [255] CEN 12390-12, Testing hardened concrete - Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete - Accelerated carbonation method, (2010) 18.
- [256] Weather Underground, Temperature of Portugal, (2025). <https://www.wunderground.com/dashboard/pws/IGUIMARE8>.
- [257] LNEC E 64, Determination of density of cemente, (1979) 2.
- [258] SECIL, SUPRATEK CIMENTO PORTLAND - CEM I 42,5R, Portugal, 2018.
- [259] B. Sangoju, G. Ramesh, B. Bharatkumar, K. Ramanjaneyulu. Evaluation of Durability Parameters of Concrete with Manufacture Sand and River Sand, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*. 98 (2017), 267–275. <https://doi.org/10.1007/s40030-017-0204-4>.
- [260] M. Joel. Use of crushed granite fine as replacement to river sand in concrete production, *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*. 9 (2010), 85–96.

- [261] Z. Jia, S. Cunha, J. Aguiar, P. Guo. The Effect of Phase Change Materials on the Physical and Mechanical Properties of Concrete Made with Recycled Aggregate, *Building and Environment*. 13 (2023), e2601. <https://doi.org/10.3390/buildings13102601>.
- [262] M. Bravo, A.P.C. Duarte, J. Brito, L. Evangelista, D. Pedro. On the development of a technical specification for the use of fine recycled aggregates from construction and demolition waste in concrete production, *Materials*. 13 (2020), e4228. <https://doi.org/10.3390/MA13194228>.
- [263] A. Mark, M. Sidney, *Aggregates in Concrete*, 1st Editio, London, 2005. <https://doi.org/10.1201/9781482264647>.
- [264] Rubitherm, Technical parameters of RT22HC, (2020) 1.
- [265] R. Wang, Q. Zhang, Y. Li. Deterioration of concrete under the coupling effects of freeze – thaw cycles and other actions : A review, *Construction and Building Materials*. 319 (2022), e126045. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126045>.
- [266] Faury J., *Le Béton*, (1958).
- [267] EN 12350-6, Ensaio do betão fresco, Bsi. (2019) 14.
- [268] Z. Jia, S. Cunha, J. Aguiar, B. Chen. Eco-concrete with recycled aggregate functionalized with phase change materials : Physical and mechanical behavior, *Constr Build Mater*. 471 (2025), e140777. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140777>.
- [269] Z. Jia, S. Cunha, J. Aguiar, B. Chen. Performance of concrete with demolition waste and PCM under high temperature ranges, *Construction and Building Materials*. 472 (2025), e140795. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140795>.
- [270] S. Kou, C. Poon, F. Agrela. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures, *Cement and Concrete Composites*. 33 (2011), 788–795. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.05.009>.
- [271] G. Prokopski, J. Halbiniak. Interfacial transition zone in cementitious materials, *Cement and Concrete Research*. 30 (2000), 579–583. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00210-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00210-6).
- [272] K. Ouyang, J. Liu, S. Liu, B. Song, H. Guo, G. Li, C. Shi. Influence of pre-treatment methods for recycled concrete aggregate on the performance of recycled concrete : A review, *Resources, Conservation & Recycling*. 188 (2023), e106717. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106717>.
- [273] I. Pane, W. Hansen. Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis, *Cement and Concrete Research*. 35 (2005), 1155–1164. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.027>.
- [274] C. Wang, C. Chazallon, S. Braymand, P. Hornych. Thermogravimetric analysis (TGA) for characterization of self-cementation of recycled concrete aggregates in pavement, *Thermochimica Acta*. 733 (2024), e179680. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2024.179680>.
- [275] L.O.P. Mahieux. Reuse of recycled crushed concrete fines as mineral addition in cementitious materials, *Materials and Structures*. 49 (2016), 3239–3251. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0716-1>.
- [276] Z. Zhang, J. Du, M. Shi. Quantitative Analysis of the Calcium Hydroxide Content of EVA-Modified Cement Paste Based on TG-DSC in a Dual Atmosphere, *Materials*. 15 (2022), e2660. <https://doi.org/10.3390/ma15072660>.
- [277] K. Scrivener, A. Ouzia, P. Juilland, A.K. Mohamed. Advances in understanding cement hydration mechanisms, *Cement and Concrete Research*. 124 (2019), e105823. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105823>.
- [278] C. Wang, C. Chazallon, S. Braymand, P. Hornych. Influence of self-cementing properties on the mechanical behaviour of recycled concrete aggregates under monotonic loading, *Construction and Building Materials*. 367 (2023), e130259. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130259>.

- [279] K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach. A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials., CRC Press, 2016.
- [280] P.K.. Mehta, P.J.M. Monteiro. Concrete: Structure, Properties, and Materials, 4th Editio, McGraw-Hill Education, 2013.
- [281] C. Liang, Z. Cai, H. Wu, J. Xiao, Y. Zhang, Z. Ma. Chloride transport and induced steel corrosion in recycled aggregate concrete : A review, *Construction and Building Materials*. 282 (2021), e122547. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122547>.
- [282] Q. Yuan, F. Zhong, S. Zuo, Z. Xie, K. Xue, H. Yao. Understanding the water transport behaviors of hydrophobic cement mortar by paraffin modification, *Construction and Building Materials*. 435 (2024), e136845. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136845>.
- [283] A. Yacoub, A. Djerbi, T. Chong. Water absorption in recycled sand: New experimental methods to estimate the water saturation degree and kinetic filling during mortar mixing, *Construction and Building Materials*. 158 (2018) 464–471. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.023>.
- [284] T. Le, G. Le Saout, E. Garcia-Diaz, D. Betrancourt, S. Rémond. Hardened behavior of mortar based on recycled aggregate: Influence of saturation state at macro- and microscopic scales, *Construction and Building Materials*. 141 (2017), 479–490. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.035>.
- [285] J. Guo, W. Sun, Y. Xu, W. Lin, W. Jing. Damage Mechanism and Modeling of Concrete in Freeze–Thaw Cycles: A Review, *Buildings*. 12 (2022), e1317. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/buildings12091317>.
- [286] C.S. Poon, Z.H. Shui, L. Lam. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates, *Construction and Building Materials*. 18 (2004), 461–468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.005>.
- [287] S.C. Kou, C.S. Poon. Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash, *Cement and Concrete Composites*. 37 (2013), 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.12.011>.
- [288] S. Gao, J. Guo, Y. Zhu, Z. Jin. Study on the influence of the properties of interfacial transition zones on the performance of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*. 408 (2023), e133592. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133592>.
- [289] H. Luan, J. Wu, J. Pan, Freeze-thaw Durability of Recycled Aggregate Concrete: An Overview, *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*. 36 (2021) 58–69. <https://doi.org/10.1007/s11595-021-2378-x>.
- [290] S. Cunha, M. Silva, J. Aguiar. Mortars with direct incorporation of Phase Change Materials : Low and high temperature behavior evaluation, *Revista Materia*. 26 (2021), e13010. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.13010>.
- [291] V.W.Y. Tam, C.M. Tam. Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA_s and TSMA_{sc}, *Construction and Building Materials*. 22 (2008), 2068–2077. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.024>.
- [292] X. Wang, J. Xu, Z. Wang, W. Yao. Use of recycled concrete aggregates as carriers for self-healing of concrete cracks by bacteria with high urease activity, *Construction and Building Materials*. 337 (2022), e127581. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127581>.
- [293] R.K. Majhi, A.N. Nayak, Bond. durability and microstructural characteristics of ground granulated blast furnace slag based recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*. 212 (2019), 578–595. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.017>.
- [294] D. Mostofinejad, S.M. Hosseini, F. Nosouhian, T. Ozbakkaloglu, B. Nader Tehrani. Durability of concrete containing recycled concrete coarse and fine aggregates and milled waste glass in magnesium sulfate environment, *Journal of Building Engineering*. 29 (2020), e101182. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101182>.

- [295] G.A. Khoury. Compressive strength of concrete at high temperatures : a reassessment, *Megazine of Concrete Research*. 44 (1992), 291–309.
- [296] K.M.A. Hossain. High strength blended cement concrete incorporating volcanic ash : Performance at high temperatures, *Cement and Concrete Composites*. 28 (2006), 535–545. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.01.013>.
- [297] S. Ayd, B. Baradan. Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars, *Cement and Concrete Research*. 37 (2007), 988–995. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.005>.
- [298] S. Cunha, A. Sarcinella, N. Reis, M. Frigione. High temperature performance of cement mortars with incorporation of PEG-based form-stable Phase Change Materials, 438 (2024), e136946. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136946>.
- [299] Andreas Hauer. Thermal Energy Storage, 2013. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7206-2_8.
- [300] A. Sarcinella, J. Aguiar, M. Frigione. Physical Properties of Eco-Sustainable Form-Stable Phase Change Materials Included in Mortars Suitable for Buildings Located in Different Continental Regions, *Materials*. 15 (2022), e2497. <https://doi.org/10.3390/ma15072497>.
- [301] S. Pilehvar, V.D. Cao, A.M. Szczotok, L. Valentini, D. Salvioni, M. Magistri, R. Pamies, A.L. Kjøniksen. Mechanical properties and microscale changes of geopolymers concrete and Portland cement concrete containing micro-encapsulated phase change materials, *Cement and Concrete Research*. 100 (2017), 341–349. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.07.012>.
- [302] K. Pielichowska, K. Pielichowski. Phase change materials for thermal energy storage, *Progress in Materials Science*. 65 (2014), 67–123. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.03.005>.
- [303] H. Li, Q. Zeng, S. Xu. Effect of pore shape on the thermal conductivity of partially saturated cement-based porous composites, *Cement and Concrete Composites*. 81 (2017), 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.05.002>.
- [304] I. Asadi, P. Shafigh, Z.F. Bin Abu Hassan, N.B. Mahyuddin. Thermal conductivity of concrete – A review, *Journal of Building Engineering*. 20 (2018), 81–93. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.07.002>.
- [305] J. Rostami, O. Khandel, R. Sedighardekani, A.R. Sahneh, S.A. Ghahari. Enhanced workability, durability, and thermal properties of cement-based composites with aerogel and paraffin coated recycled aggregates, *Journal of Cleaner Production*. 297 (2021), e126518. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126518>.
- [306] S. Antonella, J. Aguiar, M. Lettieri, S. Cunha, F. Mariaenrica. Thermal Performance of Mortars Based on Different Binders and Containing a Novel Sustainable Phase Change Material (PCM), *Materials*. 13 (2020), e2055. <https://doi.org/doi:10.3390/ma13092055>.
- [307] EDP, The price of electric in Portugal, (2025). <https://www.edp.com/pt-pt>.
- [308] Ministerio publico Portugal em Defesa da legalidade democratica, REGULAMENTO GERAL DAS EDIFICAÇÕES URBANAS, (2024). https://www.pgdlisboa.pt/leis/lei_mostra_articulado.php?artigo_id=1217A0070&nid=1217&tabela=leis&pagina=1&ficha=1&nversao=.
- [309] S. Cunha, J. Castro, J. Aguiar. Impact of gypsum mortars functionalized with phase change materials in buildings, *Journal of Energy Storage*. 72 (2023), e108608. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108608>.
- [310] Z. Jia, S. Cunha, J. Aguiar. Study on phase change materials integration in concrete: Form-stable PCM and direct addition, *Process Safety and Environmental Protection*. 189 (2024), 1293–1302. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.07.012>.
- [311] M.J. Islam, M. Shahjalal. Effect of polypropylene plastic on concrete properties as a partial replacement of stone and brick aggregate, *Case Studies in Construction Materials*. 15 (2021),

- e00627. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00627>.
- [312] P. Nath, P.K. Sarker. Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*. 130 (2017), 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.034>.