

Argamassas de Clínquer Reduzido com Cimento Reciclado para a Produção de Betão de Baixo Carbono em Construção Modular

Martim Nabais¹
José Bogas¹
Ricardo Carmo^{1,2}
Hugo Costa^{1,2}

¹ CERIS, IST-Universidade de Lisboa, Portugal

² CERIS & Coimbra Polytechnic - ISEC, Portugal

Autor correspondente: martimnabais@tecnico.ulisboa.pt

Palavras-chave

Betão de baixo carbono; cimento reciclado; argila calcinada; LC3; ecoeficiência

Resumo

O setor da construção é um dos principais responsáveis pelas emissões de CO₂, em grande medida devido ao elevado teor de clínquer no cimento. Este estudo pretende estudar matrizes cimentícias de baixo carbono através da incorporação de cimento reciclado (RC), argilas calcinadas (CC) e fíler calcário (LF), em particular em formulações do tipo LC3, com vista ao desenvolvimento de betões ecoeficientes para construção modular. Foi desenvolvido um programa experimental abrangente para avaliar as propriedades no estado fresco, o desempenho mecânico e a durabilidade. Os resultados demonstraram que as misturas LC3 + RC permitiram alcançar até 80% de redução no teor de clínquer, mantendo a resistência e melhorando a durabilidade, evidenciando o seu elevado potencial para uma construção mais sustentável.

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção é um dos principais contribuintes para as emissões globais de carbono, sobretudo devido à dependência do cimento Portland convencional. Diversos estudos têm salientado os elevados custos ambientais associados à produção de cimento e o seu papel nas emissões globais de gases com efeito de estufa [1, 2]. Para além disso, o rápido crescimento populacional e as desigualdades sociais existentes têm gerado uma procura urgente e premente por habitação adequada na sociedade contemporânea [3]. Tornam-se, assim, cruciais soluções inovadoras que respondam a estes desafios, nomeadamente através do desenvolvimento de alternativas ecoeficientes aos materiais de construção tradicionais.

A produção de cimento é responsável por cerca de 8% das emissões globais de CO₂, sobretudo devido aos processos de calcinação intensivos em energia e à decomposição do calcário [4, 5]. Face ao aumento da pressão regulamentar e às exigências sociais por práticas mais sustentáveis, o setor da construção tem vindo a direcionar-se para alternativas mais verdes. O uso de subprodutos industriais, recursos reciclados e ligantes alternativos pode contribuir de forma significativa para a redução das emissões, ao mesmo tempo que promove a conservação dos recursos naturais. Esta mudança de paradigma enquadra-se nos objetivos mais amplos da economia circular e nos esforços de mitigação das alterações climáticas.

A construção modular apresenta-se como uma via promissora para a sustentabilidade no ambiente construído. Estudos têm demonstrado a sua capacidade para reduzir resíduos de construção e melhorar a eficiência energética [1, 3]. Este método oferece igualmente a oportunidade de integrar materiais inovadores de baixo carbono em componentes modulares, reforçando o seu desempenho ambiental global. A escalabilidade e adaptabilidade da construção modular reforçam ainda mais o seu potencial enquanto pilar fundamental do desenvolvimento urbano sustentável [6].

Nos últimos anos, vários estudos têm explorado diferentes estratégias para reduzir a pegada de carbono do betão. Entre estas incluem-se a utilização de cimento reciclado, argilas calcinadas e cinzas de fundo como materiais cimentícios suplementares. A investigação tem demonstrado que estas alternativas podem substituir parcialmente o clínquer no cimento — responsável pela

maioria das suas emissões de CO₂ [2, 6, 7] — sem comprometer o desempenho. Por exemplo, o cimento reciclado termoativado, obtido a partir de resíduos de betão, tem evidenciado propriedades mecânicas e de durabilidade promissoras, tornando-se um material ecoeficiente viável [8, 9]. De forma semelhante, os cimentos de argila calcinada com filler calcário (LC3) exploram a sinergia entre a argila calcinada e o filler calcário para alcançar elevado desempenho com teores significativamente mais baixos de clínquer [10, 11]. Adicionalmente, a tecnologia LC3 permite reduzir as emissões de CO₂ em até 30% em comparação com o cimento Portland convencional [11], enquanto para o cimento reciclado se reportam reduções superiores a 60% [12].

Os avanços na ciência dos materiais estão a abrir caminho para uma construção mais sustentável. As cinzas de fundo, subproduto da combustão do carvão, têm sido utilizadas como agregado de baixo custo ou como pozolana em misturas de betão, reduzindo a dependência de recursos naturais [13]. Já o cimento reciclado, produzido através da ativação térmica de resíduos de construção, constitui outra via para a integração dos princípios da economia circular na produção de betão [5, 9, 14, 15]. Estes progressos refletem o crescente potencial dos ligantes alternativos para revolucionar a produção de betão. De facto, vários destes ligantes têm vindo a ganhar destaque pela sua capacidade de substituir o clínquer tradicional.

O principal desafio na construção modular prende-se com o facto de os betões de baixo carbono apresentarem menores teores de ligante e elevadas dosagens de materiais cimentícios suplementares, o que contraria os requisitos de betões fluidos com elevadas resistências iniciais. A integração de betões de baixo carbono na construção modular representa, por isso, um passo transformador rumo a infraestruturas mais sustentáveis. O presente estudo insere-se num projeto de investigação que explora a sinergia entre diferentes materiais ecoeficientes — como o cimento reciclado, as argilas calcinadas e as cinzas de fundo — para desenvolver ligantes de baixo carbono com fatores de clínquer inferiores a 20%, sem comprometer de forma significativa o desempenho mecânico e a durabilidade. Neste contexto, a combinação destes materiais foi analisada pela primeira vez, considerando a produção e a caracterização mecânica e de durabilidade de argamassas. A eficiência e a compatibilidade da construção modular com estes materiais ampliam ainda mais o seu potencial enquanto solução para um desenvolvimento ecoeficiente. Esta convergência de materiais e métodos inovadores reforça a urgência e a viabilidade de uma transição para um ambiente construído mais sustentável.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1. MATERIAIS

Para este estudo, foram selecionados o CEM I 52.5R (PC), cimento reciclado (RC), argila calcinada (CC), cinza de fundo (BA), cinza volante (FA) e filler calcário comercial (LF), com o objetivo de desenvolver e produzir uma nova geração de ligantes verdadeiramente de baixo carbono. Estes ligantes foram incorporados em argamassas produzidas igualmente com areia siliciosa natural, cujas propriedades se encontram apresentadas na Tabela 1. Foi ainda utilizado um superplastificante à base de policarboxilato, de forma a ajustar a trabalhabilidade das argamassas frescas para as mesmas gamas de consistência.

Tabela 1 - Propriedades dos agregados utilizados

Ensaio	Norma	Areia Grossa 0/4	Areia Fina 0/2
Massa Volúmica (kg/m ³)	EN 1097-6 [16]	2599	2598
Absorção de água às 24h (%)	EN 1097-6 [16]	0.26	0.15
Baridade (kg/m ³)	EN 1097-3 [17]	1594	1507

A produção do cimento reciclado iniciou-se com a preparação da pasta original (OP), produzida com uma relação água/ligante (a/l) de 0,55, apresentando uma resistência à compressão média de aproximadamente 35 MPa aos 28 dias. Após a produção, a OP foi submetida a cura em ambiente controlado, com 95% de humidade relativa, durante sete dias. Posteriormente, o material foi armazenado em condições laboratoriais normais por um período superior a 90 dias, de modo a garantir a sua estabilização. Decorrido este tempo, a OP foi sujeita a uma série de processos mecânicos destinados a reduzir o tamanho das partículas. Inicialmente, a pasta foi fragmentada em pedaços com cerca de 7 cm, recorrendo a britadeiras de maxilas com aberturas variáveis. Estes fragmentos foram depois processados num moinho de rolos, obtendo-se partículas inferiores a 2 mm. Seguidamente, o material foi refinado num moinho de bolas, durante aproximadamente duas horas, originando partículas finas que foram peneiradas através de uma malha de 250 µm para assegurar uniformidade.

A ativação térmica da pasta moída foi realizada num forno horizontal. Este procedimento baseou-se em estudos anteriores, nos quais se verificou uma desidratação eficaz das partículas de OP sem ocorrência significativa de descarbonatação [15, 18]. O processo envolveu um regime de aquecimento controlado, iniciado com um incremento de 10 °C por minuto até 150 °C, temperatura mantida durante uma hora. De seguida, o aquecimento prosseguiu à mesma taxa até atingir a temperatura-alvo de 650 °C, permanecendo nesse patamar durante três horas para garantir a ativação completa. Após o ciclo de aquecimento, o ligante foi arrefecido gradualmente no interior do forno até à temperatura ambiente, prevenindo choques térmicos e assegurando a estabilidade do material.

As propriedades principais dos ligantes utilizados encontram-se apresentadas na Tabela 2. A argila calcinada (CC) apresentava um teor de metacaulino de 56%.

Tabela 2 - Caracterização dos ligantes

Ensaio	Norma	PC	RC	CC	BA	LF	FA
Massa volúmica (g/m ³)	-	3.10	3.00	2.65	2.23	2.61	2.3
Área superficial BET (m ² /g)	-	2.08	14.29	15.71	7.08	2.13	1.88
Índice de atividade aos 28 dias (%)	EN 196-1 [19]	-	-	105	69.1	-	74.9
Índice de atividade aos 90 dias (%)		-	-	-	84.1	-	-
Resíduo insolúvel (%)	EN 196-2 [20]	1.45	<0.52	-	-	-	84.92
Perda ao fogo (950°C) (%)		2.55	8.41	-	5.34	-	2.69
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)		20.1 + 4.9 + 2.8	19.1 + 5.1 + 3.00	59.3 + 33.5 + 3.22	59.4 + 20.1 + 7.0	0.1 + 0.1 + 0.04	56.5+ 22.7 + 7
CaO+MgO (%)		62.9+1.7	60.8+1.8	0.1+0.2	1.9+1.7	55.4+0.3	2.9+1.6
CaO livre (%)	EN 451-1 [21]	-	13.94	-	-	98.9	-
Tempo de presa (min)	Início	EN 196-3 [22]	118	290	-	-	-
	Fim	[22]	162	385	-	-	-

2.2. COMPOSIÇÕES E PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS

Neste estudo, as argamassas foram preparadas com uma relação em peso cimento/areia de 1:3, de acordo com as orientações da norma EN 196-3 [22]. Foram utilizadas areias fina e grossa numa proporção de 35:65 em peso. Todas as argamassas foram produzidas com a mesma relação a/l (0,45), variando apenas a dosagem do superplastificante para atingir os valores de espalhamento pretendidos, em conformidade com a EN 1015-3 [23], na gama de aproximadamente 160±10 mm. As composições das misturas produzidas encontram-se apresentadas na Tabela 3, sendo igualmente indicada a relação a/c equivalente, considerando apenas o teor de cimento utilizado.

Foram desenvolvidas cerca de 27 misturas distintas, abrangendo argamassas com várias combinações de matrizes cimentícias. Estas combinações foram concebidas para avaliar as contribuições individuais e conjuntas de cada componente. A seleção das misturas baseou-se em ensaios experimentais e em estudos anteriores [5, 8, 11, 13, 24, 25]. Assim, foram produzidas misturas binárias com diferentes teores de LF (5, 10, 15, 20%), RC (20, 30, 40%), CC (10, 20, 30, 40, 45, 60%) e BA (20, 30, 40, 60%), de forma a avaliar a influência de cada adição. Argamassas de referência, compostas apenas por PC (100% PC) e por 60% PC + 40% FA, foram igualmente produzidas para efeitos de comparação. Nas misturas com maiores teores de CC e/ou RC verificou-se um aumento da necessidade de água, exigindo dosagens superiores de superplastificante.

A incorporação simultânea de CC e LF seguiu a filosofia desenvolvida no conceito LC3 [11, 24, 26]. De acordo com a literatura, a proporção preferencial entre LF e CC deverá ser de aproximadamente 1:2, antecipando reduções de clínquer em torno de 50%. Neste estudo, foram consideradas soluções variando entre 1:2 e 1:3, com substituições de clínquer de 45% a 60%. Como principal inovação deste trabalho, foram ainda desenvolvidas argamassas ternárias e quaternárias com substituição adicional de PC por RC, permitindo reduções significativamente mais elevadas no teor de clínquer e visando a obtenção de misturas efetivamente mais sustentáveis. O objetivo consiste em alcançar soluções de baixo carbono sem comprometer em excesso as propriedades

benéficas do clínquer e a eficiência das adições pozolânicas, que requerem dosagens mínimas para ativar e desenvolver produtos de hidratação semelhantes aos do cimento. Importa salientar que também foram produzidas argamassas “verdes”, caracterizadas por 0% de clínquer e pela utilização integral de adições minerais e produtos reciclados.

Tabela 3 - Composição das argamassas produzidas (% por peso de ligante)

Designação	a/c eq.	PC (%)	CC (%)	LF (%)	RC (%)	BA (%)	FA (%)
PC	0.45	100%	0%	0%	0%	0%	0%
5LF	0.47	95%	0%	5%	0%	0%	0%
10LF	0.50	90%	0%	10%	0%	0%	0%
15LF	0.53	85%	0%	15%	0%	0%	0%
20LF	0.56	80%	0%	20%	0%	0%	0%
20RC	0.56	80%	0%	0%	20%	0%	0%
30RC	0.64	70%	0%	0%	30%	0%	0%
40RC	0.75	60%	0%	0%	40%	0%	0%
10CC	0.50	90%	10%	0%	0%	0%	0%
20CC	0.56	80%	20%	0%	0%	0%	0%
30CC	0.64	70%	30%	0%	0%	0%	0%
40CC	0.75	60%	40%	0%	0%	0%	0%
45CC	0.82	55%	45%	0%	0%	0%	0%
60CC	1.13	40%	60%	0%	0%	0%	0%
30CC10LF	0.75	60%	30%	10%	0%	0%	0%
30CC15LF	0.82	55%	30%	15%	0%	0%	0%
40CC20LF	1.13	40%	40%	20%	0%	0%	0%
30CC10RC15LF	1.00	45%	30%	15%	10%	0%	0%
30CC20RC15LF	1.29	35%	30%	15%	20%	0%	0%
40CC20RC20LF	2.25	20%	40%	20%	20%	0%	0%
30CC40RC15LF	3.00	15%	30%	15%	40%	0%	0%
40CC40RC20LF	-	0%	40%	20%	40%	0%	0%
40FA	0.75	60%	0%	0%	0%	0%	40%
20BA	0.56	80%	0%	0%	0%	20%	0%
30BA	0.64	70%	0%	0%	0%	30%	0%
40BA	0.75	60%	0%	0%	0%	40%	0%
60BA	1.13	40%	0%	0%	0%	40%	0%

2.3. METODOLOGIAS DE ENSAIO

A caracterização das argamassas foi dividida em duas fases: estado fresco e estado endurecido. Para a caracterização no estado fresco, realizaram-se ensaios de massa volúmica espalhamento. O espalhamento foi avaliado de acordo com a EN 1015-3 [23]. A massa volúmica foi determinada diretamente nos moldes, de forma a garantir as mesmas condições de compactação.

A caracterização mecânica das argamassas, através de ensaios de resistência à flexão e à compressão, foi realizada em provetes prismáticos de 160×40×40 mm, de acordo com a EN 196-1 [19]. Após 24 horas, os provetes foram desmoldados e curados em câmara húmida (95% HR) até às idades de ensaio, nomeadamente 1, 3, 7 e 28 dias.

A absorção capilar foi avaliada segundo a EN 1015-18 [27]. Para tal, três provetes serrados de 80×40×40 mm foram curados em meio húmido durante 7 dias, seguidos de 21 dias a 65±5% de HR, e posteriormente secos em estufa a 60 °C até peso constante. As superfícies serradas de cada provete foram imersas numa lâmina de água de 5 ± 1 mm. A massa dos provetes foi registada aos 10, 20 e 30 minutos e, subsequentemente, às 1, 2, 6, 24, 48 e 72 horas após o primeiro contacto com a água. O coeficiente de absorção capilar (C_{abs}) foi determinado como a inclinação da regressão linear dos dados de absorção entre $\sqrt{20}$ minutos e $\sqrt{6}$ horas.

A resistência à carbonatação foi determinada de acordo com a LNEC E 391 [28], utilizando provetes de 80×40×40 mm. Estes foram curados em meio húmido até 7 dias, seguidos de 21 dias a 65±5% HR. Aos 28 dias, as faces superior e inferior de cada provete foram seladas com uma tinta epoxídica, garantindo que a carbonatação ocorria exclusivamente por difusão radial de CO₂. Os provetes foram depois colocados numa câmara de carbonatação acelerada, a 23 ± 3 °C, 65 ± 5% HR e com concentração de CO₂ de 5 ± 0,1%. Aos 7, 28, 56 e 91 dias, um provete de cada composição foi retirado da câmara, dividido em quatro partes e as superfícies fraturadas pulverizadas com uma solução de fenolftaleína a 0,2%. A profundidade de carbonatação foi determinada como a média do comprimento da região incolor, correspondente a pH inferior a 9. Assumindo condições de ensaio estáveis ao longo do tempo, o coeficiente de carbonatação (K_{ca}) foi calculado como a inclinação da regressão linear da profundidade de carbonatação entre 0 e 90 dias.

A resistência à penetração de cloretos foi avaliada através do *Rapid Chloride Migration Test* (RCMT), de acordo com a NT Build 492 [29]. Para cada mistura, foram ensaiadas três amostras de Ø100×50 mm, extraídas de cilindros de Ø100×250 mm. Os provetes foram curados em câmara húmida até 7 dias e depois a 65 ± 5% HR até às idades de ensaio, de 28 e 90 dias. Antes do ensaio, os provetes foram saturados a vácuo numa solução de hidróxido de cálcio durante 24 horas. Durante o ensaio, aplicou-se uma diferença de potencial elétrico externo (U, V) durante um tempo definido (t, h), promovendo a migração de iões cloreto a partir da solução anódica para o interior do provete de espessura L (mm). Após o ensaio, o provete foi fraturado em duas metades e pulverizado com uma solução de nitrato de prata 0,1 M, permitindo determinar a profundidade de penetração dos cloretos (X_d , (mm)). Por fim, o coeficiente de migração de cloretos ($Dcl_{RCMT} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) foi calculado de acordo com a NT Build 492 [29].

3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os resultados médios das principais propriedades analisadas neste estudo encontram-se apresentados na Tabela 4. A análise da evolução da resistência ao longo do tempo e da durabilidade baseia-se em apenas algumas misturas selecionadas, capazes de refletir a influência de cada uma das adições estudadas.

3.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência mecânica não foi significativamente afetada até 10% de LF, diminuindo depois proporcionalmente com o teor de LF, como resultado da diluição de clínquer, conforme também reportado por Matschei [30].

O cimento reciclado (RC) demonstrou excelente capacidade de hidratação, permitindo substituições até 40% sem alterações relevantes na resistência à compressão. A resistência, em comparação com o PC, variou com o nível de incorporação, observando-se uma ligeira redução para 20% RC (-3%) e 40% RC (-8%), enquanto se verificou um aumento para 30% RC (+7%). De facto, apenas a argamassa com 30% RC apresentou um teor de vazios semelhante ao da argamassa de referência com PC (Tabela 4). Neste caso, a mistura com 30% RC beneficiou ainda da utilização de um maior teor de superplastificante, que facilitou a dispersão do RC e a sua hidratação subsequente. Por outro lado, a argamassa com 40% RC revelou elevada necessidade de água, dificultando uma compactação eficaz. Ainda assim, confirma-se a adequação do RC como substituto direto do PC, conforme também observado noutros estudos [8, 31].

A substituição de PC por até 30% de CC conduziu a aumentos de resistência até 5%, em linha com o índice de atividade superior a 1,0 apresentado na Tabela 2. Este resultado confirma a elevada reatividade pozolânica da CC utilizada neste estudo, com desempenho comparável ao do cimento. Para teores de substituição superiores a 40%, os resultados foram influenciados pela diluição de clínquer. Contudo, a redução da resistência para 40% CC (-7%) e, sobretudo, para 45% CC (-19%) foi inesperadamente elevada, tendo em conta que a resistência para 60% CC foi semelhante à da argamassa com 45% CC. Uma possível explicação para esta redução prende-se com a menor compacidade da mistura com 45% CC, cujo teor de vazios excedeu os 7%.

Entre as adições não inertes, a FA e a BA revelaram ser as menos reativas, conduzindo às maiores reduções de resistência. A sua baixa reatividade inicial explica os reduzidos índices de atividade. Neste estudo, as perdas de resistência foram inferiores às sugeridas pelos índices de atividade, registando-se reduções de 20%, 30% e 53% para substituições de PC por BA de 30%, 40% e 60%, respetivamente. Uma razão para este desempenho aparentemente superior foi a maior compacidade alcançada nestas

argamassas, que apresentaram menor teor de vazios. Tal como sugerido pelas diferenças no índice de atividade, a reatividade da FA mostrou-se ligeiramente superior à da BA, resultando numa redução de apenas 25% para 40% de FA.

Estas argamassas foram produzidas com um baixo fator de clínquer, para teores de adição entre 40% e 100%. As misturas do tipo LC3, com substituição de PC por 30% de CC e 10 a 15% de LF, resultaram em resistências semelhantes (+2%) ou ligeiramente inferiores (-7%) à da argamassa de referência com 100% de PC. Neste estudo, os melhores resultados foram obtidos para a combinação 30% CC e 10% LF (3:1), embora as diferenças fossem pequenas. As resistências registadas foram comparáveis às das argamassas contendo apenas 10–15% LF ou 30% CC, indicando que a sinergia entre ambas as adições permitiu reduzir o fator de clínquer sem comprometer o desempenho mecânico. Quando os teores de CC e LF foram aumentados para 40% e 20%, respetivamente, mantendo a mesma proporção de 2:1, ocorreu uma redução adicional de 6% na resistência. Ainda assim, em comparação com a argamassa de referência, apenas se observou uma redução de 12% na resistência, ao mesmo tempo que se obteve uma redução de 60% no teor de cimento.

Com vista ao desenvolvimento de argamassas ainda mais sustentáveis, com fatores de clínquer reduzidos, o PC foi substituído por 10% a 40% de RC em misturas LC3. Na argamassa 30CC15LF, a substituição de até 20% de PC por RC não afetou a resistência à compressão. Apenas para 40% RC se verificou uma redução de 5%, provavelmente devido à maior dificuldade de compactação desta argamassa (Tabela 4). Estes resultados são altamente promissores, uma vez que foi possível alcançar soluções com apenas 35% e 15% de cimento, para reduções de resistência de apenas 7% e 11%, respetivamente, face à argamassa de referência com PC. De facto, com base nestes resultados, conclui-se que a incorporação de RC em misturas LC3 não afeta negativamente a resistência. Admitindo que o desempenho mecânico das misturas LC3 é comparável ao das argamassas com PC, torna-se possível produzir argamassas com mais de 80% de redução de clínquer, mantendo a performance mecânica.

A mesma abordagem foi aplicada a misturas com 40% de CC e 20% de LF, tendo-se verificado que a substituição de PC por 20–40% de RC conduziu a uma redução adicional de 22% na resistência. Esta redução foi idêntica tanto para 20% como para 40% RC. Neste caso, seria expectável uma redução mais moderada, em linha com o que foi observado para a série 30CC15LF. Esta discrepância pode estar associada à maior dificuldade em dispersar o ligante, bem como a desafios na homogeneização e compactação destas misturas, que apresentam teores elevados de CC e RC, ambos com elevada exigência hídrica.

Ainda assim, é relevante salientar que foram produzidas argamassas com resistências superiores a 40 MPa (para uma redução de 32% na resistência), na total ausência de clínquer. Isto representa um avanço significativo na produção de betões verdadeiramente verdes, com substanciais reduções de CO₂. Mesmo desconsiderando o facto de tanto o RC como a CC exigirem menos energia térmica no seu fabrico (aproximadamente metade da temperatura de processamento), a não descarbonatação destas matérias-primas resulta numa redução de mais de 60% das emissões de CO₂ em comparação com o cimento [12, 25]. Nestes moldes, misturas isentas de clínquer, contendo 20% LF, 40% CC e 40% RC, podem conduzir a uma redução de aproximadamente 70% nas emissões de CO₂.

Como já referido, confirma-se que as misturas contendo BA apresentam um desenvolvimento de resistência mais lento, devido à sua menor reatividade pozolânica em idades iniciais. Apenas a longo prazo se espera que a resistência se aproxime da argamassa de referência. Por outro lado, a argila calcinada evidenciou um desenvolvimento mais rápido da resistência, particularmente entre 1 e 3 dias de idade [24, 32]. De facto, a razão entre a resistência aos 3 dias e a resistência aos 28 dias foi idêntica tanto na argamassa de referência como naquela com 40% de CC.

Tal como reportado em estudos anteriores [33, 34], a argamassa com 40% RC apresentou um desenvolvimento de resistência mais lento até 1 dia de idade, acelerando posteriormente até aos 3 dias. Finalmente, a mistura 30CC40RC15LF revelou um desenvolvimento mais lento da resistência até aos 7 dias, devido às reações retardadas associadas ao CC e ao RC. Este efeito é particularmente evidente ao 1.^o dia, quando o CC e o RC se encontram apenas no início das suas reações de hidratação.

3.2. RESISTÊNCIA À FLEXÃO

De forma geral, confirmam-se as mesmas tendências observadas na resistência à compressão, particularmente no que diz respeito à redução de resistência para níveis de substituição de PC superiores a 10% de LF, 30% de CC, e à incorporação de FA e BA. Em comparação com a resistência à compressão, as diferenças entre as composições foram menores, o que está em concordância com o facto de a resistência à tração variar aproximadamente com a raiz quadrada da resistência à compressão. A perda de resistência nas argamassas com 40% de BA e FA foi mais moderada, mantendo-se abaixo de 15% e 17%, respetivamente, relativamente à argamassa de referência com PC.

Tabela 4 - Resultados obtidos

Designação	SP (%)	Espalhamento (mm)	Massa vol. fresca	Vol. vazios	Resistência mecânica								Durabilidade			
			ρ_{fresca} (kg/m ³)	Vv (%)	$f_{c,1d}$ (MPa)	$f_{ctm,1d}$ (MPa)	$f_{c,3d}$ (MPa)	$f_{ctm,3d}$ (MPa)	$f_{c,7d}$ (MPa)	$f_{ctm,7d}$ (MPa)	$f_{c,28d}$ (MPa)	$f_{ctm,28d}$ (MPa)	C_{abs} (mm/min ^{0.5})	K_{ca} (mm/year ^{0.5})	$Dcl_{RCMT,28d}$ (x10 ⁻¹² m ² /s)	$Dcl_{RCMT,90d}$ (x10 ⁻¹² m ² /s)
PC	0.1	150.7	2220	3.9	32.5	5.12	47.1	6.2	47.4	6.5	59.1	7.4	175.4	17.10	11.0	10.7
PC5LF	0.4	176.7	2205	4.3							59.5	7.4				
PC10LF	0.4	158.0	2204	4.2							59.6	7.6				
PC15LF	0.2	155.3	2183	5.0							53.2	7.2	206.6	17.70	12.9	
PC20LF	0.2	156.7	2189	4.6							51.8	6.6				
20RC	1.4	167.7	2168	5.7							57.2	7.3	94.8	15.30	11.4	11.0
30RC	1.6	154.3	2197	4.3							63.2	7.5				
40RC	2.6	160.0	2123	7.2	27.4	4.90	44.3	6.4	42.9	6.2	54.5	6.7	35.7	15.60	10.3	9.2
10CC	0.5	157.3	2196	4.5							61.4	7.4				
20CC	1	148.7	2192	4.3	22.7	4.52	35.8	5.4			62.0	7.7	165.7	18.00	3.4	2.8
30CC	1	146.7	2181	4.5							61.9	7.0				
40CC	1.5	154.3	2148	5.6							54.8	6.3	120.5	39.70	3.0	1.7
45CC	1.9	180.0	2102	7.4							48.2	6.4	124.6	58.90	4.7	
60CC	2.6	161.3	2156	4.4							47.0	6.0	183.5	106.60	4.7	4.3
30CC10LF	0.9	157.7	2178	4.4							60.2	8.1				
30CC15LF	0.9	177.0	2159	5.1							55.3	8.1	121.3	62.28	3.2	2.1
40CC20LF	0.7	149.7	2152	5.0							52.1	8.1	182.4	74.13		1.5
30CC10RC15LF	1.4	148.3	2136	5.9							54.2	7.4				
30CC20RC15LF	2.1	167.0	2154	4.9							54.8	8.4	127.8	68.59		1.0
40CC20RC20LF	3.1	165.3	2122	5.7							40.6	6.9	140.2	93.61		1.2
30CC40RC15LF	3.7	174.0	2132	5.4	4.4	1.18	27.9	4.3	46.1	6.3	52.5	6.7	101.3	55.47	1.0	0.8
40CC40RC20LF	3.8	158.3	2105	6.1							40.4	6.0	278.7	81.81	2.7	1.4
40FA	0.2	189.0	2184	3.2							44.5	6.3	280.8	55.58	11.2	7.2
20BA	0.1	148.0	2215	2.9							54.8	7.2	174.6	20.78	10.1	7.4
30BA	0.2	170.7	2196	3.0							47.5	6.6				
40BA	0.2	160.3	2180	3.1	15.2	3.52	26.1	4.4	33.2	4.5	41.3	6.5	280.8	51.25	11.6	11.5
60BA	0	159.0	2161	2.8							27.7	4.4	499.0	109.00	17.0	10.7

No caso da substituição por CC, mesmo para uma incorporação de 60%, a perda de resistência foi inferior a 19%. Confirmam-se os resultados anómalos obtidos para 40–45% de CC. Por outro lado, apenas para 40% de PC substituído por RC se verificou uma ligeira redução da resistência (10%). A elevada reatividade do RC é confirmada, tendo-se observado mesmo um aumento de 2% na resistência para 30% de RC.

Para as misturas ternárias e quaternárias, os resultados foram geralmente consistentes com os observados para a resistência à compressão. Destaca-se que as misturas LC3 apresentaram desempenho superior à argamassa de PC, tanto para 30% como para 40% de CC. A incorporação adicional de até 20% de RC teve pouco impacto na resistência, garantindo sempre valores superiores aos da argamassa de referência. Isto significa que foi possível atingir uma redução de 65% no teor de cimento sem comprometer o desempenho mecânico das argamassas. Tal como verificado na resistência à compressão, a incorporação simultânea de RC, 40% de CC e 20% de LF resultou numa performance ligeiramente inferior. No entanto, foi possível produzir misturas com apenas 15% de PC ou até sem PC, com reduções de resistência de apenas 9% e 19%, respetivamente, em comparação com a argamassa de referência com PC. Estes resultados, em conjunto com os obtidos para a resistência à compressão, são altamente promissores, validando a possibilidade de produção de soluções estruturais totalmente livres de cimento.

3.3. ABSORÇÃO CAPILAR

A absorção capilar é principalmente influenciada pela relação água/ligante efetiva e pela quantidade, distribuição e conectividade dos poros. A substituição de PC por 15% de LF conduziu ao esperado aumento do coeficiente de absorção (18%), consequência da diluição do teor de clínquer e da consequente redução do volume de produtos de hidratação formados. Por outro lado, a substituição de PC por RC reduziu progressivamente a absorção capilar em 46% e 80% para teores de 20% e 40% RC, respetivamente. Tendência semelhante foi observada por Carriço [31] em argamassas com relação água/ligante de 0,6 e até 50% de RC. Este fenómeno é explicado pelo facto de a matriz com RC apresentar uma microestrutura mais refinada, composta por um maior volume de poros finos e, consequentemente, menor absorção capilar [34]. Por outras palavras, embora a porosidade total se mantenha semelhante, esta distribui-se por um número superior de poros de menor dimensão [33].

Tal como observado no capítulo anterior, após 3–7 dias, a CC apresenta elevada reatividade, promovendo a formação de produtos de hidratação adicionais. Este processo resulta em estruturas mais refinadas, associadas a poros de maior tortuosidade e menor conectividade [35]. Confirma-se, assim, uma redução progressiva da porosidade acessível à água e da taxa de absorção capilar para teores de substituição de PC até 45% CC. No entanto, para 60% CC, a taxa de absorção inverte a tendência, atingindo valores 5% superiores aos da argamassa de referência com PC. Este resultado confirma a limitação do desenvolvimento adicional de hidratação em teores de substituição superiores a ~40%, já anteriormente discutida. Neste caso, o excesso de CC não é devidamente consumido devido à insuficiência de PC, resultante da elevada diluição do clínquer. A maior redução de absorção capilar (31%) foi obtida com 40% de CC.

Nas misturas LC3, com ou sem RC, observou-se uma redução global e expectável da taxa de absorção, sobretudo quando se combinam 30% CC e 15% LF. Apesar do menor teor de PC e CC, o coeficiente de absorção da mistura 30CC15LF foi semelhante ao de 40CC e PC15LF, sugerindo um efeito sinérgico entre estas adições. Além disso, a substituição parcial de PC por RC (30CC20RC15LF e 30CC40RC15LF) manteve ou melhorou ligeiramente o desempenho, com aumento de 5% para 20% RC e diminuição de 16% para 40% RC. Mais uma vez, o RC demonstrou a sua capacidade de refinar adicionalmente a microestrutura. Importa salientar que CC e RC introduzem diferentes mecanismos de refinamento: a CC atua pela formação de produtos de hidratação adicionais dentro da matriz existente, enquanto o RC contribui inicialmente pela redução dos espaços intergranulares [34].

De forma global, a mistura 30CC40RC15LF apresentou o melhor desempenho, reduzindo a taxa de absorção em 42% face à argamassa de referência com PC, utilizando apenas 15% de cimento. Tal como verificado para a resistência à compressão, as argamassas com 40% CC e 20% LF revelaram desempenhos inferiores. A excessiva diluição do clínquer, associada a uma relação CC/clínquer demasiado elevada, bem como a menor compactação no estado fresco, justificam esta redução de desempenho, particularmente na mistura 40CC40RC20LF. Ainda assim, destaca-se o facto de esta mistura, apesar de apresentar uma absorção capilar 59% superior, ter sido produzida sem recurso a PC.

No que respeita à utilização de BA, verificou-se um aumento da absorção capilar com a sua incorporação, especialmente para teores superiores a 20%. Este comportamento indica que, à idade de ensaio (cerca de 45 dias), a BA ainda não desenvolveu reatividade suficiente para compensar a elevada diluição do clínquer, resultando em maior absorção capilar. Nestes casos, o coeficiente de absorção foi entre 1,6 e 2,4 vezes superior ao da argamassa de referência com PC (Tabela 4). Confirma-se, assim, que a reatividade da mistura com 60% BA é fortemente comprometida pelo baixo teor de clínquer no sistema.

3.4. RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

O coeficiente de difusão aos 28 e 90 dias variou entre $1,0$ e $12,9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ e $0,8$ e $11,0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, respetivamente. De acordo com a classificação de Gjorv [36], estes valores enquadram os betões na gama de resistência moderada ($10\text{--}15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) a extremamente elevada ($<2,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) à penetração de cloretos. O valor de $D_{cl_{RCMT}}$ aos 28 dias para a argamassa de referência com PC foi de $11 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, consistente com os valores reportados por Bogas [37] e pelo fib 34 [38] para betões com CEM I e relação a/c de 0,45 ($10,7$ e $11,2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, respetivamente). A substituição parcial de PC por 15% de LF aumentou o $D_{cl_{RCMT}}$ em 17%, em linha com os resultados de absorção.

A substituição parcial de PC por até 40% de RC teve impacto mínimo no $D_{cl_{RCMT}}$. Aos 28 dias, o coeficiente de difusão aumentou 3% para 20% RC e diminuiu 7% para 40% RC. Este comportamento pode ser explicado pelo facto de, ao contrário do ensaio de absorção, poros muito finos poderem contribuir para o ensaio de migração. Como a matriz com RC apresenta porosidade semelhante, mas mais refinada, a absorção diminui, enquanto a difusão — que depende sobretudo do volume e da interconectividade dos poros, e não tanto da sua dimensão [39, 40] — se mantém praticamente inalterada. As pequenas variações observadas deveram-se principalmente a diferenças de compactação após a moldagem e a dificuldades de dispersão do ligante em misturas mais secas.

A incorporação de até 60% de CC reduziu significativamente o coeficiente de difusão, enquadrando as argamassas na categoria de “elevada resistência à penetração de cloretos” ($<5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$), segundo Gjorv [36]. A maior redução foi obtida para 40% de CC, com valores de $D_{cl_{RCMT}}$ aos 28 e 90 dias 77% e 84% inferiores, respetivamente, aos da argamassa com PC. A relevância da CC no refinamento microestrutural e no aumento da durabilidade é destacada por Sabir [35] e Maraghechi [41].

Por outro lado, a substituição parcial de PC por FA e BA teve impacto limitado aos 28 dias, mas reduziu o $D_{cl_{RCMT}}$ em até 33% aos 90 dias. Este comportamento deve-se ao baixo índice de atividade pozolânica da BA e da FA aos 28 dias, o que condiciona uma contribuição mais significativa a longo prazo. Tal facto é ainda mais relevante considerando que as argamassas foram curadas apenas 7 dias em água. Assim, para adições pozolânicas de reações lentas, é mais adequado realizar ensaios de difusão aos 90 dias. Mesmo assim, aos 28 dias, a ação da BA e da FA compensou o aumento da porosidade destas argamassas, associado à menor resistência mecânica e maior absorção em idades iniciais. Tal como no caso da CC, estes resultados não se explicam apenas pelo refinamento de poros, mas também pela composição da solução intersticial.

As misturas LC3 apresentaram o melhor desempenho, beneficiando da sinergia entre CC e LF na formação adicional e faseada de produtos de hidratação, em particular carboaluminatos e hemicarboaluminatos [42]. Comparadas com a argamassa de referência com PC, misturas ternárias com 30–40% de CC e 15–20% de LF alcançaram reduções de 81–87% aos 90 dias, apresentando comportamento semelhante à argamassa com 40% de CC. Estas argamassas são classificadas como de “resistência extremamente elevada à penetração de cloretos” ($<2,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$), segundo Gjorv [36]. Conforme referido, a microestrutura mais refinada das misturas LC3 traduz-se em menor permeabilidade e maior durabilidade, reduzindo a penetração de cloretos e aumentando a resistividade do betão [24, 43], para além da alteração na composição da solução intersticial.

Finalmente, a substituição de PC por até 40% de RC reduziu ainda mais a difusão nas misturas LC3. Neste caso, os coeficientes de difusão foram de apenas $1,0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, uma ordem de grandeza inferior ao da argamassa de referência. O $D_{cl_{RCMT}}$ variou de forma pouco significativa para CC entre 30–40% e RC entre 20–40%. Importa sublinhar que soluções com elevada durabilidade face à penetração de cloretos foram obtidas sem incorporação de clínquer. Este estudo confirma, assim, que o cimento reciclado constitui uma substituição viável do cimento convencional, pelo menos até 40% de incorporação, assegurando resistências mecânicas e durabilidade semelhantes.

3.5. CARBONATAÇÃO

Consoante o tipo de mistura de ligantes, o coeficiente de carbonatação (K_c) variou significativamente entre 15,3 e 109 $\text{mm/ano}^{0.5}$. Observa-se que a progressão da carbonatação é aproximadamente proporcional à raiz quadrada do tempo, o que está de acordo com a evolução deste mecanismo em matrizes cimentícias, segundo a primeira lei de Fick, desde que não sejam significativamente afetadas pela distribuição de humidade [44].

Como esperado, a argamassa de PC apresentou um dos valores mais baixos de K_c (17,1 $\text{mm/ano}^{0.5}$), devido à sua reduzida relação a/c e elevada reserva de material carbonatável. O valor obtido é semelhante ao reportado no fib 34 [38], que indica 17,2 $\text{mm/ano}^{0.5}$ para cimentos do Tipo I com a/c de 0,45. A incorporação de 15% de LF levou a um aumento natural do K_c , associado

a uma ligeira elevação da porosidade e à diluição da quantidade de material carbonatável. Um resultado relevante foi observado com a substituição parcial de PC por até 40% de RC, onde se registou uma ligeira redução (~10%) na taxa de carbonatação.

Nas argamassas com CC, verificou-se um aumento significativo da taxa de carbonatação à medida que a proporção de PC substituído por CC aumentava. O coeficiente de carbonatação aumentou 2,3 e 6,2 vezes para 40% e 60% de CC, respetivamente, o que limita o uso excessivo desta adição em determinadas aplicações. Contudo, para substituições até 20%, a taxa de carbonatação aumentou apenas 5%. Como já referido, a argamassa com 45% de CC foi também afetada por uma redução da compacidade após a produção.

A adição de BA e FA resultou num efeito semelhante ao da CC, embora conduzindo a taxas de carbonatação ainda mais elevadas. Tal deve-se principalmente à menor capacidade destas adições para refinar a microestrutura, permitindo maior difusão de CO₂. O aumento da carbonatação em betões com cinzas volantes tem sido amplamente reportado na literatura [44, 45]. Em comparação com a argamassa de referência de PC, a taxa de carbonatação aumentou 1,2, 3,0 e 6,4 vezes para 20%, 40% e 60% de BA, respetivamente. A argamassa com FA apresentou desempenho semelhante à de BA para os mesmos níveis de substituição.

As misturas LC3 (30CC15LF e 40CC20LF) revelaram menor resistência à carbonatação, atingindo taxas de carbonatação aproximadamente 3,6–4,3 vezes superiores às da argamassa com PC. A taxa de carbonatação da mistura 30CC15LF foi ainda superior à da mistura com 40% de CC, apesar de apresentarem efeitos semelhantes ao nível do comportamento mecânico.

A substituição parcial de PC por RC em misturas LC3 não seguiu sempre a mesma tendência. Nas misturas 40CC20LF, a incorporação de RC aumentou a taxa de carbonatação entre 10–26%. No entanto, nas misturas 30CC15LF, o K_c aumentou 10% para 20% de RC, mas diminuiu 11% para 40% de RC. Estas últimas argamassas apresentaram maior refinamento da porosidade, sobretudo com 40% de RC, o que terá compensado, em certa medida, a redução significativa de CH.

4. COCLUSÕES

A integração de betões de baixo carbono na construção modular representa um passo transformador rumo a uma infraestrutura mais sustentável. A utilização de materiais alternativos, como cimento reciclado (RC), argilas calcinadas (CC) e cinzas de fundo (BA), permite reduzir a pegada ambiental da indústria da construção, ao mesmo tempo que responde às crescentes exigências do setor. A eficiência da construção modular, aliada à compatibilidade destes materiais, amplia o seu potencial como solução para um desenvolvimento ecoeficiente. Alguns destes “betões verdes” apresentam resistências suficientemente elevadas nos primeiros dias, possibilitando a sua aplicação em elementos prefabricados sem alterações significativas no método tradicional de produção. Outros, com desenvolvimento mais lento de resistência, exigem adaptações na linha de fabrico para viabilizar a sua utilização em construção modular.

O RC revelou um excelente potencial como substituto parcial do clínquer, mantendo a resistência mecânica e contribuindo significativamente para o refinamento da microestrutura. Excetuando o comportamento face à carbonatação, as misturas que combinam LC3 com RC demonstraram um desempenho notável, alcançando reduções substanciais de clínquer sem comprometer as propriedades mecânicas e de durabilidade. Contudo, o dimensionamento de betões com estes ligantes deve ser ajustado em função da resistência à carbonatação. Os resultados obtidos confirmam a viabilidade das formulações LC3 + RC, capazes de atingir reduções superiores a 80% no teor de clínquer, representando uma inovação chave no desenvolvimento de materiais cimentícios verdadeiramente sustentáveis.

Agradecimentos

O presente trabalho de investigação foi desenvolvido no âmbito do Pacto de Inovação “*R2UTechnologies / Modular Systems*” (C64487810-00000019), promovido pelo consórcio *R2UTechnologies* e cofinanciado pelo *NextGenerationEU* através do investimento “*Agendas para a Inovação Empresarial*” do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR). Os autores agradecem ainda a colaboração da **CIMPOR**, **SIFUCEL** e **SAINT-GOBAIN**, pelo fornecimento dos materiais utilizados durante a campanha experimental.

Referências

- [1] Y. Zhang, W. Pan, and Y. Teng, "Reducing embodied carbon emissions of concrete modules in high-rise buildings through structural design optimisation," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 1101, no. 2, p. 022023, Nov. 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1101/2/022023.
- [2] M. S. Imbabi, C. Carrigan, and S. McKenna, "Trends and developments in green cement and concrete technology," *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 1, no. 2, pp. 194–216, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.ijse.2013.05.001.
- [3] S. Mete and J. Xue, "Integrating environmental sustainability and social justice in housing development: two contrasting scenarios," *Prog Plann*, vol. 151, p. 100504, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.progress.2020.100504.
- [4] R. M. Andrew, "Global CO₂ emissions from cement production," *Earth Syst Sci Data*, vol. 10, no. 1, pp. 195–217, Jan. 2018, doi: 10.5194/essd-10-195-2018.
- [5] A. Carriço, J. A. Bogas, and M. Guedes, "Thermoactivated cementitious materials – A review," *Constr Build Mater*, vol. 250, p. 118873, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118873.
- [6] W. Pan and Z. Zhang, "Benchmarking the sustainability of concrete and steel modular construction for buildings in urban development," *Sustain Cities Soc*, vol. 90, p. 104400, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.scs.2023.104400.
- [7] A. Carriço, S. Real, J. A. Bogas, and M. F. Costa Pereira, "Mortars with thermo activated recycled cement: Fresh and mechanical characterisation," *Constr Build Mater*, vol. 256, p. 119502, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119502.
- [8] S. Real, J. A. Bogas, A. Carriço, and S. Hu, "Mechanical Characterisation and Shrinkage of Thermoactivated Recycled Cement Concrete," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 6, p. 2454, Mar. 2021, doi: 10.3390/app11062454.
- [9] A. Carriço, S. Real, and J. A. Bogas, "Durability performance of thermoactivated recycled cement concrete," *Cem Concr Compos*, vol. 124, p. 104270, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104270.
- [10] E. S. Leo, M. G. Alexander, and H. Beushausen, "Compressive strength and durability performance of limestone calcined clay cement concrete made from selected African raw materials," *Constr Build Mater*, vol. 438, p. 137012, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137012.
- [11] K. Scrivener, F. Zunino, F. Avet, and W. Hangpongpan, "LC3: a promising alternative," *International Cement Review*, pp. 1–3, 2018.
- [12] S. Real, V. Sousa, I. Meireles, J. A. Bogas, and A. Carriço, "Life Cycle Assessment of Thermoactivated Recycled Cement Production," *Materials*, vol. 15, no. 19, p. 6766, Sep. 2022, doi: 10.3390/ma15196766.
- [13] H. K. Kim and H. K. Lee, "Coal bottom ash in field of civil engineering: A review of advanced applications and environmental considerations," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 19, no. 6, pp. 1802–1818, Sep. 2015, doi: 10.1007/s12205-015-0282-7.
- [14] V. Sousa and J. A. Bogas, "Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production," *J Clean Prod*, vol. 306, p. 127277, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127277.
- [15] J. A. Bogas, A. Carriço, and M. F. C. Pereira, "Mechanical characterization of thermal activated low-carbon recycled cement mortars," *J Clean Prod*, vol. 218, pp. 377–389, May 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.325.
- [16] EN 1097-6, "Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 6: Determination of Particle Density and Water Absorption," 2013, *European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium*.
- [17] EN 1097-3, "Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 3: Determination of Loose Bulk Density and Voids," 1998, *European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium*.
- [18] M. Xinwei, H. Zhaoxiang, and L. Xueying, *Reactivity of Dehydrated Cement Paste from Waste Concrete Subjected to Heat Treatment*. Italy: Università Politecnica delle Marche, Ancona, 2010.
- [19] EN 196-1, "Methods of testing cement. Part 1: Determination of strength," 2016, *European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium*.
- [20] EN 196-2, "Method of testing cement. Part 2: Chemical analysis of cement," 2014, *European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium*.
- [21] EN 451-1, "Method of testing fly ash. Part1: Determination of Free Calcium Oxide Content," 2017, *European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium*.
- [22] EN 196-3, "Methods of testing cement. Part 3: Determination of setting times and soundness," 2016, *European Committee for standardization (CEN): Brussels, Belgium*.
- [23] EN 1015-3, "Methods of test for mortar masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar," 1999, *European Committee for standardization (CEN): Brussels, Belgium*.
- [24] M. Sharma, S. Bishnoi, F. Martirena, and K. Scrivener, "Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review," *Cem Concr Res*, vol. 149, p. 10565, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.cemconres.2021.105654.

- [25] LC3, "Limestone calcined clay cement." Accessed: Mar. 15, 2024. [Online]. Available: <https://lc3.ch/>
- [26] Scrivener K, "Eco-efficient cements: No magic bullet needed," *Global Cement: future cements*, *Global Cement Magazine*, pp. 10–14, Sep. 2019.
- [27] EN 1015-18, "Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar," 2002, *European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium*.
- [28] LNEC E 391, "Determinação da resistência à carbonatação," 1993, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisbon*.
- [29] NT Build 492, "Concrete, Mortar and Cement Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-steady State Migration Experiments," 1999, *NORDTEST*.
- [30] T. Matschei, B. Lothenbach, and F. P. Glasser, "The role of calcium carbonate in cement hydration," *Cem Concr Res*, vol. 37, no. 4, pp. 551–558, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2006.10.013.
- [31] A. Carriço, J. A. Bogas, S. Real, and M. F. C. Pereira, "Shrinkage and sorptivity of mortars with thermoactivated recycled cement," *Constr Build Mater*, vol. 333, p. 127392, May 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127392.
- [32] M. S. Meddah, M. Al Owaisi, M. Abedi, and A. W. Hago, "Mortar and concrete with lime-rich calcined clay pozzolana: A sustainable approach to enhancing performances and reducing carbon footprint," *Constr Build Mater*, vol. 393, p. 132098, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132098.
- [33] J. A. Bogas, A. Carriço, and A. J. Tenza-Abril, "Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes," *Cem Concr Res*, vol. 138, p. 106226, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106226.
- [34] J. A. Bogas, S. Real, A. Carriço, J. C. C. Abrantes, and M. Guedes, "Hydration and phase development of recycled cement," *Cem Concr Compos*, vol. 127, p. 104405, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104405.
- [35] B. B. Sabir, S. Wild, and J. Bai, "Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review," *Cem Concr Compos*, vol. 23, no. 6, pp. 441–454, Dec. 2001, doi: 10.1016/S0958-9465(00)00092-5.
- [36] O. Gjrv, K. Tan, and M. Zhang, "Diffusivity of chlorides from seawater into highstrength lightweight concrete," *ACI Mater J*, vol. 91, no. 5, pp. 447–452, Sep. 1994.
- [37] J. Bogas, "Caracterização de betes estruturais com agregados leves de argila expandida," PhD Thesis, IST, Portugal, 2011.
- [38] fib34, "bulletin 34 – Model code for service life design. Lausanne: Prepared by CEB/FIP Working Group 5.6 on Lightweight Aggregate Concrete. FIB – Fdration Internationale Du Bton.,” 2006.
- [39] C. C. Yang, "On the relationship between pore structure and chloride diffusivity from accelerated chloride migration test in cement-based materials," *Cem Concr Res*, vol. 36, no. 7, pp. 1304–1311, Jul. 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2006.03.007.
- [40] Garboczi and J. Edward, "Microstructure and transport properties of concrete.," in *State of the art report by rilem technical committee TC 116-PCD. Performance of concrete as a criterion of its durability*, J. Kropp and H. Hilsdorf, Eds., E&FN Spon, 1995, pp. 198–212.
- [41] H. Maraghechi, F. Avet, H. Wong, H. Kamyab, and K. Scrivener, "Performance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) with various kaolinite contents with respect to chloride transport," *Mater Struct*, vol. 51, no. 5, p. 125, Oct. 2018, doi: 10.1617/s11527-018-1255-3.
- [42] F. Zunino and K. Scrivener, "The reaction between metakaolin and limestone and its effect in porosity refinement and mechanical properties," *Cem Concr Res*, vol. 140, p. 106307, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106307.
- [43] Y. Dhandapani and M. Santhanam, "Assessment of pore structure evolution in the limestone calcined clay cementitious system and its implications for performance," *Cem Concr Compos*, vol. 84, pp. 36–47, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.08.012.
- [44] J. Bogas, J. Brito, and D. Ramos, "Freeze-thaw resistance of concrete produced with fine recycled concrete aggregates.," *J Clean Prod*, vol. 115, pp. 294–306, 2016.
- [45] K. Sisomphon and L. Franke, "Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials," *Cem Concr Res*, vol. 37, no. 12, pp. 1647–1653, Dec. 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.08.014.