



Argamassas com MgO reativo e escórias, em substituição do cimento, e agregados reciclados

Cátia Raquel Gonçalves Saudades

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores

Professor Doutor Jorge Manuel Calição Lopes de Brito

Doutor Miguel Nuno Caneiras Bravo

Júri

Presidente: Professor Doutor Vitor Faria e Sousa

Orientador: Doutor Miguel Nuno Caneiras Bravo

Vogal: Professora Doutora Rita Maria Vilela Nogueira

Outubro de 2022

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Resumo

No presente trabalho, foi analisado, em termos de resistência mecânica e durabilidade, o comportamento de argamassas sustentáveis, com incorporação de óxido de magnésio (MgO), escória de alto forno e agregados reciclados (AR) finos. A utilização da escória de alto forno e dos AR finos é uma solução bastante atrativa do ponto de vista da sustentabilidade, uma vez que estes materiais resultam de resíduos.

A incorporação de MgO em substituição parcial de cimento é realizada a 0, 10 e 20%. Foram utilizados dois tipos de MgO, um proveniente da Austrália e outro de origem espanhola, sendo o primeiro de elevada reatividade e o segundo de baixa reatividade. A incorporação de escória nas argamassas realizou-se a 0, 10 e 20%. Os dois materiais foram avaliados em termos da sua incorporação individual, sendo posteriormente avaliada a sua utilização em simultâneo.

Considerou-se também argamassas com agregados naturais (AN) e outras com substituição total de AN por AR.

Em termos de resistência mecânica, foram obtidas perdas de desempenho em todos os ensaios. Porém, ao longo do tempo, a diferença de desempenho comparativamente à argamassa de referência tende a diminuir, devido à lenta hidratação que caracteriza os dois materiais sustentáveis utilizados. Saliente-se também o desempenho das argamassas que foram expostas à cura por carbonatação, que revelaram uma melhoria de desempenho relativamente às argamassas de referência.

Relativamente à durabilidade, foram realizados ensaios à retração e à absorção de água por capilaridade e por imersão, tendo sido observadas, de um modo geral, melhorias de desempenho nas argamassas com MgO e/ou escória, quando comparados com a argamassas de referência.

Verificou-se que, na maioria dos ensaios, não ocorreu sobreposição dos efeitos negativos. Por outras palavras, a incorporação em simultâneo de MgO e escória provocou perdas de desempenho inferiores à soma das perdas da sua incorporação individual.

Palavras-chave: argamassas, RCD, agregados reciclados, escória, MgO.

Abstract

In this work, the performance of sustainable mortars, with the incorporation of magnesium oxide (MgO), blast furnace slag and fine recycled aggregates (RA), was analyzed, in terms of mechanical strength and durability. The use of blast furnace slag and fine RA is a very attractive solution from the point of view of sustainability since these materials result from waste.

The incorporation of MgO by partial replacement of cement is carried out at 0%, 10% and 20%. Two types of MgO were used: one from Australia (highly reactive) and the other from Spain (lowly reactive). The incorporation of slag in the mortars was carried out at 0%, 10% and 20%, as well. The two materials were evaluated in terms of their individual incorporation, and their simultaneous use was subsequently evaluated.

Mortars with natural aggregates (NA) and others with total replacement of NA with RA were also considered.

In terms of mechanical strength, losses of performance were obtained in all tests. However, over time, the difference in performance relative to the reference mortar tends to decrease, due to the slow hydration that characterizes the two sustainable materials. The performance of the mortars that were exposed to carbonation curing is also highlighted, showing an improvement in performance when compared to the reference mortars.

Regarding durability, tests were carried out, evaluating: shrinkage and water absorption by capillarity and by immersion. Performance improvements were observed in mortars with MgO and/or slag, when compared to the reference mortars.

It was found that, in most of the tests, there was no overlap of negative effects. In other words, the simultaneous incorporation of MgO and slag caused performance losses lower than the sum of the losses of their individual incorporation on mortars.

Keywords: mortar, CDW, recycled aggregates, slag, MgO.

Índice geral

1	Introdução	1
1.1	Considerações iniciais.....	1
1.2	Objetivos e metodologia da dissertação	2
1.3	Estrutura e organização do trabalho.....	2
2	Estado de arte	5
2.1	Introdução	5
2.2	Agregados reciclados.....	5
2.3	Óxido de magnésio	7
2.4	Escória de alto forno	8
2.5	Propriedades das argamassas	9
2.5.1	Resistência mecânica.....	9
2.5.2	Módulo de elasticidade	13
2.5.3	Absorção de água por capilaridade	15
2.5.4	Absorção de água por imersão.....	16
2.5.5	Velocidade de ultrassons.....	18
2.5.6	Resistência à carbonatação	19
2.5.7	Retração	20
3	Campanha experimental	25
3.1	Introdução	25
3.2	Planeamento da campanha experimental	25
3.3	Materiais utilizados	27
3.3.1	Ligantes.....	27
3.3.2	Agregados.....	27
3.4	Composição e produção das argamassas.....	28
3.4.1	Introdução	28
3.4.2	Relação água / ligante	28
3.4.3	Composição das argamassas de referência.....	28
3.4.4	Composição das argamassas em análise.....	29
3.5	Produção de argamassas.....	30
3.6	Ensaio aos agregados.....	30
3.6.1	Análise granulométrica.....	30
3.6.2	Massa volúmica e absorção de água.....	32
3.7	Ensaio de argamassas no estado fresco	34
3.7.1	Trabalhabilidade	34

3.7.2	Massa volúmica	35
3.8	Ensaio de argamassas no estado endurecido	36
3.8.1	Resistência à flexão	36
3.8.2	Resistência à compressão.....	37
3.8.3	Módulo de elasticidade	37
3.8.4	Velocidade de propagação dos ultrassons	38
3.8.5	Absorção de água por capilaridade.....	39
3.8.6	Absorção de água por imersão.....	40
3.8.7	Resistência à carbonatação.....	40
3.8.8	Retração	41
4	Análise e discussão dos resultados	43
4.1	Introdução	43
4.2	Propriedades dos ligantes	43
4.2.1	Composição química	43
4.2.2	Análise granulométrica.....	43
4.2.3	Superfície específica	45
4.2.4	Reatividade do MgO.....	45
4.3	Propriedades dos agregados	45
4.3.1	Análise granulométrica.....	45
4.3.2	Massa volúmica e absorção de água.....	46
4.4	Propriedades das argamassas no estado fresco	48
4.4.1	Trabalhabilidade.....	48
4.4.2	Massa volúmica	49
4.5	Propriedades das argamassas no estado endurecido.....	49
4.5.1	Resistência à compressão e à flexão	49
4.5.2	Módulo de elasticidade	57
4.5.3	Velocidade de propagação de ultrassons.....	61
4.5.4	Absorção de água por capilaridade.....	64
4.5.5	Absorção de água por imersão.....	66
4.5.6	Resistência à carbonatação.....	70
4.5.7	Retração	73
5	Conclusões.....	76
5.1	Considerações iniciais.....	76
5.2	Conclusões gerais	76
5.3	Proposta de desenvolvimentos futuros	80

Índice de anexos

Anexo 1 - Composição química do cimento CEM I 42,5R, produzido pela Secil	1
Anexo 2 - Características físicas do cimento CEM I 42,5R, produzido pela Secil	1
Anexo 3 - Resultados da resistência à compressão com AN, ao longo do tempo de cura	1
Anexo 4 - Resultados da resistência à compressão com AR, ao longo do tempo de cura	1
Anexo 5 - Resultados da resistência à compressão com AN, expostas à carbonatação	2
Anexo 6 - Resultados da resistência à compressão com AR, expostas à carbonatação	2
Anexo 7 - Resultados da resistência à flexão com AN, ao longo do tempo de cura	2
Anexo 8 - Resultados da resistência à flexão com AR, ao longo do tempo de cura	3
Anexo 9 - Resultados da resistência à flexão em argamassas expostas à carbonatação	3
Anexo 10 - Resultados módulo de elasticidade	4
Anexo 11 - Resultados de velocidade de propagação de ultrassons	4
Anexo 12 - Capacidade de absorção de água por capilaridade	5
Anexo 13 - Capacidade de absorção de água por imersão a 28 dias de cura húmida	5
Anexo 14 - Capacidade de absorção de água por imersão e a 14 dias de camara húmida + 28 dias de CO ₂	6
Anexo 15 - Profundidade da carbonatação em argamassas com AN e com AR	6
Anexo 16 - Resultados da retração ao longo do tempo de cura	7

Índice de figuras

Figura 4.1 - Relação entre resistência à compressão e a taxa de substituição de MgO e escória a 28 dias	51
Figura 4.2 - Relação entre resistência à flexão e a taxa de substituição de MgO e escória	51
Figura 4.3 - Evolução da resistência à compressão em 91 dias.....	52
Figura 4.4 - Evolução da resistência à flexão em 91 dias.....	52
Figura 4.5 - Evolução da resistência à compressão em 91 dias em argamassas com AR	55
Figura 4.6 - Evolução da resistência à flexão em 91 dias em argamassas com AR	56
Figura 4.7 - Relação entre o módulo de elasticidade e a taxa de substituição de MgO e escória a 28 dias	59
Figura 4.8 - Relação entre a velocidade de propagação dos ultrassons e a taxa de substituição de MgO e escória a 28 dias	62
Figura 4.9 - Relação entre a absorção de água por capilaridade e a taxa de substituição de MgO e escória a 28 dias.....	65
Figura 4.10 - Relação entre a absorção de água por imersão e a taxa de substituição de MgO e escória a 28 dias	67
Figura 4.11 – Relação entre a profundidade de carbonatação e a taxa de substituição de MgO e escória a 28 dias	71
Figura 4.12 - Evolução da retração ao longo de 91 dias	74

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Classificação do MgO, de acordo com a sua temperatura de calcinação (adaptado de Jin e Al-Tabbaa, 2014).....	7
Tabela 2.2 - Resistência à compressão a 28 dias de cada tipo de mistura produzida (adaptado de Gonçalves et al., 2020).....	11
Tabela 3.1 - Ensaio da primeira fase experimental.....	26
Tabela 3.2 - Ensaio da segunda fase experimental.....	26
Tabela 3.3 - Ensaio da terceira fase experimental.....	26
Tabela 3.4 - Composição do AR fino.....	27
Tabela 3.5 - Composição da argamassa de referência com agregados naturais.....	28
Tabela 3.6 - Composição da argamassa de referência com agregados reciclados.....	28
Tabela 3.7 - Identificação das argamassas produzidas.....	29
Tabela 3.8 - Abertura dos peneiros.....	31
Tabela 4.1 - Caracterização química dos ligantes.....	44
Tabela 4.2 - Distribuição granulométrica dos ligantes por difração a laser.....	44
Tabela 4.3 - Superfície específica dos ligantes.....	45
Tabela 4.4 - Reatividade dos MgOs.....	45
Tabela 4.5 - Análise granulométrica da areia fina.....	46
Tabela 4.6 - Análise granulométrica da areia grossa.....	46
Tabela 4.7 - Distribuição granulométrica da incorporação de 50% de areia fina e 50% de areia grossa.....	46
Tabela 4.8 - Massa volúmica e absorção de água aos agregados.....	47
Tabela 4.9 - Baridade dos diversos materiais.....	48
Tabela 4.10 - Consistência por espalhamento e relação água / ligante.....	48
Tabela 4.11 - Consistência por espalhamento e relação água / ligante das misturas com AR fino.....	48
Tabela 4.12 - Massa volúmica no estado fresco (em kg/m ³).....	49
Tabela 4.13 - Massa volúmica no estado fresco (em kg/m ³).....	49
Tabela 4.14 - Resistência à compressão a 28 dias.....	50
Tabela 4.15 - Resistência à flexão a 28 dias.....	50
Tabela 4.16 - Evolução da resistência à compressão em argamassas curadas em CO ₂	53
Tabela 4.17 - Evolução da resistência à flexão em argamassas curadas em CO ₂	53
Tabela 4.18 - Variação da resistência à compressão ao incorporar AR.....	54
Tabela 4.19 - Variação da resistência à flexão ao incorporar AR.....	54
Tabela 4.20 - Resistência à compressão a 28 dias em argamassas com AR.....	54
Tabela 4.21 - Resistência à flexão a 28 dias em argamassas com AR.....	55
Tabela 4.22 - Evolução da resistência à compressão em argamassas com AR curadas em CO ₂	56
Tabela 4.23 - Evolução da resistência à flexão em argamassas com AR curadas em CO ₂	57
Tabela 4.24 - Módulo de elasticidade a 28 dias.....	58
Tabela 4.25 - Evolução do módulo de elasticidade em argamassas curadas em CO ₂	59
Tabela 4.26 - Variação do módulo de elasticidade ao incorporar AR.....	60

Tabela 4.27 - Módulo de elasticidade a 28 dias em argamassas com AR	60
Tabela 4.28 - Evolução do módulo de elasticidade em argamassas com AR curadas em CO ₂	61
Tabela 4.29 - Velocidade de propagação dos ultrassons a 28 dias	61
Tabela 4.30 - Evolução da velocidade de propagação dos ultrassons em argamassas curadas em CO ₂	62
Tabela 4.31 - Variação da velocidade de propagação dos ultrassons ao incorporar AR	63
Tabela 4.32 - Velocidade dos ultrassons a 28 dias em argamassas com AR	63
Tabela 4.33 - Evolução da velocidade de propagação dos ultrassons em argamassas com AR curadas em CO ₂	64
Tabela 4.34 - Absorção de água por capilaridade a 28 dias.....	65
Tabela 4.35 - Variação da absorção de água por capilaridade ao incorporar AR	66
Tabela 4.36 - Absorção de água por capilaridade a 28 dias em argamassas com AR	66
Tabela 4.37 - Absorção de água por imersão a 28 dias	67
Tabela 4.38 - Evolução da absorção de água por imersão em argamassas curadas em CO ₂	68
Tabela 4.39 - Variação da absorção de água por imersão ao incorporar AR.....	68
Tabela 4.40 - Absorção de água por imersão a 28 dias em argamassas com AR.....	69
Tabela 4.41 - Evolução da absorção de água por imersão em argamassas com AR curadas em CO ₂	70
Tabela 4.42 - Profundidade de carbonatação a 28 dias	70
Tabela 4.43 – Profundidade de carbonatação em argamassas com na com 14 e 28 dias de exposição à carbonatação.....	71
Tabela 4.44 - Variação da profundidade de carbonatação ao incorporar AR.....	71
Tabela 4.45 - Profundidade de carbonatação a 28 dias com AR	72
Tabela 4.46 - Profundidade de carbonatação em argamassas com AR com 14 e 28 dias de exposição à carbonatação.....	72
Tabela 4.47 - Retração a 7 dias	73
Tabela 4.48 - Retração a 91 dias	74
Tabela 4.49 - Variação da retração ao incorporar AR	75
Tabela 4.50 - Retração a 91 dias em argamassas com AR	75
Tabela 5.1 - Resultados obtidos a 28 dias em argamassas sem AR finos.....	77
Tabela 5.2 - Resultados obtidos a 28 dias com 100% AR finos	78
Tabela 5.3 - Resultados obtidos em provetes curados em câmara de carbonatação sem AR finos ...	79
Tabela 5.4 - Resultados obtidos em provetes curados em câmara de carbonatação com 100% AR finos	80

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

Atualmente, o setor da construção tem um elevado impacto ambiental. A indústria do cimento é responsável por cerca de 5 a 7% das emissões mundiais de dióxido de carbono (CO₂) (Benhelal *et al.*, 2013). De forma a tentar minimizar o problema ecológico da produção de cimento, várias alternativas sustentáveis têm sido propostas e estudadas ao longo dos anos.

Para além das emissões de CO₂ e das necessidades de matéria-prima, este setor gera uma enorme quantidade de Resíduos da Construção e Demolição (RCD), que inclui materiais como betão, telhas, cerâmica, plástico, madeira, vidro, misturas betuminosas, metais e, inclusivamente, solo.

Os RCD representam aproximadamente 36% do total de resíduos produzidos no planeta (Bui *et al.*, 2018). Por exemplo, nos EUA, os RCD descartados aumentaram de 50 milhões de toneladas em 1980 para 548 milhões de toneladas em 2015, verificando-se uma subida de dez vezes mais em apenas 35 anos (Butler *et al.*, 2011). Por sua vez, na China, a produção anual de RCD ultrapassa 1,5 bilhões de toneladas (Poon *et al.*, 2007). Já na Europa, a produção destes resíduos atinge cerca de 850 milhões de toneladas/ano, representando 31% do total de resíduos gerados na UE (Mahmoud *et al.*, 2020).

Uma vez que o cimento é o principal constituinte das argamassas, é neste contexto que surge a necessidade de estudar alternativas ao cimento Portland. Para além das alternativas ao cimento tradicional, é também estudada a incorporação de agregados reciclados (AR) finos como substituição total dos agregados naturais (AN) finos.

Assim, é nesta linha de investigação que se insere a presente dissertação. De modo a minimizar os efeitos negativos da produção de cimento Portland, foram propostas algumas alternativas de materiais para substituir o mesmo, ainda que parcialmente. Dois dos materiais que têm sido alvo de diversos estudos são o óxido de magnésio (MgO) reativo e a escória de alto forno. Estes materiais possuem uma “pegada ecológica” mais reduzida, uma vez que, no caso da escória, esta é um subproduto da indústria siderúrgica que pode ser reaproveitado e, no caso do MgO reativo, este exige uma temperatura de produção muito inferior à utilizada na produção do cimento Portland. Para além das substituições mencionadas, foram ainda considerados os AR finos oriundos de RCD compostos principalmente por betão, alvenaria e materiais betuminosos.

Porém, é necessário aferir os efeitos que a utilização de MgO e escória, em conjunto com os AR finos, provoca no desempenho das argamassas, ao longo do tempo. Nesse sentido, foram estudadas ao longo da presente dissertação, algumas das propriedades que caracterizam as argamassas, tanto a nível de resistência mecânica como de durabilidade.

1.2 Objetivos e metodologia da dissertação

A presente dissertação tem como principal objetivo avaliar a resistência mecânica e durabilidade de argamassas com incorporação de MgO e escória de alto forno, como substitutos parciais do cimento Portland, e AR finos na produção de argamassas. Para tal, foram produzidas diferentes argamassas, com diferentes quantidades de MgO e/ou escória incorporadas. As quantidades destes materiais a ser utilizadas foram de 0, 10 e 20%, respetivamente, enquanto os AR finos foram utilizados em quantidades de 0% e 100%. Refira-se que o estudo irá incidir tanto na utilização dos dois materiais atrás mencionados e de AR finos em simultâneo, como no uso individual dos três elementos, para se compreender melhor a sua ação conjunta.

As misturas foram analisadas durante o estado fresco, através do estudo da trabalhabilidade e da massa volúmica, assim como no estado endurecido.

Foi analisada também a cura em câmara de carbonatação, de modo a entender a influência desse tipo de cura na resistência mecânica e na durabilidade das argamassas produzidas.

1.3 Estrutura e organização do trabalho

De forma a cumprir os objetivos propostos, a dissertação foi dividida em várias fases.

Em primeiro lugar, realizou-se uma revisão da literatura, de forma a perceber e analisar o conhecimento já existente nas três áreas de investigação que se pretende abranger - os AR finos, o MgO e a escória de alto forno. Este processo de recolha de informação foi bastante importante, pois permitiu planificar corretamente a campanha experimental e adquirir uma sensibilidade para a posterior análise dos resultados obtidos. Devido à inovação do tema do presente trabalho, não foram encontrados estudos que analisassem a relação entre os três materiais sustentáveis a utilizar nas diferentes propriedades das argamassas.

Seguiu-se o planeamento da campanha experimental. Para tal, realizou-se a pesquisa de todas as normas que poderiam ser relevantes para a execução dos ensaios. Após o correto planeamento, procedeu-se à produção das diferentes misturas de argamassas e à realização dos provetes. Esta campanha experimental dividiu-se em três fases: ensaios aos agregados, ensaios aos ligantes e ensaios aos betões, no estado fresco e no estado endurecido.

Para finalizar, procedeu-se à recolha de todos os resultados obtidos nos diferentes ensaios. Seguiu-se o processo de tratamento e análise dos mesmos, para todas as argamassas.

Para apresentar os resultados e conclusões obtidas de forma clara e concisa, optou-se por estruturar o presente trabalho em cinco capítulos:

- **Introdução** - capítulo que refere os principais objetivos do trabalho e a razão que levou à realização do mesmo, sendo descrita toda a metodologia usada para a sua elaboração e a respetiva organização;
- **Estado da arte** - capítulo que reúne toda a informação existente acerca dos diversos temas que foram abordados ao longo da dissertação. São caracterizados os materiais sustentáveis a utilizar

(MgO, escória e ARF) e os efeitos que provocam nas propriedades das argamassas. Para tal, são evidenciados todos os estudos efetuados até à data;

- **Campanha experimental** - capítulo onde se encontra toda a informação detalhada sobre os diversos ensaios que foram realizados, assim como as normas referentes a cada ensaio, e se apresenta a metodologia usada para a caracterização dos agregados e do betão, tanto no estado fresco, como no estado endurecido. Também é apresentada a constituição de todas as famílias de betão produzidas, inclusivamente a constituição do betão de referência;
- **Análise e discussão de resultados** - capítulo onde são apresentados e analisados todos os resultados obtidos, em cada um dos ensaios realizados. Para isso, são feitas comparações com os resultados apresentados no capítulo 2, procurando justificar as tendências verificadas;
- **Conclusões** - capítulo em que se destaca os principais resultados obtidos e se caracteriza de forma generalizada a influência de cada um dos materiais em estudo nas argamassas analisadas; uma vez que a dissertação nunca consegue dar resposta a todas as questões situadas no contexto dos temas que se estudam, são feitas propostas de desenvolvimentos futuros dos temas abordados ao longo desta investigação.

No fim, são apresentadas todas as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento do presente trabalho, bem como os anexos que são referenciados ao longo do texto.

2 Estado de arte

2.1 Introdução

O presente capítulo pretende apresentar o atual conhecimento científico existente relativamente à substituição parcial de cimento por MgO e escória de alto forno, bem como à substituição total de agregados naturais (AN) por agregados reciclados (AR). São abordados os aspetos de maior relevância para a realização da presente investigação, e que são fundamentais para a posterior análise e discussão dos resultados obtidos. Este capítulo serve também para antecipar as tendências dos resultados obtidos nos ensaios.

Em primeiro lugar, são apresentadas algumas características gerais dos AR, do MgO e da escória. Seguidamente, é apresentada, com base na literatura existente até ao momento, a influência da integração de MgO, de escória e de AR, em separado, em materiais cimentícios. Por fim, é apresentado, sempre que possível e que exista literatura a fundamentar, a interação do MgO com a escória, do MgO com AR e da escória com AR. Refira-se, desde já, que não foram encontrados quaisquer estudos que incluíssem em simultâneo a interação MgO, escória e AR, o que prova o interesse e a inovação do tema estudado ao longo desta dissertação.

2.2 Agregados reciclados

O setor da construção é responsável por aproximadamente 6 bilhões de toneladas de emissões de CO₂ (Ahmadi *et al.*, 2017) Por outro lado, a quantidade de agregados naturais que este sector consome, enquanto matéria-prima para a produção de betão, é de cerca de 2,7 bilhões de toneladas/ano nos países da EU (Kou *et al.*, 2011) 900 milhões de toneladas/ano nos EUA (Medina *et al.*, 2014) e 700 milhões de toneladas/ano, no Brasil (Limbachiya *et al.*, 2012).

Para além das emissões de CO₂ e das necessidades de matéria-prima, este sector gera uma grande quantidade de resíduos. Os resíduos da construção e demolição (RCD) abrangem diversos materiais, como betão, telhas, cerâmica, plástico, madeira, vidro, misturas betuminosas, metais, entre outros.

Os RCD representam aproximadamente 36% do total de resíduos produzidos na Terra (Bui *et al.*, 2018). Nos EUA, os RCD descartados aumentaram de 50 milhões de toneladas em 1980 para 548 milhões de toneladas em 2015 (Butler *et al.*, 2011). Na China, a produção anual de RCD ultrapassa 1,5 bilhões de toneladas (Poon *et al.*, 2007). Entretanto, nos países da União Europeia, a quantidade de RCD gerada atinge cerca de 850 milhões de toneladas/ano, representando 31% da geração total de resíduos na UE (Mahmoud *et al.*, 2020).

As questões ambientais têm ocupado cada vez mais espaço nas legislações dos países da UE e do mundo e, por isso, o tema da reciclagem de RCD tem sido objeto de estudos e pesquisas desde a década de 1970 e as principais razões para esses estudos são a crescente consciencialização da importância da reciclagem de resíduos de todas as fontes no contexto de um "Desenvolvimento Sustentável" (Miraldo *et al.*, 2021).

A fim de incentivar o uso de agregados reciclados, a Diretiva-Quadro de Resíduos 2008/98/EC do

Parlamento Europeu estabeleceu uma meta para todos os estados-membros da União Europeia: pelo menos 70% de redução, reutilização e reciclagem de RCD até 2020 (Jesus *et al.*, 2019).

De forma a reverter esta tendência, o uso de AR, em substituição de AN, na produção de betões e argamassas tem sido uma das abordagens mais utilizadas para a utilização de RCD e, assim, para a contribuição de uma maior sustentabilidade no setor da construção.

A composição dos RCD pode ser afetada por vários fatores, como técnicas arquitetónicas, matérias-primas e procedimentos de construção/demolição. No entanto, betão, argamassa e cerâmica vermelha são os principais componentes do RCD, chegando a mais de 70% em peso (Kou *et al.*, 2013).

Quando existe a possibilidade de substituir os AN por AR, há que entender que existem várias propriedades dos AR que têm de ser alvo de estudo, tais como a composição química do agregado, isto é, o teor em sulfatos, o teor em cloretos e o teor alcalino, entre outros. A densidade, a absorção de água e as propriedades mecânicas dos AR são também bastante importantes e dependem diretamente do processo de reciclagem, que tem de ser normalizado. O tamanho e a forma dos AR também são características muito importantes e que dependem diretamente do tipo de britagem utilizado.

Os AR, bem como os AN, podem ser divididos em dois tipos, de acordo com a sua granulometria: AR finos (granulometria até 4 mm) e AR grossos (granulometrias superiores a 4 mm) (Khatib, 2005; Corinaldesi e Moriconi, 2009; Ledesma *et al.*, 2014; Neno *et al.*, 2014; Fan *et al.*, 2016).

Como referido acima, um dos principais constituintes dos RCD é o betão. Shi *et al.* (2015) referem que as grandes diferenças entre os AN e os AR de betão se devem, maioritariamente, ao facto de os segundos apresentarem grande quantidade de pasta de ligante do betão original aderida. Com base nisto, as características do betão original de onde o agregado foi britado serão importantes para o comportamento da argamassa que o incorporará. Os autores também referem que o processo de britagem a que o agregado é sujeito e o tamanho desse mesmo agregado são os fatores que mais afetam a quantidade de ligante aderido ao AR. Deste modo, é possível concluir que as propriedades intrínsecas destes agregados não são independentes das propriedades dos ligantes que antes continham, o que afeta a qualidade e desempenho da argamassa resultante e, por isso, é de suma importância entender que as propriedades dos AR variam de caso para caso.

Gonçalves *et al.* (2020) referem que a quantidade de AR finos que resulta da britagem simples de RCD, mesmo quando se pretende otimizar a obtenção de agregados de maior dimensão, é bastante significativa.

As argamassas apresentam-se como uma solução lógica para a utilização de AR finos. As argamassas produzidas com AR apresentam características diferentes, quando comparadas com as convencionais, mas aparentam ser adequadas para serem utilizadas no sector da construção. Estas diferenças devem-se principalmente a diferenças na composição química, granulometria, absorção de água, entre outras.

As argamassas podem ser utilizadas como revestimento ou assentamento, sendo o primeiro caso o mais problemático, uma vez que o material reciclado pode apresentar grandes variações de composição, granulometria ou existência de contaminantes e, por isso, pode produzir revestimentos com uma variação de desempenho significativa. Assim, no caso de as argamassas se destinarem a revestimentos, os AR terão de ser submetidos a um controlo de qualidade mais rigoroso.

2.3 Óxido de magnésio

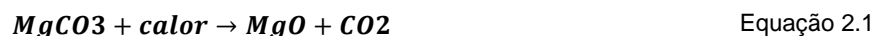
O aquecimento global, e as mudanças climáticas devido à emissão de CO₂, é atualmente uma das questões mais importantes a nível mundial (Schneider *et al.*, 2011).

Uma das mais importantes fontes de emissão de CO₂ é a produção de cimento Portland (CP) (Benhelal *et al.*, 2013). O CP é o cimento mais comum usado em betão e o seu processo de fabrico envolve a decomposição de carbonatos, como o calcário, e a queima do carvão a uma temperatura de aproximadamente 1500 °C. Durante a produção de CP, ocorrem emissões de CO₂ em dois momentos: na obtenção de matérias-primas e na queima do combustível. Os autores afirmam que as emissões de CO₂ na produção de cimento correspondem a 5 a 7% das emissões globais de CO₂ (Worrell *et al.*, 2001; Maddalena *et al.*, 2018).

Jin e Al-Tabbaa (2014), citando Kramer (2001) e Shand (2006), afirmam que o óxido de magnésio se pode obter de duas maneiras:

- origem natural, em que as principais fontes de produção são a magnesite e a dolomite;
- origem sintética, através da precipitação química, água do mar ou salmouras.

Atualmente, grande parte do MgO utilizado na indústria da construção é produzido a partir da calcinação do MgCO₃ (carbonato de magnésio). A reação que dá origem a MgO deste tipo (de origem natural) é representada pela Equação 2.1.



Por outro lado, se o óxido em questão for obtido através de precipitação química, a reação que envolve esse processo é apresentada na Equação 2.2.



Observando as duas equações, rapidamente se conclui que a temperatura a que o produto é calcinado é importante para as características do óxido de magnésio obtido. Com base nesta informação, e sabendo que a decomposição do MgCO₃ se inicia a uma temperatura entre 600 e 650 °C, Du (2005), Jin e Al-Tabbaa (2014) classificaram o óxido de magnésio em quatro tipos diferentes, em função das temperaturas utilizadas na sua produção, tal como apresentado na Tabela 2.1.

Tendo por base os dados desta tabela, é fácil inferir que a reatividade do MgO está diretamente relacionada com a temperatura de calcinação do mesmo.

Tabela 2.1 - Classificação do MgO, de acordo com a sua temperatura de calcinação (adaptado de Jin e Al-Tabbaa, 2014)

Tipo de MgO	Temperatura de calcinação (°C)	Reatividade	Cristalinidade
<i>Light-burned</i>	700-1000	Alta	Mais baixa
<i>Hard-burned</i>	1000-1400	Menos alta	Baixa
<i>Dead-burned</i>	1400-2000	Baixa	Alta
<i>Fused</i>	> 2800	Mais baixa	Mais alta

A reatividade do MgO depende principalmente das características físicas e da pureza do material. A reatividade do MgO tende a aumentar com a redução da dimensão das suas partículas e com o aumento da área de superfície específica das mesmas. Estes dois parâmetros são controlados pelas condições de produção, ou seja, pureza da matéria-prima e temperatura de calcinação (Liska e Al-Tabbaa, 2009).

Jin e Al-Tabbaa (2014) estudaram a reatividade de diversas amostras de MgO com características bastante diferentes. A investigação consistiu na análise de catorze amostras, em que três delas tinham origem sintética (*Dead Sea Periclase, RBH e InterMag Ltd.*) e as restantes eram de origem natural. A reatividade foi analisada através do teste de ácido cítrico, que consistia na medição do tempo necessário para que cinco gramas de cada amostra de MgO alterassem a cor da solução (com recurso a fenolftaleína). Desta forma, quanto mais rapidamente a solução alterasse a sua cor em contacto com a amostra de MgO, mais reativa seria essa amostra. Foi perceptível que, em geral, as amostras de MgO resultantes de uma origem sintética, provenientes da precipitação química, têm valores de reatividade muito próximos entre si e muito mais elevados (no sentido de maior reatividade, isto é, de menor tempo de reação) do que as amostras resultantes da calcinação de magnesite (que apresentam valores mais baixos e com uma notável disparidade de valores).

Jin e Al-Tabbaa (2014) realçam que a principal causa para a maior variedade de resultados das amostras produzidas a partir de magnesite é a diferente temperatura de calcinação de cada uma das amostras. De facto, Mo *et al.* (2015) referem que a temperatura de calcinação influencia tanto a área superficial específica como a hidratação das partículas de MgO. Assim sendo, estes autores concluem que, quanto maior for a temperatura de calcinação, menor é a área superficial específica e a reatividade, resultando numa hidratação mais lenta das partículas de MgO.

2.4 Escória de alto forno

A produção do cimento é considerada uma das maiores problemáticas ambientais da atualidade, uma vez que representa uma percentagem muito elevada de emissões de CO₂ a nível mundial. A utilização de escória de alto forno, como substituição parcial do cimento, em argamassas e betões surge como uma estratégia possível para limitar a utilização do cimento Portland e, conseqüentemente, diminuir o impacto ambiental que a produção deste representa.

A escória granulada moída de alto forno é um subproduto ou um resíduo gerado pelas indústrias siderúrgicas. A produção do ferro inicia-se com a junção do minério de ferro com o coque e o calcário no alto-forno a uma temperatura em torno de 1500 °C. À medida que o minério de ferro é reduzido a ferro, vai aparecendo um resíduo na forma de escória, que flutua sobre o ferro extraído e é drenado em intervalos regulares de forma fundida. Dependendo do uso a que se destina a escória, ao sair do alto forno, esta pode ser arrefecida com água abundante, de modo que tenha um arrefecimento rápido, otimizando as suas propriedades cimentícias. ou pode ser sujeita a uma técnica de arrefecimento gradual, em que esta perde a sua capacidade pozolânica e toma a forma de torrões. Quando o método de arrefecimento rápido é adotado, a escória é transformada em areia vítrea, sendo estes grânulos, posteriormente, moídos até formarem um pó fino e daí o nome de escória de alto forno granulada moída (GGBFS). Os altos-fornos atuais geram 250-350 kg de escória por tonelada de ferro extraída,

dependendo este valor do teor de ferro presente no minério (Rafat. e Mohammad., 2011). Globalmente, são produzidos 190 milhões de toneladas de escória anualmente, das quais apenas 50% são utilizadas em todo o mundo (Bapat, 2013). Na Índia, a escória gerada anualmente chega a rondar 7,8 milhões de toneladas (Shetty, 2005).

A incorporação de escória como substituição parcial do cimento tem sido alvo de estudo. Por exemplo, Hussain *et al.* (2020) referem que, quando a escória fundida tem um arrefecimento rápido, origina grânulos de areia vítrea que, após serem sujeitos a algumas técnicas, podem ser misturados com o cimento. Segundo estes autores, o processo de moagem conjunto da escória e do clínquer não é fácil, devido ao facto de os grânulos de escória serem mais duros e difíceis de moer do que o clínquer, resultando na redução do potencial hidráulico da escória. Essa questão pode ser superada moendo ambos os materiais separadamente e depois misturando-os na forma de pó. A tendência atual é moê-los separadamente em diferentes níveis para explorar plenamente o potencial hidráulico da escória.

A escória de alto forno tem composição química aproximadamente semelhante à do cimento Portland, com constituintes como a cal, a sílica e a alumina, em diferentes proporções (Sha. e Pereira., 2001).

As propriedades cimentícias da GGBFS são controladas pelo tipo de minério, tipo de fundente utilizado e contaminações que o coque contém. Cerca de 95% da GGBFS é constituída por elementos como o magnésio, o silício, o cálcio, o alumínio e o oxigénio (Ramakrishnan *et al.*, 2017).

2.5 Propriedades das argamassas

Ao longo deste subcapítulo são caracterizados os materiais sustentáveis a utilizar (MgO, escória e ARF) e os efeitos que provocam nas propriedades das argamassas. Para tal, são evidenciados todos os estudos efetuados até à data

2.5.1 Resistência mecânica

Em geral, uma das desvantagens da utilização de outros materiais como substituição parcial do ligante habitualmente utilizado, cimento Portland, e a substituição do AN fino por AR fino é a diminuição da resistência mecânica do produto final, seja betão ou argamassa.

2.5.1.1 Agregados reciclados

Segundo a investigação de Khatib (2005), a resistência mecânica de betões que incorporam AR finos vai diminuindo à medida que o teor de AR finos aumenta. Neste estudo, foram definidos como agregados finos todos aqueles que possuem uma granulometria inferior ou igual a 5 mm e a origem dos RCD utilizados foi de alvenaria ou betão. O betão de referência tem uma relação de 1/2/4 (cimento / agregados finos / agregados grossos) e as taxas de substituição de AN finos por AR finos foram de 25, 50, 75 e 100% para cada um dos tipos de AR. A relação a/l de todas as misturas foi de 0,5. O autor apenas analisou a resistência à compressão de cada um dos betões e inferiu que, quanto maior for a taxa de substituição de AN finos por AR finos, maior será o decréscimo da resistência à compressão, relativamente ao betão de referência. A diminuição máxima obtida no referido estudo, para uma taxa de substituição total, foi de 10%, no caso dos AR finos oriundos de alvenaria, e entre 15 e 30% para os AR finos oriundos de fragmentos de betão.

Revilla-Cuesta *et al.* (2020) também estudaram a influência da integração de AR finos no desempenho mecânico do betão a 28 dias e concluíram que, ao integrar até 50% de AR finos de betão, a resistência do mesmo mantém-se adequada para o seu uso estrutural. No entanto, concluíram que o desenvolvimento da resistência é tanto mais lento quanto maior for a percentagem de substituição dos agregados.

No caso do estudo efetuado por Martínez-García *et al.* (2022), avaliou-se a influência dos AR de betão, oriundos de uma usina de reciclagem, localizada na província de Leon, Espanha, com tamanho de partícula na faixa de 0,08–2 milímetros, no desempenho mecânico e de durabilidade das argamassas, sendo que as conclusões foram distintas das obtidas no estudo anterior. Os autores consideraram substituições de AN finos por AR finos, em percentagens de 25, 50 e 100% e que, os resultados mostram que as argamassas que contêm até 25% de AR finos apresentam melhor desempenhos do que a argamassa de referência, sendo que esta melhoria é justificada pela nova estrutura e distribuição dos poros.

Ledesma *et al.* (2014) chegaram à mesma conclusão do que os autores anteriores e verificaram que, à medida que o teor em AR finos de betão aumenta, as resistências à compressão e à flexão também aumentam. Verificaram que, até aos primeiros 28 dias, existe um aumento dos valores de resistência, enquanto, após este período, o aumento não é tão significativo. Este aumento é muito mais significativo no ensaio de resistência à compressão do que no ensaio de flexão. No entanto, a longo prazo, as argamassas que apresentam maior desenvolvimento mecânico são as que têm um teor de finos até 10%. De forma a justificar esta variação de valores, os autores referem que a incorporação de AR finos (que neste estudo têm granulometria até 4 mm) vai originar um efeito de fíler (preenchem os vazios existentes na argamassa, dando origem a um material mais denso do que o de referência). Possivelmente, por essa razão, as argamassas que apresentaram melhores resultados foram as que contêm um teor de AR finos até 10%. Outra explicação para a melhoria do desempenho foi a possibilidade de terem ocorrido reações entre os restos de ligantes aderidos aos AR utilizados e o novo cimento.

Por fim, Revilla-Cuesta *et al.* (2020) também estudaram o efeito da incorporação de AR finos na resistência mecânica das argamassas. Os autores consideraram substituições de 25, 50, 75 e 100%. Os resultados obtidos a 28 dias mostraram uma diminuição da resistência à compressão, em relação à mistura de referência M0 (60 MPa), de 7% para a mistura com 25% de AR, de 27% para a mistura com 50% de AR e de 47 e 51% para as misturas com 75 e 100% de AR, respetivamente. Em relação à tendência geral, a mistura com 25% apresentou um decréscimo de resistência inferior ao expectável. Os autores referiram que é possível que este efeito se deva à relação *a/c*, uma vez que esta sofreu ajustes em função do aumento da incorporação de AR.

2.5.1.2 Óxido de magnésio

De forma a perceber a influência do MgO no desempenho mecânico das argamassas à compressão, Mo *et al.* (2015) conceberam uma investigação onde utilizaram 4 tipos de MgO com reatividades distintas: 50, 100, 200 e 400 segundos. Os autores utilizaram na sua investigação cerca de 4 amostras de cimento em que cada uma incorporava 8% de cada um dos tipos de MgO, levando à denominação de PCM50, PCM100, PCM200 e PCM400. Cada mistura contém uma relação água / ligante de 0,5. Após os ensaios, de um modo geral, nos primeiros 3 dias ocorre uma perda significativa de resistência, principalmente na argamassa que contém o óxido de magnésio mais reativo. A 28 dias de cura, verificou-se que a resistência

é inferior à da argamassa de referência. No entanto, a 90 dias de cura, no caso das argamassas que contêm o MgO mais reativo, verifica-se que atingiram resistências iguais ou superiores à da argamassa de referência. Assim, os autores concluíram que, quanto mais reativo é o MgO, maior é a diferença verificada numa fase inicial. No entanto, não é uma diferença significativa a longo prazo.

Gonçalves *et al.* (2020) também investigaram o efeito da incorporação de MgO em argamassas. Há que ter em conta que neste estudo foram consideradas percentagens relativamente elevadas de MgO como ligante (10, 15 e 20%), quando comparadas com a percentagem utilizada no estudo anterior. No referido estudo, os autores utilizaram dois tipos de MgO, um deles de origem australiana e outro de origem grega, denominados de MgO A e MgO G, respetivamente. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Resistência à compressão a 28 dias de cada tipo de mistura produzida (adaptado de Gonçalves *et al.*, 2020)

Quantidade de MgO	Resistência à compressão (MPa)
Argamassa de referência	53,7
10% MgO A	43,2
15% MgO A	46,9
20% MgO A	42,3
10% MgO G	48,4
15% MgO G	43,3
20% MgO G	38,6

Verifica-se que, para uma substituição de 20% de cimento por MgO A, a resistência à compressão decresce cerca de 21,2%, e para a substituição de 20% de cimento por MgO G a resistência decresce 28,1%. De uma forma geral, verifica-se uma tendência para o decréscimo da capacidade de resistência à compressão com o aumento da percentagem de substituição. Esta tendência pode ser explicada, segundo os autores, pela maior exigência de água das misturas com MgO, o que provocará a diluição do cimento devido ao “excesso” de água. Esta situação resulta numa microestrutura mais porosa e, portanto, com uma menor resistência à compressão. Ao existir uma menor quantidade de cimento, há uma diminuição na quantidade de fases C-S-H para a contribuição da força de resistência, sendo substituídas por Mg(OH)₂, que não tem uma contribuição tão significativa para a resistência.

Sequeira *et al.* (2021) também investigou o desempenho mecânico de betões que incorporam MgO como ligante. O autor considerou percentagens semelhantes às consideradas no estudo de Gonçalves *et al.* (2020) e dois tipos de MgO diferentes, um de origem australiana e outro de origem espanhola designados de MgO-A e MgO-S, respetivamente. Ambos são considerados *light burned* MgO por possuírem temperaturas de calcinação entre 800 e 1000 °C. Através dos resultados obtidos, o autor constatou que, ao longo do tempo, a variação entre a resistência à compressão nos betões com MgO e no betão de referência tende a diminuir. A 7 dias, o betão com MgO apresenta decréscimos de resistência entre 19,3% (incorporação de 5% de MgO-S) e 32,5% (incorporação de 20% de MgO-A), relativamente ao valor de referência. Porém, a 91 dias, a redução de resistência varia entre 12,3% (5% de MgO-S) e 26,9% (20% de MgO-A). De acordo com o autor, esta diferença ocorre por duas razões: utilização de cimento CEM I 42,5R,

caracterizado por apresentar uma resistência mecânica mais elevada a 7 dias e/ou tardia hidratação do MgO, relativamente ao cimento utilizado, ganhando uma maior resistência a partir de 28 dias. Segundo o autor, a redução dos valores de resistência à compressão em betão com a incorporação de MgO, como substituto parcial de cimento, pode ser explicada pelas seguintes razões:

- a incorporação de MgO leva a uma diminuição da quantidade de cimento e, sendo os produtos de hidratação do cimento (C-S-H) mais resistentes do que os do óxido ($Mg(OH)_2$), quanto maior a quantidade de MgO presente no betão, maior será a redução da resistência à compressão, citando Mo *et al.* (2015);
- devido à introdução de MgO, foi necessário aumentar a relação água / ligante, de modo a manter a trabalhabilidade. Este aumento da quantidade de água utilizada poderá provocar uma maior porosidade nos provetes, resultando numa menor compacidade dos mesmos, citando Du (2005);
- a própria natureza expansiva do MgO poderá causar fissuras no betão, aumentando a porosidade e pondo em causa a resistência à compressão.

2.5.1.3 Escória de alto forno

De acordo com Neville (2003), a influência da escória de alto forno na resistência mecânica do betão depende de vários fatores. Segundo o autor, a menor taxa de hidratação do betão com escória de alto forno leva a uma menor resistência nas primeiras idades, quando comparado com o betão de referência. No entanto, se forem garantidas as condições de cura adequadas, o betão que integra a escória continua a desenvolver resistência por períodos mais longos do que o betão “tradicional”. O autor justifica que este facto se deve à libertação contínua de álcalis pela escória, aliada à contínua formação de hidróxido de cálcio pelo cimento Portland, o que resulta numa reação contínua que vai muito além dos 28 dias. Este facto geralmente leva a uma maior resistência à compressão do betão com escória, quando comparado ao betão de referência.

Com o objetivo de estudar os efeitos na resistência mecânica da incorporação de cimento e escória de alto forno moída (GGBFS) em betões, Yun *et al.* (2020) utilizou GGBFS como substituição parcial do cimento Portland em 20, 40 e 50%. Os resultados obtidos mostraram que os betões que contêm a substituição de 40% de cimento por GGBFS apresentam resistências à compressão de 57,3 e 69,7 MPa, após 28 e 90 dias de cura, respetivamente, o que supera as resistências à compressão obtidas pelo betão de referência (55,7 e 61,5 MPa, a 28 e 90 dias de cura, respetivamente). Esta substituição incrementa a resistência à compressão do betão cerca de 3 e 13% a 28 e 90 dias de cura, respetivamente. Segundo os autores, a percentagem ideal de substituição do cimento foi de apenas 40%, tendo concluído que, para percentagens superiores a 40%, a GGBFS está em “excesso”, não havendo hidróxido de cálcio livre suficiente para permitir que as reações hidráulicas do GGBFS ocorram. Assim, a maioria dos GGBFS em excesso permanecem inativos e não contribuem para o aumento da resistência.

2.5.1.4 Iteração entre os agregados reciclados, óxido de magnésio e escória de alto forno

Gonçalves *et al.* (2020) incorporaram MgO reativo e AR finos na mesma mistura, e concluíram que, ao integrar 20% de MgO austríaco em conjunto com uma substituição total de AN finos por AR finos, obtém-se uma diminuição de entre 33 e 44% da resistência à compressão, em relação à argamassa de referência.

Os autores concluíram ainda que a utilização dos dois materiais em simultâneo origina uma sobreposição de efeitos, ou seja, dado que os dois materiais, quando utilizados individualmente nas argamassas, causam um pior desempenho mecânico das mesmas, a utilização dos dois materiais na mesma argamassa origina uma redução ainda mais significativa dos seus valores de resistência mecânica.

Ben Haha *et al.* (2019) estudaram o efeito do MgO nas propriedades de hidratação de escória ativada alcalinamente por NaOH e $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ao longo de 1 ano. No decorrer da investigação, notou-se que o aumento do teor de MgO na composição da escória de 8 para 13% aumentou a quantidade de hidrotalcita, resultando num aumento de 50 a 80% da resistência à compressão a 28 dias.

Ma *et al.* (2022) estudaram o efeito da integração de MgO reativo submetido a elevadas temperaturas em argamassas com escória, como ligante. Os autores afirmam que a reatividade do MgO depende das condições de calcinação, e que, MgO com diferentes reatividades, originam diferentes cinéticas de hidratação das pastas MgO-escória [20]. Três tipos de pós de MgO foram selecionados neste estudo, MgO de alta reatividade (R-MgO), MgO de reatividade média (M-MgO) e MgO de baixa reatividade (S-MgO). As temperaturas de calcinação dos três pós de MgO são de 800, 900 e 1000°C, respetivamente. As argamassas são sujeitas a um aquecimento de 5 °C/min, mantendo-se a temperatura constante por 30 min. De acordo com os resultados dos autores, a resistência mecânica aumenta com o aumento do teor de MgO e com o aumento das temperaturas até a um certo ponto, diminuindo a partir desse momento. Assim, os autores concluíram que os materiais cimentícios com escória e MgO possuem excelente resistência a altas temperaturas. Verificaram também que, quando o teor de S-MgO é de 15 e 20%, a maior resistência mecânica é obtida a 200 °C.

Hatami e Amiri (2022) avaliaram as características mecânicas e de durabilidade do betão a longo prazo quando se utiliza escória granulada de alto-forno moída (GGBFS) e AR. Foram produzidas amostras com 25 e 50% de substituição de agregado naturais por AR e 20 e 40% de substituição de cimento Portland por escória. Os autores verificaram que a resistência mecânica do betão diminui quase linearmente em função do aumento de AR. No caso da durabilidade, a aplicação de AR aumenta a taxa de migração de cloreto no betão. A escória mitiga os impactes prejudiciais dos AR, melhorando os produtos de hidratação, exceto nos estágios iniciais. Tendo em conta este estudo, os autores concluíram que o efeito positivo da escória no aumento da resistência à compressão a 28 e 91 dias diminui à medida que a relação água / ligante diminui, uma vez que esse efeito depende da sua hidratação. A escória tem um efeito benéfico também na redução da taxa de migração de cloreto em idades posteriores a 28 dias.

Relativamente à interação entre MgO, AR e escória, não foi encontrado qualquer estudo que investigasse simultaneamente a produção de argamassas com estes três elementos.

2.5.2 Módulo de elasticidade

2.5.2.1 Agregados reciclados

Jesus *et al.* (2019) estudaram a influência da incorporação de AR muito finos (partículas inferiores a 0,149 mm) em argamassas que não se destinam a um fim estrutural. Foram considerados dois tipos de AR, agregados oriundos de fragmentos de betão e agregados mistos, ou seja, RCD. As percentagens de substituição foram de 0, 10, 15 e 20% e o programa experimental consistiu em ensaios

à trabalhabilidade, resistência mecânica e absorção de água. Uma vez terminados os ensaios, os autores concluíram que, de um modo geral, o desempenho das argamassas melhorou, em comparação com a argamassa de referência, em particular, as que incorporam 15 e 20% de AR muito finos. Segundo os autores, este resultado deve-se ao efeito de carga e à hidratação tardia dos resíduos de cimento não hidratados. A dimensão fina dos AR aumentou também a compacidade das argamassas, diminuindo a sua deformabilidade e resultando num maior módulo de elasticidade. Este aumento ocorreu de forma substancial nas argamassas com AR de betão, sendo que a incorporação da AR misto apresentou uma alteração menos significativa nesta propriedade.

Silva *et al.* (2016) realizaram um estudo onde reuniram todos os estudos realizados até 2015 sobre betões e argamassas que substituíram AN por AR. Os autores afirmam que a literatura coletada sugere unanimemente que há uma diminuição do módulo de elasticidade, à medida que o nível de substituição de AN por AR aumenta. Esta perda está diretamente associada ao menor módulo de elasticidade característico dos AR. O uso de até 30% de AR foi considerado como tendo efeitos mínimos sobre o módulo de elasticidade (Limbachiya, 1998; Dhir, Limbachiya e Leelawat, 1999; Dhir e Paine, 2004). No entanto, quando se considera uma percentagem de 100% de AR, o módulo de elasticidade pode diminuir entre 20 e 40% (Li e Zhang, 2005).

Khatib (2004) ensaiou amostras de betão com substituições de AN por AR de 25, 50, 75 e 100%, de modo a entender como estas substituições influenciam o módulo de elasticidade. O autor chegou às mesmas conclusões do que os autores anteriores, ou seja, que a utilização de AR finos em betões provoca uma diminuição do módulo de elasticidade. Além disto, o autor também conclui que, quanto maior for a substituição de AN finos por AR finos, maior é a redução do módulo de elasticidade. Gonçalves *et al.* (2020) estudaram o desempenho de argamassas com AR finos e concluíram também que existe um claro declínio nesta propriedade para argamassas com teores elevados de AR finos. Foram observadas diminuições de 30-40% para misturas com 100% de AR finos, quando comparadas com as misturas de referência. Os autores referem que o aumento do teor de AR finos aumenta a porosidade, o que resulta em argamassas menos densas. Estes resultados estão de acordo com os restantes valores obtidos na literatura (Silva *et al.* 2016).

2.5.2.2 Óxido de magnésio

A influência da incorporação de óxido de magnésio na variação do módulo de elasticidade das argamassas não tem sido alvo de muito estudo. No estudo realizado por Sequeira *et al.*, (2021), os autores verificaram que, aquando da incorporação de MgO reativo, o módulo de elasticidade do betão não sofre perdas substanciais. De facto, quando a incorporação de MgO é de apenas 5%, ocorre uma melhoria desta propriedade em 5,2 ou 3,2%, no caso de o MgO ser espanhol ou australiano, respetivamente. A perda da capacidade de resistir elasticamente atinge a maior redução em betões com 20% de MgO na sua constituição. Este valor atinge reduções de 6,7% (MgO espanhol) e 14,6% (MgO australiano), respetivamente. Como se pode verificar, estes valores são bastante positivos, em relação aos obtidos nos ensaios de resistência à compressão e à tração. É também notável que, à medida que a percentagem de MgO incorporada aumenta, se registe uma redução ligeira dos valores do módulo de elasticidade. Os autores afirmam que, entre 5 e 20% de MgO, essa redução ocorre de maneira praticamente linear.

2.5.2.3 *Iteração entre os agregados reciclados, óxido de magnésio e escória de alto forno*

Gonçalves *et al.*, (2020) estudaram o desempenho de argamassas que incorporam AR finos e MgO reativo em simultâneo, e uma das propriedades analisadas foi o módulo de elasticidade. Os autores verificaram que o desenvolvimento ao longo do tempo do módulo de elasticidade nas argamassas que incorporam MgO e AR finos resulta numa sobreposição de efeitos de cada um dos materiais incorporados, isto é, a redução do módulo de elasticidade das argamassas que incorporam AR finos e MgO é superior à redução verificada na utilização desses dois materiais individualmente. Por exemplo, enquanto nas argamassas que incorporavam apenas MgO (até 20%) ou apenas AR finos (até 100%) se verificou uma diminuição entre 7 e 10% e entre 27 e 34%, respetivamente, a redução dos valores obtidos aquando da utilização dos dois materiais em simultâneo situou-se entre 31 e 41%.

Não foi encontrado qualquer estudo que investigasse o módulo de elasticidade de argamassas com MgO, escória e AR, simultaneamente.

2.5.3 *Absorção de água por capilaridade*

2.5.3.1 *Agregados reciclados*

De acordo com Evangelista e Brito (2010), a durabilidade de um material cimentício depende muito da capacidade de um fluido penetrar na microestrutura da pasta de cimento, permitindo a introdução de moléculas (por exemplo, dióxido de carbono e cloretos) que reagem e põem em causa a estabilidade química do material. É por este motivo que a absorção de água por capilaridade é considerada uma propriedade adequada para avaliar indiretamente a durabilidade de materiais cimentícios.

Silva *et al.* (2009) realizaram um estudo onde integram agregados finos oriundos de materiais cerâmicos (tijolo), como substituição parcial dos AN finos. As argamassas contêm percentagens de 5 e 10% de substituição de agregados.

Os autores concluíram que, à medida que se aumenta o teor de AR muito fino (pó de tijolo), a absorção de água por capilaridade mantém-se ou diminui em função desse aumento. Embora possa parecer um pouco contraditório, considerando a maior capacidade de absorção de água dos AR, essa tendência pode ser explicada pela distribuição do tamanho do agregado, isto é, quanto mais fino o agregado, maior a sua facilidade em ocupar os vazios e, conseqüentemente, em diminuir a porosidade das argamassas.

No caso de Evangelista e Brito (2010) e Fan *et al.* (2016), que também estudaram a influência da utilização de AR finos em betões na absorção de água por capilaridade, os resultados foram distintos dos mencionados. Nestes estudos, foram considerados AR com dimensão máxima de 4,75 mm e observou-se que a absorção de água por capilaridade aumenta em função do aumento do teor de AR finos. Os autores explicam que os resultados obtidos se devem à criação de maior quantidade de poros e ao incremento do seu tamanho com a utilização de AR finos, relativamente ao betão de referência. Assim, de acordo com os autores, estes resultados são devidos à maior porosidade intrínseca dos próprios AR utilizados.

2.5.3.2 Óxido de magnésio

De acordo com o estudo realizado por Gonçalves *et al.* (2020), onde os autores estudam a absorção de água por capilaridade em argamassas com dois MgOs distintos. Os autores utilizam MgO austríaco, onde se verifica que tanto a 28 como a 91 dias, a capacidade da argamassa absorver água por capilaridade aumenta em função do aumento da percentagem de MgO. Para uma percentagem de 20% de MgO verifica-se um aumento de 48 e 94% da capacidade, a 28 e 91 dias. Verificam-se as mesmas tendências para o MgO grego, com aumentos de capacidade de absorção de água de 126 % a 28 dias.

2.5.3.3 Escória de alto forno

Çakir e Akoz (2008) estudaram os coeficientes de capilaridade de amostras que incorporam cerca de 30 e 60% de escória de alto forno, curadas até 180 dias, em diferentes condições de cura. Alguns dos provetes são curados completamente saturados em água, a uma temperatura de 20 ± 2 °C, e os restantes provetes foram curados com humidade relativa a 100%, a uma temperatura de 40 ± 2 °C. Os autores verificaram um decréscimo considerável nas argamassas que continham escória, independentemente do tipo de cura. Para as argamassas que tiveram uma cura saturada e incorporavam 30% de escória, foi obtida uma diminuição de 32 e 55% a 28 e 180 dias, respetivamente. Para as argamassas que tiveram uma cura saturada e incorporavam 60% de escória, foi obtida uma diminuição de 31 e 59% a 28 e 180 dias, respetivamente. Para as argamassas que tiveram uma cura não saturada e incorporavam 30% de escória, foi obtida uma diminuição de 16 e 54% a 28 e 180 dias, respetivamente. Por fim, para as argamassas que tiveram uma cura não saturada e incorporavam 60% de escória, foi obtida uma diminuição de 26 e 62% a 28 e 180 dias, respetivamente. Os autores explicam que esta situação pode ser explicada pelo facto de as partículas de escória serem mais finas do que as partículas de cimento e, assim, preencherem os poros capilares. Os resultados experimentais confirmam o ponto de vista de que o uso de escória melhora a durabilidade das argamassas.

2.5.3.4 Iteração entre os agregados reciclados, óxido de magnésio e escória de alto forno

Gonçalves *et al.* (2020) investigaram a incorporação simultânea em argamassas de MgO reativo e AR finos, em propriedades como a absorção de água por capilaridade. Ao analisar as retas de tendência linear, os autores concluíram que, à medida que a percentagem de AR finos aumenta, o coeficiente de absorção capilar também aumenta, ou seja, a capacidade da argamassa de absorver água capilar aumenta com o acréscimo da percentagem de AR finos incorporado. No entanto, os autores concluíram também que não existe uma variação significativa do coeficiente de absorção capilar à medida que a taxa de substituição de MgO aumenta, nas argamassas com ou sem AR.

2.5.4 Absorção de água por imersão

2.5.4.1 Agregados reciclados

Evangelista e Brito (2010) estudaram a absorção de água por imersão em betões com substituição total de AN finos por AR finos e verificaram um aumento na capacidade de absorção de água por imersão na ordem de 46%, quando comparado com o betão de referência.

Os autores avaliaram também uma taxa de substituição de AN fino por AR fino de 30% e obtiveram um aumento da capacidade de absorção dos betões foi apenas de 16,8%.

Os autores afirmam que os resultados apresentam uma correlação muito boa ($R^2 = 0,99$) entre a capacidade de absorção de água e a taxa de substituição de AN fino por AR fino. Afirmam ainda que os resultados são expetáveis, uma vez que os AR finos possuem uma estrutura mais porosa, o que leva a um aumento geral dos poros abertos na matriz do betão.

2.5.4.2 Óxido de magnésio

Num estudo realizado por Choi (2014), o autor estudou o efeito do MgO na porosidade das argamassas e concluiu que a longo prazo a porosidade diminui devido às reações de hidratação do MgO. Assim, pode-se deduzir que, se a porosidade diminui, a absorção de água por imersão também diminuirá.

2.5.4.3 Escória de alto forno

Demirboga (2004) investigou a distribuição do tamanho dos poros em betões que incorporam cimento com escória e verificou que a porosidade das argamassas contendo escória é superior à das argamassas de referência, entre 7 e 28 dias de cura. No entanto, o autor observou que a distribuição dimensional dos poros é semelhante entre os diversos betões. Os autores indicam também que, quando se considera a estrutura de poros a três anos de idade, a porosidade diminui consideravelmente. Assim, a três anos de idade o volume de poros corresponde apenas a 50% do volume observado a 28 dias de cura e o raio do tamanho médio dos poros também é reduzido, sendo que os poros de dimensões mais reduzidas (> 100 nm) chegam a desaparecer após três anos de cura. Este fenómeno é explicado pela melhoria da estrutura dos poros devido à hidratação tardia, isto é, à medida que vai ocorrendo a hidratação do ligante, os produtos de hidratação vão preenchendo gradualmente o espaço livre.

2.5.4.4 Interação entre os agregados reciclados, óxido de magnésio e escória de alto forno

A porosidade é uma propriedade que é diretamente relacionável com a absorção de água por imersão. Por isso, para analisar esta propriedade, pode-se retirar a partir da absorção de água por imersão. Zheng *et al.* (2022) estudaram o desempenho de argamassas que integram MgO reativo e escória ativada. Os elementos selecionados para ativar a escória foram o carbonato de sódio (SC) e sulfato de sódio (SS). No estudo referido, os autores afirmam que, quando o MgO reativo aumenta de 2 para 10%, a porosidade das argamassas com escória ativada por SC aumenta até determinado ponto, enquanto as argamassas com escória ativada por SS apontam para uma diminuição constante da porosidade. Visto que a porosidade diminui com a interação destes dois elementos (MgO e escória), a absorção de água por imersão também tenderá a diminuir.

Pelo contrário, Gonçalves *et al.* (2020) concluíram que a incorporação simultânea de AR finos e MgO contribui para uma maior porosidade da microestrutura. Assim, e sendo esta propriedade diretamente correlacionável com a absorção de água por imersão, infere-se que esta aumenta com a interação do MgO e AR.

Relativamente à interação simultânea de MgO, AR e escória, não foram encontrados quaisquer estudos que investigassem a produção de argamassas com as referidas iterações.

2.5.5 Velocidade de ultrassons

2.5.5.1 Agregados reciclados

Revilla-Cuesta *et al.* (2020) também estudaram o efeito da incorporação de AR finos no ensaio de velocidade de ultrassons das argamassas. Os autores consideraram substituições de 25, 50, 75 e 100%. A 28 dias de cura, obteve-se uma diminuição da velocidade de ultrassons, em relação à mistura de referência M0 (4300 m/s), de 2,7% para a mistura M25, 5,3% para a mistura M50 e 12,0 e 14,4% para as misturas M75 e M100, respetivamente. Assim, os autores verificaram que a velocidade de ultrassons diminuiu com o aumento do teor de AR e defenderam que este ensaio é altamente condicionado pela rigidez, densidade e porosidade do betão. Portanto, a diminuição da densidade e rigidez e o aumento da porosidade causados pela incorporação dos AR, é a justificação dada pelos autores para o resultado obtido na velocidade de ultrassons.

2.5.5.2 Óxido de magnésio

Sequeira *et al.* (2021) estudou a influência do MgO e de cinzas volantes em betões, realizando o ensaio de velocidade de propagação de ultrassons. O autor concluiu que a incorporação de até 5% de MgO como substituição parcial do ligante em betões teve pouca influência na velocidade de ultrassons, que causou uma redução de 0,6% nos resultados obtidos.

2.5.5.3 Escória de alto forno

Çakir e Akoz (2008) estudaram a velocidade dos ultrassons de argamassas com escória de alto forno curadas durante 7 dias em humidade relativa de 100% e uma temperatura de 40 ± 2 °C. Os autores consideraram as seguintes substituições de cimento Portland por escória de alto forno: 0 (argamassa de referência), 30 e 60%. Os autores concluíram que a velocidade de ultrassons diminuiu, em relação à mistura de referência (4033 m/s), 5,8 e 9,9% nas misturas com 30 e 60% de escória, respetivamente. Estes resultados demonstram que a velocidade de propagação dos ultrassons diminuiu com a substituição da escória e parecem estar em contradição com os de outras propriedades, como a porosidade e a capilaridade. No entanto, essa contradição, observada a 7 dias de cura, tem tendência a atenuar com o tempo.

Num estudo experimental, cujo objetivo era investigar os efeitos da escória de alto-forno granulada moída nas propriedades do betão, Demirboga (2004) referiu que, tanto a resistência à compressão quanto a velocidade dos ultrassons, apresentam valores muito baixos para todos os teores de substituição em idades precoces de cura. No entanto, o autor destacou que, com o aumento do período de cura, tanto a resistência à compressão como a velocidade de ultrassons, tendem a aumentar. O autor também indicou que este aumento é tanto maior quanto maior é a quantidade de escória de alto-forno utilizada.

2.5.5.4 *Iteração entre os agregados reciclados, óxido de magnésio e escória de alto forno*

Relativamente à utilização simultânea de MgO e AR, escória e AR e MgO, escória e AR em simultâneo não foram encontrados quaisquer estudos que investigassem a produção de argamassas com os referidos elementos.

2.5.6 Resistência à carbonatação

2.5.6.1 *Agregados reciclados*

Evangelista e Brito (2010) estudaram a resistência à carbonatação em betões com AR, tendo verificado que a profundidade de carbonatação aumentou com o acréscimo do teor de substituição dos agregados. Este resultado está de acordo com o esperado, uma vez que tanto a absorção capilar como a penetração de cloretos apresentaram a mesma tendência. Os autores inferem que a profundidade de carbonatação a 28 dias aumenta quase linearmente com o teor de substituição dos agregados, com um aumento máximo de cerca de 110%, para betões feitos apenas com AR finos, e um aumento máximo de cerca de 40%, para betões com 30% de AR finos.

2.5.6.2 *Óxido de magnésio*

Mo *et al.* (2012) estudaram algumas propriedades relacionadas com a durabilidade de betões que contêm MgO reativo na sua composição. Uma dessas propriedades foi a resistência à carbonatação. Os autores concluíram que ocorre uma redução do tamanho dos poros e do volume total dos poros, o que se reflete num aumento da densidade aparente e maior dureza em relação ao betão de referência. Concluindo que estas características conferem uma boa resistência à carbonatação aos betões que incorporam MgO na sua constituição.

Choi (2014) também estudou o comportamento de betões com MgO e concluiu que a profundidade de carbonatação entre as amostras de referência e as que têm uma taxa de incorporação de 5% de MgO, a 28 dias, é muito semelhante. No que se refere aos valores obtidos ao fim de 360 dias de cura, esta semelhança já não se verifica. Os betões que incorporam 5% de MgO, ao fim de 360 dias, apresentam uma carbonatação mais superficial do que os betões de referência. Assim sendo, a utilização de MgO como ligante em betões apresenta vantagens em termos de carbonatação ao longo do tempo. Tal como referido no subcapítulo 2.4.2.2 a utilização de MgO faz com que a porosidade do betão diminua (segundo a investigação destes mesmos autores). Sendo a porosidade um fator importante para a difusão do CO₂ na microestrutura do betão, é fácil de concluir que a diminuição deste parâmetro implicou uma diminuição da penetração da carbonatação.

2.5.6.3 *Escória de alto forno*

Hussain *et al.* (2020) estudaram a influência da substituição parcial do cimento por escória de alto forno nas propriedades do betão. Após a realização do ensaio de absorção de água, os autores concluíram que, à medida que a quantidade de GGBFS aumenta, a absorção de água diminui. Os autores constataram que, para uma substituição de 60% de GGBFS, houve uma redução considerável de vazios permeáveis em 7,9%, mas, com uma substituição de 75%, observou-se um aumento de vazios permeáveis em 7,5%, devido à falta de teor de água para formar produtos de hidratação. Assim, a

permeabilidade à água e o índice de vazios diminuíram com o aumento do teor de GGBFS, mas só até a uma determinada percentagem.

Num estudo realizado por Sanjuán *et al.* (2018), onde o objetivo era perceber de que modo variava a profundidade da penetração de cloretos em argamassas com diferentes percentagens de escória de alto forno adicionadas comparativamente à argamassa de referência (apenas com cimento Portland tradicional). Para esse fim, foram consideradas misturas com 4 cimentos distintos. O primeiro apenas com cimento Portland tradicional. Os restantes três incorporavam escória de alto forno na sua constituição, cerca de 14,4, 28,1 e 62,2%, respetivamente. Os ensaios foram realizados a 0, 1, 3, 7, 14 e 28 dias de cura em câmara de carbonatação. Os autores concluíram que quanto maior for a percentagem de escória e menor for o tempo de cura, maior será a profundidade de carbonatação.

No entanto, não se verificaram diferenças significativas entre as argamassas com cimento tradicional e as misturas com 14,4% de escória, quando curadas por mais de 7 dias.

2.5.6.4 *Iteração entre os agregados reciclados, óxido de magnésio e escória de alto forno*

Gonçalves *et al.* (2020) realizaram o ensaio de resistência à carbonatação em argamassas que continham simultaneamente MgO reativo, como substituto parcial do ligante, e agregados reciclados. Os autores concluíram que, à medida que a taxa de incorporação de AR finos aumenta, a profundidade de carbonatação também aumenta. Segundo os autores, o principal fator para o aumento da carbonatação relaciona-se com o aumento da porosidade que a utilização de AR finos origina. Este aumento da porosidade facilita a difusão de CO₂ nas argamassas e, conseqüentemente, facilita a carbonatação do Ca(OH)₂. No que concerne à utilização de MgO, de acordo com os resultados obtidos, tal como acontece com a incorporação de AR finos, à medida que a percentagem de MgO aumenta, a profundidade de carbonatação também aumenta. Como esperado, os autores concluíram que, quando utilizados estes dois elementos em simultâneo, a resistência à carbonatação também diminui.

Morales *et al.* (2022) também estudaram a influência do MgO reativo em argamassas com escória. Os autores chegaram à mesmas conclusões do que Mo (2012) e Choi (2014), ou seja, que a utilização de MgO origina um melhor desempenho à carbonatação, por diminuir a porosidade das argamassas com escória. Os autores justificam esta melhoria com a formação de brucita, relativamente fraca e expansiva (detetada por DRX), e com a formação de hidrotalcita (detetada por TGA/DTA). A hidratação dos produtos de MgO apresentam a capacidade de preencher os vazios, o que permite reduzir a conectividade entre poros. Desta forma, é criada uma “barreira” à penetração da água e à difusão de CO₂.

Relativamente à utilização simultânea de MgO, escória e AR, não foram encontrados quaisquer estudos que investigassem a produção de argamassas com os referidos elementos.

2.5.7 Retração

2.5.7.1 *Agregados reciclados*

Revilla-Cuesta *et al.* (2021) estudaram os efeitos da incorporação de AR nas propriedades de betões de alto desempenho, betões esses que apresentam uma maior resistência devido ao seu alto teor de cimento. Estes betões usualmente possuem uma retração muito acentuada, quando comparados com

os betões de uso corrente. O referido estudo analisou o efeito da incorporação de AR em várias propriedades a longo prazo, nomeadamente a retração. Para esse efeito, foram consideradas a argamassa de referência e substituições de AN por AR de 25% e 100%. Os autores concluíram que o uso de 100% de AR permitiu reduzir a retração autógena a 91 dias em aproximadamente 20%. O efeito da adição de 25% AR foi mínimo. No entanto, a retração total dos betões com esta incorporação aumentou entre 10 e 20%. Os autores explicam que esse comportamento se deve à maior absorção de água por parte do AR aquando da mistura, o que em princípio leva a diminuição da retração autógena do betão a curto prazo. Os autores defendem que os AR libertam mais água de forma retardada, quando comparados com os AN, o que possibilita uma reposição mais eficiente da água utilizada durante a hidratação do cimento.

2.5.7.2 Óxido de magnésio

De forma a entender o comportamento de argamassas com MgO como ligante, Rehsi (1983) integrou uma pequena percentagem, cerca de 2,5% de MgO como ligante, e verificou que a expansão do molde que continha esta mistura foi bastante reduzida. Assim, o autor concluiu que a substituição do cimento por MgO, dependendo da concentração de MgO considerada na pasta ligante, tem capacidade para contrariar a retração natural do cimento.

Há várias décadas que a China integra betão com MgO nas suas construções (principalmente em barragens). Há conhecimento de que existem mais de 30 barragens construídas com esta adição. Entre 1966 e 1976, foi construída a barragem de Baishan, sendo que nessa data não existia qualquer restrição ou regulamentação relativa à construção, o que fez com que não existisse qualquer fiscalização / controlo na betonagem desta obra. Sendo a mesma feita no Verão, onde normalmente ocorrem grandes variações de temperatura, era expectável que o calor provocasse uma retração excessiva no betão, mas este fenómeno não ocorreu. Após a investigação do fenómeno, chegou-se à conclusão de que esta melhoria na variação dimensional do betão se deveu à relativamente elevada concentração de MgO no betão utilizado, cerca de 4,5%. Esta descoberta deu início ao estudo da utilização de óxidos de magnésio como ligante em argamassas e betões (Du, 2005).

O produto resultante da hidratação do MgO é o $Mg(OH)_2$, denominado de brucite, estando a reação de hidratação ocorrida representada na Equação 2.3.



Após o início da reação de hidratação, a expansão ocorre geralmente até aos primeiros 7 dias, período que corresponde habitualmente à maior retração dos materiais cimentícios compostos por cimento Portland. Por este motivo, considera-se que esta adição pode contrariar a retração habitual do betão e, por consequência, minimizar a abertura de fissuras no mesmo. Du (2005) afirma que a formação da brucite provoca expansão no betão porque os produtos de hidratação do MgO possuem um volume superior ao dos reagentes. O mesmo autor confirma que a referida reação de hidratação é irreversível e limitada.

Segundo o mesmo autor, é de suma importância perceber se a expansão irá ocorrer ao longo da cura inicial do betão ou se decorrerá ao longo do tempo, de modo a restringir a expansão a valores aceitáveis. O autor refere que existe um certo limite de quantidade de MgO reativo presente no betão

a partir do qual o MgO pode causar uma expansão exagerada no material cimentício, provocando um mau desempenho do mesmo. Segundo o autor, só através desta análise é possível tirar partido da grande vantagem da incorporação do MgO como ligante, que é exatamente a capacidade que este tem de contrariar a retração característica do cimento através da expansão das partículas de MgO.

De forma a analisar esta propriedade, Cao e Yan (2019) efetuaram um estudo onde analisaram a influência da hidratação do MgO no comportamento expansivo característico das argamassas que contêm MgO como ligante. Os autores consideraram MgOs com três reatividades distintas, o primeiro altamente reativo (R1), o segundo de reatividade média (M1) e o terceiro pouco reativo (S1) e concluíram que as argamassas que contêm MgO altamente reativo expandem-se mais rapidamente na primeira idade do que aquelas com MgO pouco reativo, mas que a expansão das primeiras tem tendência a estagnar rapidamente e permanece quase constante no resto da idade de cura. Por outro lado, a taxa de expansão das argamassas que contêm MgO com baixa reatividade aceleram gradualmente e ultrapassam os grupos de alta reatividade, e o tempo expansivo total é maior. Este resultado é consistente com as pesquisas anteriores de outros autores como Mo, Deng e Wang (2012) e Cao (2018).

Os autores referidos analisaram ainda a relação entre a taxa de diminuição do teor de MgO (quantidade de MgO que reagiu com a água e formou brucite) e o valor de expansão ao longo do tempo de argamassas sujeitas a uma cura saturada ou não saturada. Desta forma, tentaram entender como as diferentes curas afetavam esta relação. Nas argamassas saturadas, observaram que o teor de MgO diminuiu cerca de 78% (R1), 55% (M1) e 44% (S1) nos primeiros 14 dias, enquanto a expansão obtida foi de 80% (R1), 48% (M1) e 41% (S1). Assim, foi possível verificar que as percentagens obtidas para estes dois parâmetros foram muito semelhantes. Para o caso das argamassas curadas em condições não saturadas, verificou-se uma diminuição do teor de MgO de 80% (R2), 62% (M2) e 52% (S2) nos primeiros 14 dias, enquanto a expansão obtida foi de 59% (R2), 31% (M2) e 15% (S2). Os autores concluem que, ao comparar a dilatação das argamassas curadas em duas condições diferentes, o fenómeno que mais se destaca é que a taxa de expansão das argamassas de cura saturada é significativamente maior do que a das argamassas não saturadas.

2.5.7.3 Escória de alto forno

Afroz *et al.* (2022) investigaram a retração autógena até 100 dias de cura de betões preparados com cimento corrente e GGBFS, considerando substituições de 40 e 60%. Os resultados mostram que a retração das misturas com GGBFS aumenta continuamente após os primeiros 28 dias de cura até a 100 dias, enquanto as amostras de controlo atingem um valor máximo após os 28 dias. A reação tardia entre o calcário do cimento de uso corrente e a alumina presente na GGBFS progrediu até a 90 dias e formou uma grande quantidade de monocarboaluminatos. Estas reações de longo prazo levam a um refinamento significativo da estrutura dos poros, responsável pela retração tardia nas misturas de GGBFS.

O resultado obtido pelos autores é coerente com o resultado obtido por Çakır e Aköz (2008) e mencionado no subcapítulo 2.5.3.3, relativo à porosidade.

2.5.7.4 Iteração entre os agregados reciclados, óxido de magnésio e escória de alto forno

Segundo Neno *et al.* (2014), o aumento de retração devido à utilização de AR finos deve-se ao facto

de os AR serem mais porosos do que os AN, o que faz com que a argamassa resultante da incorporação dos primeiros tenha menor rigidez do que a com incorporação dos segundos. Se a rigidez da argamassa diminui, então existirá uma maior tendência para acompanhar e acentuar a retração da matriz cimentícia. De acordo com o estudo de Gonçalves *et al.* (2020), quanto maior for a percentagem de incorporação de AR finos, maior é também a retração nas argamassas com MgO. Por outro lado, os autores concluíram que a utilização de MgO origina comportamentos contrários. Por sua vez, a utilização dos dois materiais em simultâneo, causou um somatório de efeitos que se anulam, isto é, enquanto a incorporação de AR finos aumenta significativamente a variação dimensional das argamassas (comparando com a argamassa de referência), a utilização de MgO vai reduzir esse aumento (e essa redução é tanto maior quanto maior for a percentagem de óxido utilizado).

Zheng *et al.* (2022) estudaram o desempenho da retração em argamassas que integram MgO reativo e escória ativada. Os sais quase neutros selecionados para ativar a escória foram o carbonato de sódio (SC) e o sulfato de sódio (SS). Os autores relatam que o MgO reativo pode ter efeitos positivos na retração, mesmo com as alterações provocadas pelos ativadores alcalinos. No caso das argamassas com escória ativada com SS, quanto maior é a taxa de MgO reativo utilizada, menor é a retração. Estas tendências estão relacionadas com o efeito do MgO reativo na estrutura dos poros e nos produtos de hidratação. O MgO reativo promove a formação de hidrotalcita, no caso da escória ativada por SC, e de AFt no caso da escória ativada por SS. Tanto a Hidrotalcita como a AFt são produtos cristalinos benéficos para inibir a retração.

Relativamente à interação MgO, AR e escória, não foi encontrado qualquer estudo que investigasse simultaneamente a produção de argamassas com estes três elementos.

3 Campanha experimental

3.1 Introdução

A presente campanha experimental tem como objetivo avaliar o desempenho mecânico de argamassas sujeitas à substituição de dois elementos: ligante e agregados. Relativamente às primeiras, o cimento é parcialmente substituído por Óxido de Magnésio e/ou escória, comparando-se posteriormente com uma argamassa de referência, com uma constituição tradicional de água, cimento e agregados naturais. No segundo caso, para além de o cimento ser parcialmente substituído, como nas argamassas anteriores, substituíram-se ainda os agregados naturais por agregados reciclados.

Neste capítulo, são definidas as várias fases da campanha experimental. São também referidos em detalhe os materiais utilizados, bem como a composição e o método de produção das diversas argamassas produzidas. Por fim, são referidos e descritos os ensaios realizados, de forma a caracterizar os ligantes e os agregados utilizados, bem como as argamassas, tanto no estado fresco como no endurecido.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Construção, do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos (DECivil), do Instituto Superior Técnico.

3.2 Planeamento da campanha experimental

A campanha experimental foi dividida em três fases e envolve a produção de 270 provetes de argamassa:

- a primeira fase consiste na realização dos ensaios necessários à caracterização dos constituintes das argamassas, ou seja, através de ensaios que são realizados antes da produção das mesmas;
- a segunda fase consiste na realização de ensaios em argamassas no estado fresco;
- a terceira fase é relativa aos ensaios realizados em argamassas no estado endurecido.

No âmbito da terceira fase, as argamassas são sujeitas aos seguintes ensaios:

- aos 7 dias, realiza-se os primeiros ensaios de resistência à flexão e à compressão;
- ao 28º dia, os provetes são ensaiados à resistência à flexão e à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, ultrassons, absorção de água por capilaridade e imersão;
- aos 91 dias, os provetes utilizados na medição da retração são ensaiados à resistência à flexão e à compressão e absorção de água por imersão;
- após 14 e 28 dias em câmara de carbonatação (designados na Tabela 3.3 como CO14 e CO28), os provetes são ensaiados à resistência à carbonatação, resistência à flexão e à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, ultrassons e absorção de água por imersão.

As Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 descrevem de forma esquematizada os ensaios realizados em cada fase, bem como a respetiva norma considerada.

Tabela 3.1 - Ensaios da primeira fase experimental

Ensaio	Material	Norma considerada
Análise granulométrica	Areia natural e ARF	EN 1015-1 (1998)
Massa volúmica e massa volúmica aparente	Areia natural	EN 1097-6 (2000) e 1097-3 (2002)
	ARF	Rodrigues <i>et al.</i> (2013) e 1097-3 (2002)
Absorção de água	Areia natural	EN 1097-6 (2000)
	ARF	Rodrigues <i>et al.</i> (2013)

Tabela 3.2 - Ensaios da segunda fase experimental

Ensaio	Material	Norma considerada
Trabalhabilidade	Argamassas no estado fresco	EN 1015-3 (1999)
Massa volúmica	Argamassas no estado fresco	EN 1015-6 (1999)

Tabela 3.3 - Ensaios da terceira fase experimental

Ensaio	Material	Idades (dias)	N.º de provetes	Norma considerada
Resistência à flexão e à compressão	Argamassas no estado endurecido	7	3	EN 1015-11 (1999)
		28	3	
		91	3	
		CO14	3	
		CO28	3	
Módulo de elasticidade dinâmico	Argamassas no estado endurecido	28	3	ASTM E1876 (2015)
		CO14	3	
		CO28	3	
Velocidade de propagação dos ultrassons	Argamassas no estado endurecido	28	3	EN 12504-4 (2006)
		CO14	3	
		CO28	3	
Absorção de água por imersão	Argamassas no estado endurecido	28	3	EN 1015-10 (2000)
		91	3	
		CO14	3	
		CO28	3	
Absorção de água por capilaridade	Argamassas no estado endurecido	28	3	EN 1015-18 (2002)
Resistência à carbonatação	Argamassas no estado endurecido	CO14	3	LNEC E-391 (1993)
		CO28	3	
Retração	Argamassas no estado endurecido	1-91	3	EN 1015-3 (1993)

3.3 Materiais utilizados

Neste subcapítulo, são descritos em detalhe os materiais utilizados nesta campanha. No subcapítulo 4, estes materiais serão caracterizados química e fisicamente.

3.3.1 Ligantes

O cimento utilizado nos ensaios experimentais realizados é o CEM I 42,5R (produzido pela Secil). Foram também utilizados dois tipos de MgO diferentes. O MgO australiano, designado por MgO-A, foi disponibilizado pela empresa *Causmag*. O MgO espanhol, designado por MgO-E, foi fornecido pela empresa *Baymag*. Ambos os óxidos são utilizados em percentagens iguais, de substituição de cimento.

Em conjunto com os MgOs, foi utilizada escória, de modo a contribuir para a utilização de uma maior percentagem de substituição do cimento.

3.3.2 Agregados

Os agregados naturais utilizados nas argamassas desta investigação são fornecidos pela empresa Soarvamil.

Os agregados reciclados utilizados nas argamassas são provenientes de resíduos da construção e demolição (RCD) e fornecidos pela empresa Vimajas.

Dado que os agregados reciclados (AR) tinham uma maior granulometria do que a desejada para a produção destas argamassas, recorreu-se à máquina de abrasão *Los Angeles*. Desta forma, conseguiu-se moer os AR e obter a granulometria desejada. Para a realização desta moagem, inseriu-se os AR na máquina de *Los Angeles* com a respetiva carga de abrasão, que foi constituída por 12 esferas de aço, cada uma com massa entre 390 e 445 g. Após a moagem, os AR foram peneirados na máquina de peneiração do Laboratório de Construção do IST, de modo a obter-se a granulometria inicialmente definida para os agregados naturais.

A composição dos AR está representada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Composição do AR fino

Composição AR fino	
AR fino	%
<i>Betão, argamassas e pedra natural</i>	75,2
<i>Alvenaria- materiais argilosos</i>	11,6
<i>Vidro</i>	1,0
<i>Materiais betuminosos</i>	10,5
<i>Outros</i>	1,7
<i>Total</i>	100,0

3.4 Composição e produção das argamassas

3.4.1 Introdução

Nesta campanha experimental, a produção das argamassas foi baseada na produção tradicional, composta por ligante, agregados e água.

Com vista a se estudar soluções mais sustentáveis, substituiu-se parcialmente o cimento por alternativas como MgO e escória. No seguimento da busca de alternativas mais sustentáveis, analisa-se também a substituição total dos agregados naturais por agregados reciclados.

3.4.2 Relação água / ligante

A relação água / ligante considerada nas argamassas com agregados naturais foi de 0,49, tendo sido definida em função da trabalhabilidade desejada, de 200 ± 50 mm.

De forma a obter a mesma consistência nas argamassas com AR, definiu-se uma relação água / ligante de 0,69 para estas argamassas.

3.4.3 Composição das argamassas de referência

Foram produzidas duas argamassas de referência, onde apenas se utilizou cimento como ligante. No entanto, uma delas foi produzida com agregados naturais e outra com AR. Estas argamassas são uma referência, isto é, assumimos o desempenho destas como referência, comparando os resultados obtidos nas restantes argamassas com os verificados nestas. Nas Tabelas 3.5 e 3.6, pode-se analisar os materiais, e respetivas quantidades, utilizados na produção das argamassas de referência com agregados naturais e reciclados, respetivamente.

A composição escolhida para estas argamassas seguiu o método proposto por Nepomuceno, com um traço volumétrico de 1:4, uma vez que este método permite aproximar estas argamassas de microbetões.

Tabela 3.5 - Composição da argamassa de referência com agregados naturais

Materiais	Massa (kg)	
Cimento	2,620	
Agregados naturais	Areia fina	2,757
	Areia grossa	2,757
Água	1,287	

Tabela 3.6 - Composição da argamassa de referência com agregados reciclados

Materiais	Massa (kg)
Cimento	2,620
Agregados reciclados	5,182
Água	1,761

3.4.4 Composição das argamassas em análise

No decorrer desta campanha experimental, foram produzidas várias argamassas com diferentes percentagens de MgO. Refira-se que o MgO utilizado foi sempre uma mistura, em partes iguais, de dois tipos de MgO. Com esta mistura pretende-se, de forma a analisar-se a influência do uso simultâneo de 2 MgOs com diferentes reatividades (um muito reativo, o australiano, e outro pouco reativo, o espanhol). Por outras palavras, decidiu-se combinar diferentes MgOs para se analisar o comportamento de argamassas produzidas simultaneamente com estes 2 MgOs e verificar se existem benefícios no desempenho das mesmas.

Produziu-se também argamassas com diferentes percentagens de escória, individualmente e com MgO em simultâneo. A substituição parcial de cimento por MgO e escória foi executada em percentagens de 10 e 20%. A substituição parcial de cimento por MgO e escória em simultâneo foi executada em percentagens de 20, 30 e 40%.

Para além das argamassas referidas acima, foram produzidas outras com as mesmas substituições parciais de cimento, mas com a substituição dos agregados naturais, na sua totalidade, por AR. Na Tabela 3.7, pode-se observar a identificação de todas as argamassas produzidas na presente investigação.

Tabela 3.7 - Identificação das argamassas produzidas

Identificação das argamassas	% de MgO	% de escória	% total de cimento substituído	% de AR
AC	0	0	0	
A10M	10	0	10	
A20M	20	0	20	
A10E	0	10	10	
A20E	0	20	20	0
A10M10E	10	10	20	
A20M10E	20	10	30	
A10M20E	10	20	30	
A20M20E	20	20	40	
AC-R	0	0	0	
A10M-R	10	0	10	
A20M-R	20	0	20	
A10E-R	0	10	10	
A20E-R	0	20	20	100
A10M10E-R	10	10	20	
A20M10E-R	20	10	30	
A10M20E-R	10	20	30	
A20M20E-R	20	20	40	

3.5 Produção de argamassas

A produção das argamassas teve início com a pesagem dos vários constituintes. Como referido, no caso da produção das argamassas com AR, houve necessidade de um procedimento extra. Como os AR de RCD fornecidos pela empresa Vimajas tinham dimensões superiores às desejadas, foi necessário moer os agregados para se obter uma granulometria igual à determinada para os agregados naturais.

Após pesar os vários constituintes, procedeu-se à humedificação do balde e da espátula da misturadora.

As argamassas foram produzidas segundo a norma europeia EN 1015-2 (1998).

O procedimento adotado foi o seguinte:

- introduziu-se no recipiente da misturadora os ligantes e a água;
- colocou-se o recipiente na misturadora e ligou-se o programa automático do equipamento;
- após 30 segundos com movimento lento, adicionou-se os agregados durante 30 segundos;
- em seguida, iniciou-se o movimento rápido;
- após 30 segundos, desligou-se a misturadora e retirou-se o material aderente às paredes do recipiente; o repouso da argamassa durou 90 segundos;
- após esses 90 segundos, iniciou-se novamente o movimento rápido, durante 60 segundos.

Com os moldes limpos e lubrificados com óleo descofrante, colocou-se a argamassa no molde (cada molde é composto por 3 provetes de 160x40x40 mm), enchendo-se aproximadamente até metade da altura do provete e compactando 25 vezes com um pilão. Colocou-se outra camada até ao topo do molde e compactou-se do mesmo modo.

Após a compactação, alisou-se a superfície, de modo a retirar a argamassa em excesso.

É de referir que, durante as primeiras 24 h de cura, para minimizar a evaporação inicial da água das argamassas, colocou-se um plástico sobre os moldes.

Ao fim de 24 h, os provetes foram desmoldados e seguiram para os respetivos locais de cura, consoante o ensaio a que se destinavam. Os provetes que se destinavam ao ensaio de retração seguiram para a câmara seca, cujas condições são de, aproximadamente, 20 °C e 50% de humidade. Os provetes que se destinavam aos restantes ensaios seguiram para a câmara húmida, cujas condições são de, aproximadamente, 20 °C e 100% de humidade.

3.6 Ensaios aos agregados

Relativamente aos agregados, é muito importante realizar-se ensaios que permitam controlar o seu futuro desempenho aquando na mistura. Nesta investigação, foram realizados alguns dos ensaios mais importantes, nomeadamente a análise granulométrica e massa volúmica e absorção de água.

3.6.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica permite determinar a dimensão das partículas sólidas de um material e a frequência com que ocorrem num dado intervalo de tamanho de partículas. A realização deste ensaio

ajuda a compreender o comportamento e a influência da areia na estrutura porosa da argamassa.

Foi realizada a análise granulométrica da areia natural (tanto da areia fina - 0/1 - como da areia grossa - 0/4) e dos AR, e o método adaptado na execução da mesma seguiu a norma europeia EN 1015-1 (1998).

Equipamento

O equipamento necessário para a realização do ensaio foi:

- estufa ventilada a 105 ± 5 °C;
- balança com precisão até 0,1 g;
- peneiros de malha quadrada (a Tabela 3.8 apresenta as aberturas dos peneiros utilizados);
- máquina de vibração horizontal.

Tabela 3.8 - Abertura dos peneiros

Abertura dos peneiros (mm)
8,000
4,000
2,000
1,000
0,500
0,250
0,125
0,630

Procedimento

O procedimento adotado para a realização do ensaio foi:

- secou-se a amostra (cerca de 3 kg) numa estufa à temperatura de 105 ± 5 °C durante 48 horas;
- encaixou-se os peneiros uns nos outros, de modo que o peneiro de cima tivesse sempre malha com abertura superior ao que se encontrava imediatamente abaixo;
- introduziu-se a amostra no peneiro de malha superior e colocou-se o conjunto de peneiros em vibração horizontal, numa máquina apropriada para esse fim;
- passado aproximadamente um minuto, desligou-se a vibração e pesou-se a massa de agregados retida em cada peneiro.

Resultados

A percentagem retida em cada peneiro foi dada pela Equação 3.1.

$$\% \text{ retida} = \frac{m_{\text{peneiro}}}{m_{\text{total}}} \times 100\% \quad \text{Equação 3.1}$$

sendo,

- % retida - percentagem retida em cada peneiro (%);
- m_{peneiro} - massa obtida em cada peneiro (kg);
- m_{total} - massa total da amostra (kg).

Determinada a percentagem de material retida em cada peneiro e as percentagens acumuladas, traçou-se a curva granulométrica dos agregados. Uma vez que na presente investigação apenas se utilizou AR finos, só foram analisados os agregados reciclados com granulometria inferior a 4 mm.

3.6.2 Massa volúmica e absorção de água

No processo de fabrico das argamassas, por uma questão de comodidade, as quantidades dos diferentes constituintes devem ser apresentadas em massa. Por isso, tornou-se necessário efetuar a transformação dos valores de volume, obtidos do cálculo da composição ótima da argamassa, para os valores em massa correspondente.

A massa volúmica dos agregados é uma importante característica na constituição das argamassas. Permite converter traços volumétricos para traços em massa e, desta forma, determinar as quantidades necessárias (em peso) de agregados naturais e reciclados nas argamassas.

A absorção de água, nomeadamente em agregados reciclados, é bastante importante na medida em que permite determinar a quantidade de água absorvida durante a amassadura e, desta forma, compensar essa absorção, de modo a garantir as características que se pretendem para a argamassa.

A metodologia de ensaio adotada seguiu a norma NP EN 1097-6 (2003).

Equipamento

O equipamento necessário para a realização do ensaio foi:

- picnómetro;
- termómetro;
- hexametáfosfato de sódio em pó;
- estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C;
- máquina de peneiração;
- peneiros com malha de abertura entre 0,063 e 4 mm;
- balança de precisão $\pm 0,1$ %.

Procedimento

O procedimento adotado para a realização do ensaio foi:

- imergiu-se o provete de ensaio, previamente preparado, no picnómetro com água a (22 ± 3) °C e agitando-se cuidadosamente, de forma a eliminar o ar ocluído;
- colocou-se o picnómetro em banho maria e manteve-se o mesmo a uma temperatura de (22 ± 3) °C durante $(24 \pm 0,5)$ horas;
- no fim deste período, retirou-se o picnómetro do banho maria e removeu-se o ar ocluído voltando a agitar, com cuidado;
- adicionou-se água no picnómetro até transbordar, colocou-se a tampa sem deixar ar dentro do mesmo e, depois de se secar o picnómetro por fora, procedeu-se à pesagem (M_2);
- registou-se a temperatura da água;

- decantou-se a maioria da água que cobria o provete e esvaziou-se o picnómetro sobre um tabuleiro;
- voltou a encher-se o picnómetro com água e a colocar-se tampa no mesmo, tendo se de seguida secado o picnómetro por fora e procedido à respetiva pesagem (M_3);
- registou-se novamente a temperatura da água, verificando-se que a sua variação não excede 2 °C, desde a medição anterior (condição recomendada);
- de modo a evaporar a humidade superficial dos agregados, estes foram colocados num tabuleiro e expostos a uma leve corrente de ar, tendo sido remexidos diversas vezes, até que não fosse visível humidade superficial e as partículas do agregado não aderissem umas às outras;
- remexeu-se o provete até que este atingisse a temperatura ambiente;
- colocou-se o provete saturado com superfície seca num tabuleiro de forma a efetuar-se a pesagem do provete (M_1);
- por fim, secou-se o agregado em estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C até se obter massa constante e registou-se como (M_4).

O ensaio de absorção de água de AR segue o mesmo procedimento, mas foi utilizado hexametáfosfato de sódio em pó para que ocorresse uma dispersão nas partículas, possibilitando assim a correta execução deste ensaio.

Resultados

As massas volúmicas dos agregados foram calculadas através das Equação 3.2, 3.3 e 3.4.

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad [kg/dm^3] \quad \text{Equação 3.2}$$

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad [kg/dm^3] \quad \text{Equação 3.3}$$

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad [kg/dm^3] \quad \text{Equação 3.4}$$

Relativamente à absorção de água (em percentagem da massa seca), após a imersão durante 24 horas, obtém se através da Equação 3.5.

$$WA_{24} = \frac{M_1 - M_4}{M_4} \times 100 \quad [\%] \quad \text{Equação 3.5}$$

sendo,

ρ_a - massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/dm^3);

ρ_{rd} - massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/dm^3);

ρ_{ssd} - massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/dm³);

ρ_w - massa volúmica da água (kg/dm³);

WA₂₄ - absorção de água após imersão em água durante 24 h (%);

M₁ - massa do agregado saturado com superfície seca (g);

M₂ - massa do picnómetro contendo o provete imerso na água e saturado (g);

M₃ - massa do picnómetro cheio de água (g);

M₄ - massa do provete de ensaio seco em estufa (g).

3.7 Ensaios de argamassas no estado fresco

Quando as argamassas estão no estado fresco, é importante realizar alguns ensaios que permitam controlar o seu futuro desempenho no estado endurecido. Nesta investigação, foram realizados alguns dos ensaios mais importantes, nomeadamente os de trabalhabilidade e de massa volúmica.

3.7.1 Trabalhabilidade

Nesta investigação, um dos critérios importantes na formulação das argamassas foi a manutenção da trabalhabilidade através do ajuste da relação água/ligante efetiva. Para tal, determinou-se a consistência das argamassas segundo a norma europeia EN 1015-3 (1999).

Na presente investigação, definiu-se que o espalhamento das argamassas deveria ser de 200±50 mm.

Equipamento

O equipamento necessário para a realização deste ensaio foi:

- mesa de espalhamento;
- molde cónico truncado;
- colher de pedreiro;
- pilão;
- craveira;
- pano húmido.

Procedimento

O procedimento utilizado para a realização do ensaio foi o seguinte:

- antes do ensaio, limpou-se a superfície do disco e as bordas do molde com um pano húmido, de modo a deixar a superfície húmida, mas não enxaguada;
- centrou-se o molde no disco da mesa de espalhamento e colocou-se a argamassa em duas camadas, cada uma compactada por 10 pancadas com o pilão;
- retirou-se a argamassa em excesso com uma espátula, limpou-se a área livre do disco e secou-se, com especial cuidado, de forma a remover toda a água ao redor da borda inferior do molde;
- levantou-se o molde, verticalmente e lentamente, e espalhou-se a argamassa no disco através de 15 pancadas, com uma frequência constante de cerca de uma pancada por segundo;

- com recurso à craveira, mediu-se o diâmetro (em mm) da argamassa espalhada em duas direções perpendiculares.

Resultados

O resultado deste ensaio corresponde à média das duas medições realizadas. No caso de os valores individuais variarem menos de 10% da média, esta média corresponde ao valor da consistência da argamassa. Se a referida variação for superior a 10%, o ensaio é repetido, utilizando-se a mesma amostra. Se estes novos resultados divergirem da média menos de 10%, considera-se esta nova média como o valor da consistência da argamassa. Se tal não se verificar, estas medições são consideradas insatisfatórias, sendo o ensaio repetido com uma nova amostra.

3.7.2 Massa volúmica

Este ensaio é executado de acordo com a norma EN 1015-6 (1998) e tem como objetivo verificar a influência dos diversos constituintes na massa volúmica da argamassa, no estado fresco.

Equipamento

O equipamento necessário para a realização deste ensaio foi:

- recipiente metálico cilíndrico, com capacidade de 1 L;
- espátula;
- colher de pedreiro;
- pilão;
- balança com precisão de 0,1 g.

Procedimento

O procedimento adotado para a realização do ensaio foi o seguinte:

- pesou-se o recipiente metálico;
- encheu-se o mesmo recipiente até cerca de metade da sua capacidade e compactou-se com 15 pancadas com o pilão;
- encheu-se o recipiente até à sua capacidade máxima e compactou-se da mesma forma;
- retirou-se a argamassa excedente, recorrendo à espátula, limpou-se a parte de fora do recipiente e pesou-se.

Resultados

Este ensaio determina, de forma rápida, a massa volúmica de uma argamassa através do quociente entre a massa de uma amostra desta argamassa e o volume por si ocupado, recorrendo à Equação 3.6.

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_V} \quad \text{Equação 3.6}$$

sendo,

- ρ_m - massa volúmica da argamassa em pasta (g/dm^3);
- m_1 - massa do recipiente metálico (g);
- m_2 - massa do recipiente metálico e do total de argamassa em pasta contida no seu interior (g);

- V_v - volume da argamassa contido no interior do recipiente, que é idêntico à sua capacidade máxima (1 L).

3.8 Ensaios de argamassas no estado endurecido

Os ensaios de argamassas no estado endurecido são os mais importantes, uma vez que estes permitem caracterizar o desempenho mecânico e a durabilidade das mesmas.

3.8.1 Resistência à flexão

O ensaio de resistência à flexão permite avaliar a influência do MgO, da escória e dos ARF no desempenho mecânico das argamassas. Este ensaio foi realizado tendo em conta a norma europeia EN 1015-11 (1999).

Foram utilizados 3 provetes prismáticos curados em camara húmida.

Equipamento

O equipamento necessário para a realização deste ensaio foi a máquina de ensaios do Laboratório do IST.

Procedimento

O procedimento adotado para a realização do ensaio foi o seguinte:

- após a cura, colocou-se os provetes sobre os cilindros de apoio da máquina de ensaios, de forma que estes ficassem perpendiculares ao seu eixo longitudinal;
- aplicou-se uma carga concentrada a meio vão (aproximadamente), uniforme, com valores no intervalo de 10 a 50 N/s, de modo que a rotura ocorresse no intervalo de 30 a 90 s;
- anotou-se o valor máximo da carga aplicada (em N).

Resultados

A resistência à flexão foi determinada recorrendo à Equação 3.7:

$$f = 1,5 \frac{Fl}{bd^2} \quad \text{Equação 3.7}$$

sendo,

- f - resistência à flexão (MPa);
- F - carga máxima aplicada (N);
- l - distância entre apoios (mm);
- b - largura do prisma (mm);
- d - espessura do prisma (mm).

Segundo a norma europeia, o valor da resistência à flexão de cada provete é arredondado a 0,05 N/mm² e a média dos valores é arredondada a 0,1 N/mm².

3.8.2 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão também permite avaliar a influência do MgO, da escória e dos ARF no desempenho mecânico das argamassas. Este ensaio foi realizado tendo em conta a norma europeia EN 1015-11 (1999).

Neste ensaio, utilizou-se uma das metades resultantes de cada provete ensaiado à flexão.

Equipamento

O único equipamento necessário para a realização deste ensaio é a máquina de ensaios.

Procedimento

O procedimento adotado para a realização do ensaio foi o seguinte:

- após a cura, e após os provetes terem sido ensaiados à flexão, colocou-se os semi-prismas (resultantes desse mesmo ensaio) sobre o acessório adequado para o ensaio;
- aplicou-se uma carga uniforme com uma velocidade compreendida no intervalo de 50 a 500 N/s, a fim de a rotura ocorrer num período de 30 a 90 s;
- anotou-se o valor máximo de carga aplicada (em N).

Tendo em conta as características das argamassas, e de modo a que a duração do ensaio fosse a especificada na norma europeia considerada, aplicou-se uma carga uniforme com velocidade de 1000 N/s.

Resultados

A resistência à compressão é determinada recorrendo à Equação 3.8.

$$f = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 3.8}$$

sendo,

- f - resistência à compressão (MPa);
- F - carga máxima aplicada (N);
- A - área da zona comprimida (mm²).

Segundo a norma europeia considerada, o valor da resistência à compressão de cada provete é arredondado a 0,05 N/mm² e a média dos valores é arredondada a 0,1 N/mm².

3.8.3 Módulo de elasticidade

A determinação do módulo de elasticidade das argamassas permite avaliar a capacidade destas para absorver tensões e fornece uma estimativa relativamente à sua resistência à fendilhação.

Este ensaio de módulo de elasticidade dinâmico foi realizado em consideração com o descrito na norma E 1876-1 (2010). O procedimento descrito nesta norma não permite determinar diretamente o módulo de elasticidade de cada provete, mas sim a sua frequência de ressonância. A determinação do módulo de elasticidade dinâmico é feita recorrendo a um programa computacional adequado.

Foram utilizados 3 provetes prismáticos curados em camara húmida.

Equipamento

O equipamento necessário para a realização deste ensaio foi:

- balança com precisão de 0,1 g;
- máquina de ensaios;
- sensor de impulsos;
- martelo impulsor;
- sistema de apoios.

Procedimento

O procedimento adotado para a realização do ensaio foi o seguinte:

- após a cura, foram registadas as massas dos provetes;
- posteriormente foram determinadas as frequências de ressonância dos provetes de dois modos diferentes: modo de vibração em flexão e modo de vibração em torção.

Resultados

O valor da frequência de ressonância em cada ponto de medição corresponde à média de quatro leituras. O valor do módulo de elasticidade dinâmico é determinado recorrendo a um programa de computador. Para tal, tem que se introduzir os seguintes dados de cada provete: massa, dimensões e valores das frequências de ressonância em cada ponto medido.

3.8.4 Velocidade de propagação dos ultrassons

Esta propriedade permite avaliar a qualidade e homogeneidade das argamassas, sendo correlacionável com a resistência à compressão e com o módulo de elasticidade, de modo a que de modo que uma argamassa com maior velocidade de propagação de ultrassons reflete indiretamente uma melhor qualidade, por conter menor volume de vazios e, como tal, tem melhores propriedades mecânicas.

Foram utilizados 3 provetes prismáticos curados em camara húmida.

Equipamento

O equipamento necessário para a realização deste ensaio foi:

- máquina de ultrassons;
- vaselina;
- espátula para barrar a vaselina.

Procedimento

O procedimento adotado para a realização do ensaio foi o seguinte:

- após o ensaio do módulo de elasticidade, unta-se as extremidades dos provetes com vaselina, de modo a garantir uma boa aderência entre o provete e o emissor/recetor da máquina dos ultrassons;
- de seguida, coloca-se o emissor/recetor nas extremidades do provete e faz-se a leitura da velocidade. Repete-se o processo, no mínimo, 4 vezes.

Resultados

Os valores lidos diretamente do aparelho correspondem à velocidade de ultrassons (em m/s). Esta velocidade foi obtida através da média de quatro leituras.

3.8.5 Absorção de água por capilaridade

A análise da absorção por capilaridade permite determinar a capacidade de a argamassa absorver água por ascensão através dos vasos capilares. O ensaio de absorção por capilaridade de argamassas Este_ ensaio foi realizado segundo o proposto na especificação LNEC E-393 (1993).

Neste ensaio, foram utilizadas metades dos provetes resultantes dos provetes anteriormente ensaiados à flexão, curados em câmara húmida.

Equipamento

O equipamento necessário para a realização deste ensaio foi:

- balança com precisão de 0,1 g;
- estufa ventilada à temperatura de 60 ± 5 °C;
- barras de plástico de suporte;
- tina transparente;
- papel absorvente;
- campânula.

Procedimento

O procedimento adotado para a realização do ensaio foi o seguinte:

- após o ensaio à flexão, colocou-se as metades dos provetes a secar na estufa ventilada à temperatura de 60 ± 5 °C, durante 14 dias até atingirem massa constante;
- após os provetes atingirem massa constante, foram pesados e introduzidos na tina, verticalmente, com as faces de corte em contacto com a água;
- encheu-se a tina com água, até que o nível da água atingisse 5 ± 1 mm acima da face inferior do provete e tapou-se a tina com uma campânula de modo a evitar a evaporação;
- passados 90 minutos, retirou-se os provetes, limpou-se a superfície imersa em papel absorvente, foram pesados e colocados novamente na tina;
- repetiu-se o procedimento 180, 360, 1440 e 4320 minutos após a imersão inicial.

Resultados

A determinação da absorção de água por capilaridade, ao fim dos 90, 180, 360, 1440 e 4320 minutos após a imersão inicial foi efetuada através da Equação 3.9.

$$A_c = \frac{M_i - M_0}{A_s} \quad [g/mm^2] \quad \text{Equação 3.9}$$

onde,

- A_c - absorção de água por capilaridade, no instante t_i (g/mm^2);
- M_i - massa do provete, quando este esteve em contacto com a água durante o tempo t_i (g);
- M_0 - massa do provete seco em estufa (g);

- A_sAS - área da face inferior do provete, que esteve em contacto com a água (mm^2).

3.8.6 Absorção de água por imersão

O ensaio da absorção de água por imersão permite avaliar a durabilidade da argamassa, determinando a porosidade da mesma. Desta forma, este ensaio é um indicador do volume de vazios da argamassa.

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma RILEM Test No. I.1 (1980).

Neste ensaio, foram utilizadas as metades que resultaram dos provetes após o ensaio à flexão.

Equipamento

O equipamento necessário para a realização deste ensaio foi:

- exsiccador + bomba;
- balança com precisão de 0,1 g;
- estufa ventilada a 60 ± 5 °C.

Procedimento

O procedimento adotado para a realização do ensaio foi o seguinte:

- após o ensaio à flexão, colocou-se metades dos provetes a secar na estufa até atingirem massa constante (a variação de massa entre dois dias consecutivos tem de ser inferior a 0,2%);
- após os provetes atingirem massa constante, foram pesados e colocados em vácuo (exsiccador + bomba) durante 2 h;
- após as 2 h de vácuo, imergiu-se os provetes em água durante 24 h à pressão atmosférica;
- após as 24 h mediu-se as massas dos provetes, imersos em água (pesagem hidrostática) e saturados, mas com superfície seca.

Resultados

A percentagem de água absorvida por cada provete pode ser obtida através da Equação 3.10.

$$P_{ab} = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100 (\%) \quad \text{Equação 3.10}$$

sendo,

- m_1 - massa do provete seco (g);
- m_2 - massa do provete saturado, pesado dentro de água (g);
- m_3 - massa do provete saturado (g).

3.8.7 Resistência à carbonatação

A realização deste ensaio seguiu as especificações da norma E 391-1993. Apesar de esta norma ser referente a amostras de betão, poderá ser considerada na presente investigação uma vez que a argamassa a analisar pode ser considerada um microbetão.

Neste ensaio, foram utilizados 3 provetes curados em camara húmida.

Equipamento

O equipamento necessário para a realização deste ensaio foi:

- câmara de carbonatação com 5 ± 1 % de CO_2 , com 60 ± 5 % de humidade relativa e à temperatura de 23 ± 3 °C;
- solução alcoólica de fenolftaleína a 0,1%;
- craveira.

Procedimento

O procedimento adotado para a realização do ensaio foi o seguinte:

- após realização do ensaio de flexão aos provetes oriundos da câmara de carbonatação, borrifou-se as faces de uma das metades resultantes da flexão com a solução de fenolftaleína;
- mediu-se, com a craveira, a penetração da carbonatação da face de cada semi-prisma.

Resultados

A medição da frente de carbonatação tem de ser feita considerando as especificações referidas na norma. Assim, o valor da profundidade de carbonatação de cada argamassa corresponde à média dos valores obtidos para cada face de corte ensaiada.

3.8.8 Retração

O ensaio foi realizado de acordo com a norma europeia EN 1015-3 (1993), que permite determinar a influência dos AR, do MgO e da escória na retração das argamassas. Este ensaio irá permitir verificar se a utilização de MgO e escória como ligantes em argamassas possibilita a diminuição da retração nas mesmas, tal como verificado por Gao *et al.* (2013) e Mo *et al.* (2012), e se essa diminuição permite compensar o aumento da retração relativo à incorporação de agregados reciclados.

Neste ensaio, foram considerados 3 provete curados em câmara seca.

Equipamento

O equipamento necessário para a realização deste ensaio foi:

- pernos;
- defletómetro.

Procedimento

O procedimento adotado para a realização do ensaio foi o seguinte:

- zerou-se o valor da posição inicial do defletómetro;
- mediu-se cada provete segundo o seu eixo longitudinal na vertical, realizando-se, pelo menos, quatro medições em cada extremo do provete;
- repetiu-se o procedimento todos os dias durante a primeira semana, de dois em dois dias nas duas semanas seguintes, de três em três dias na semana seguinte e de semana a semana daí em diante.

Resultados

A variação dimensional, em percentagem, de cada provete é dada pela Equação 3.11.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \times 100\%$$

Equação 3.11

sendo,

- ε - variação específica do comprimento;
- ΔL - variação do comprimento do provete, relativamente ao comprimento inicial (mm);
- L - comprimento inicial do provete (mm).

O resultado da retração de cada argamassa foi calculado com recurso à média dos valores individuais da retração de dois provetes.

4 Análise e discussão dos resultados

4.1 Introdução

De modo a concluir sobre se a utilização de MgO, escória e AR finos em materiais cimentícios é vantajosa, é importante determinar e analisar os resultados obtidos nas diferentes propriedades estudadas. Para tal, o presente capítulo serve para apresentar de forma clara e sucinta os resultados obtidos durante a campanha experimental.

Em primeira instância, são apresentadas as propriedades dos diferentes constituintes que formam o ligante utilizado na produção das argamassas. Em segundo lugar, são descritos os resultados obtidos nos ensaios aos agregados.

Seguidamente, são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados às argamassas no estado fresco. Por último, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios às argamassas no estado endurecido.

Sempre que possível, os resultados obtidos na presente dissertação foram relacionados com os apresentados no Capítulo 2, de modo a entender melhor as tendências verificadas.

4.2 Propriedades dos ligantes

4.2.1 Composição química

Recorrendo ao ensaio de análise da composição química por difração por raios-x, determinou-se a composição química dos ligantes utilizados.

Ao observar a Tabela 4.1, destaca-se a pureza do MgO Australiano (MgO-A), com cerca de 98,8% de MgO puro, enquanto o MgO Espanhol (MgO-E) apresenta uma pureza de 85,0%.

Foi possível também determinar a composição química de cada um dos restantes materiais utilizados para formar o ligante. O cimento utilizado (CEM I 42,5 R) apresenta elevada quantidade de óxido de cálcio (64,8%) e sílica (18,1%). Na escória, como esperado, os óxidos que se apresentam em maior quantidade são o óxido de cálcio (28,2%) e o óxido férrico (28,5%).

4.2.2 Análise granulométrica

Recorrendo ao ensaio de análise granulométrica por difração a *laser*, determinou-se a distribuição granulométrica do cimento, da escória e dos dois MgO utilizados como ligantes.

Os resultados são apresentados na Tabela 4.2. Observando a tabela apresentada, verifica-se que enquanto o MgO-A apresenta, na generalidade, partículas mais pequenas (96,1% das quais com diâmetro inferior a 32 μm), o MgO-E apresenta partículas maiores (72,6% das quais com diâmetro superior a 32 μm).

Por sua vez, a escória e o cimento apresentam uma distribuição granulométrica bastante semelhante.

Além disso, o MgO-E apresenta uma distribuição granulométrica pouco extensa, quando comparada com a da escória ou a do cimento, o que terá influência no desempenho das argamassas que

incorporam estes materiais, como se verá adiante.

Tabela 4.1 - Caracterização química dos ligantes

Óxidos	Cimento (%)	Escória (%)	MgO-E (%)	MgO-A (%)
MgO	2,12	5,67	84,97	98,80
Na ₂ O	0,14	0,18		
Al ₂ O ₃	5,42	10,14	1,62	0,10
SiO ₂	18,05	17,66	6,53	0,29
P ₂ O ₅	0,03	0,42	0,07	
SO ₃	4,81	0,33	0,09	0,05
K ₂ O	0,74	0,03	0,15	
CaO	64,79	28,18	3,09	0,53
TiO ₂	0,34	0,65	0,07	
V ₂ O ₅	0,02	0,11		
Cr ₂ O ₃	0,51	2,38		
MnO ₂		5,45	0,13	
Fe ₂ O ₃	2,92	28,48	3,28	0,17
NiO				0,01
CuO	0,02	0,02		
ZnO	0,04	0,02		
SrO	0,05	0,05		
Zr		0,02		
BaO		0,17		0,05
WO ₃		0,02		
Nb ₂ O ₅		0,03		
Soma	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabela 4.2 - Distribuição granulométrica dos ligantes por difração a laser

Material	Diâmetro da partícula	Diâmetro da partícula	Partículas no intervalo
	< 3 µm (%)	> 32 µm (%)	3-32 µm (%)
Cimento	25.9	17.9	56.2
Escória	27.3	21.3	51.4
MgO-E	12.1	72.6	15.3
MgO-A	40.1	3.9	56.0

4.2.3 Superfície específica

Ao analisar os resultados obtidos no ensaio de determinação da superfície específica dos ligantes (Tabela 4.3), verifica-se que a escória e o cimento têm uma superfície específica idêntica, sendo que o próprio MgO-E apresenta valores dentro da mesma ordem de grandeza. No entanto, a superfície específica do MgO-A é muito superior à destes últimos. O facto de este último elemento apresentar uma superfície específica tão elevada deve-se à forma das partículas deste MgO e à sua pequena dimensão.

Tabela 4.3 - Superfície específica dos ligantes

Ligante	S _{BET} (m ² /g)
Cimento	2,8
Escória	1,6
MgO-E	4,9
MgO-A	51,2

4.2.4 Reatividade do MgO

A análise da reatividade de cada MgO influencia a rapidez com que cada um destes é capaz de reagir.

O interesse em misturar em partes iguais estes dois MgO assenta na diferença destas propriedades em cada um deles. O facto de o MgO-A apresentar uma elevada reatividade pode ser prejudicial para as argamassas, uma vez que reage muito rápido e provoca uma elevada expansão inicial. Assim, é exatamente por esse motivo que poderá ser interesse misturar dois MgOs com diferentes propriedades, uma vez que o MgO-E menos reativo poderá contrariar este efeito inicial. Deste modo, a presente dissertação pretende analisar os possíveis benefícios desta mistura.

Importa destacar que a reatividade elevada (baixo tempo de reatividade - 14 segundos) obtida para o MgO-A (Tabela 4.4) está diretamente relacionada com a elevada superfície específica obtida no ensaio anteriormente realizado (51,2 m²/g).

Tabela 4.4 - Reatividade dos MgOs

Ensaio de reatividade aos MgOs		
MgO-E	3544	segundos
MgO-A	14	segundos

4.3 Propriedades dos agregados

4.3.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica dos diferentes agregados utilizados na presente investigação foi realizada de acordo com a norma EN 1015-1 a amostras de 3 kg (aproximadamente). Os resultados obtidos para os agregados naturais, areia fina e areia grossa, são apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6 respetivamente.

Tabela 4.5 - Análise granulométrica da areia fina

Abertura dos peneiros (mm)	Granulometria (%)
4	0,0
2	0,1
1	1,3
0,5	25,1
0,25	51,9
0,125	16,6
0,063	5,0
0	0,0

Tabela 4.6 - Análise granulométrica da areia grossa

Abertura dos peneiros (mm)	Granulometria (%)
4	0,0
2	23,5
1	50,3
0,5	19,6
0,25	4,0
0,125	2,2
0,063	0,4
0	0,1

A curva granulométrica adotada para a argamassa de referência incorpora 50% de areia fina e outros 50% de areia grossa. Deste modo, a incorporação de ARF nas argamassas deverá substituir tanto a areia fina como a areia grossa, ou seja, para uma percentagem de incorporação de 50% de ARF, deverá substituir 50% da areia total (fina e grossa). Para facilitar este processo, determinou-se a distribuição granulométrica resultante da utilização de 50% de cada uma das areias referidas e, desta forma, a substituição parcial de AN por ARF é baseada nesta nova distribuição granulométrica. Os resultados dessa distribuição são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Distribuição granulométrica da incorporação de 50% de areia fina e 50% de areia grossa

Abertura dos peneiros (mm)	Granulometria (%)
4	0,0
2	11,8
1	25,8
0,5	22,4
0,25	28,0
0,125	9,4
0	0,1

Uma vez que é importante manter a granulometria dos agregados na substituição de AN por ARF, é necessário utilizar uma curva granulométrica dos ARF idêntica à da areia fina e areia grossa (50% - 50%). Utilizar granulometrias semelhantes na substituição dos AN por ARF é importante porque possibilita uma análise mais direta e precisa da influência que essa substituição pode ter. Apenas se considerou granulometrias abaixo de 4 mm uma vez que se quer analisar a influência da substituição de agregados finos naturais por agregados finos reciclados.

4.3.2 Massa volúmica e absorção de água

A massa volúmica foi determinada para os diferentes agregados: areia fina, areia grossa e agregados reciclados finos. Como referido no subcapítulo 3.3.2, para cada material, determinou-se a massa volúmica aparente (ρ_a), a massa volúmica das partículas secas em estufa (ρ_{rd}) e a massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (ρ_{ssd}). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.8.

Verifica-se que a massa volúmica dos AR finos é menor do que a dos AN finos. Estes resultados eram expectáveis, uma vez que Silva *et al.* (2014) referem que a densidade dos agregados reciclados de betão diminui devido à pasta de ligante original aderida às partículas. Apesar de os AR utilizados serem de RCD, estes são maioritariamente constituídos por betão. Para além disso, estes AR também possuem cerâmicos, que têm uma densidade inferior à dos AN.

Também se determinou a absorção de água, apresentada na Tabela 4.8, propriedade de igual importância, pois pode condicionar significativamente a relação água / ligante total das argamassas produzidas. Esta característica influencia diretamente a resistência mecânica das argamassas, uma vez que o aumento do valor de absorção de água dos agregados pode originar uma maior porosidade, característica diretamente relacionada com o desempenho das argamassas no estado endurecido.

O ensaio da absorção de água dos agregados naturais (ensaio do picnómetro, referido no subcapítulo 3.3.3) apenas determina o valor referente a uma imersão durante 24 horas (A24h). Os resultados obtidos, e apresentados na Tabela 4.8, para a areia fina, areia grossa e AR finos foram de 0,3, 0,7 e 10,2%, respetivamente. Devido à maior porosidade que os AR finos apresentam (comparando com os AN), além do valor de absorção de água resultante da imersão do material durante 24 horas, é importante determinar a absorção de água dos AR durante o período de produção da argamassa, A_{10min} (esse período corresponde a 10 min). Assim sendo, essa absorção inicial foi determinada e o valor obtido foi igual a 86% do valor total da absorção dos ARF às 24 horas.

No que concerne à absorção inicial dos AR finos, o valor obtido demonstra que grande parte da absorção dos mesmos é feita nos primeiros minutos da amassadura. Este parâmetro é importante na medida em que ajuda a perceber a variação da relação água / ligante que as argamassas que incorporam este material vão ter.

Relativamente aos valores de absorção em 24 horas, verifica-se que os valores dos AR finos são bastante superiores aos dos AN. Estes resultados estão de acordo com o descrito por Evangelista e de Brito (2010), Fan *et al.* (2016) e Silva *et al.* (2014), uma vez que estes autores referem que a maior porosidade dos agregados reciclados origina uma maior capacidade de absorção de água dos mesmos. O incremento da sua porosidade é justificado por Silva *et al.* (2014) como sendo devido à presença de AR cerâmicos e à presença de pasta de ligante original aderida às partículas dos AR de betão.

Estudou-se também a baridade da areia fina, da areia grossa e dos AR finos. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.8 - Massa volúmica e absorção de água aos agregados

Massa volúmica (kg/m ³)	Material		
	Areia fina	Areia grossa	AR finos
ρ_a	2603,9	2626,3	2650,5
ρ_{rd}	2583,2	2581,4	2064,8
ρ_{ssd}	2591,2	2598,5	2159,0
Absorção de água (%)	0,3	0,7	10,2

Tabela 4.9 - Baridade dos diversos materiais

Materiais	<i>Areia fina</i>	<i>Areia grossa</i>	<i>AR fino</i>
Baridade (kg/m³)	1530	1540	1380

4.4 Propriedades das argamassas no estado fresco

4.4.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade foi determinada recorrendo ao ensaio de consistência por espalhamento. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma europeia EN 1015-3 (1999) e visa determinar a quantidade de água a utilizar na mistura, de modo a obter a consistência desejada. Nesta dissertação, uma vez que as argamassas estudadas podem ser consideradas microbetões e é importante que haja uma boa consistência, adotou-se 200 ± 50 mm como espalhamento adequado. A relação água / ligante foi ajustada sempre que necessário, de modo a obter a trabalhabilidade acima referida.

Os resultados do ensaio de consistência por espalhamento são apresentados nas Tabelas 4.10 e 4.11.

De acordo com os resultados apresentados, é possível verificar que, ao integrar AR finos, foi necessário aumentar a quantidade de água necessária para se manter a consistência e, conseqüentemente, a relação água / ligante da argamassa. Considerou-se uma relação água / ligante de 0,69 para as misturas com AR finos. Silva *et al.* (2014) verificaram também um aumento da relação água / ligante em materiais cimentícios com AR, sendo que atribuíram essa tendência à maior capacidade de absorção de água e maior angulosidade dos AR finos, relativamente aos AN finos. Refira-se que, tendo em conta que a absorção de água às 24 horas dos AR é de 10,2% e que a absorção de água a 10 minutos corresponde a 86% deste valor, a relação água / ligante efetiva das misturas com AR é de 0,52.

Analisando as tabelas separadamente, verifica-se que, quando se integra escória individualmente, o espalhamento da mistura aumenta, tanto no caso das argamassas sem AR como no caso das argamassas com AR. O mesmo se verifica nas argamassas sem AR, com a introdução de MgO.

Tabela 4.10 - Consistência por espalhamento e relação água / ligante

Argamassa	Espalhamento (mm)	$\Delta A0$	Relação a/l
AC	224	-	0,49
A10M	238	6%	0,49
A20M	235	5%	0,49
A10E	250	11%	0,49
A20E	256	14%	0,49
A10M10E	228	2%	0,49
A10M20E	249	11%	0,49
A20M10E	247	10%	0,49
A20M20E	241	8%	0,49

Tabela 4.11 - Consistência por espalhamento e relação água / ligante das misturas com AR fino

Argamassa	Espalhamento (mm)	$\Delta A0$	Relação a/l
AC-R	204	-	0,69
A10M-R	204	0%	0,69
A20M-R	204	0%	0,69
A10E-R	210	3%	0,69
A20E-R	210	3%	0,69
A10M10E-R	221	8%	0,69
A10M20E-R	241	15%	0,69
A20M10E-R	223	6%	0,69
A20M20E-R	228	3%	0,69

4.4.2 Massa volúmica

O ensaio de massa volúmica no estado fresco seguiu a norma europeia EN 1015-6 (1998). Todas as misturas estudadas foram sujeitas a este ensaio, de modo a quantificar a influência da incorporação de AR finos, MgO e escória na mistura. Os resultados são apresentados na Tabelas 4.12 e 4.13.

Tabela 4.12 - Massa volúmica no estado fresco (em kg/m³)

Argamassa	Massa volúmica (kg/m ³)	ΔAc
AC	2620	-
A10M	3038	16%
A20M	3018	15%
A10E	2236	-15%
A20E	2219	-15%
A10M10E	2173	-17%
A10M20E	2202	-16%
A20M10E	2189	-16%
A20M20E	2182	-17%

Tabela 4.13 - Massa volúmica no estado fresco (em kg/m³)

Argamassa	Massa volúmica (kg/m ³)	ΔAc
AC-R	1909	-
A10M-R	1916	0,4%
A20M-R	1954	2,2%
A10E-R	1895	-0,6%
A20E-R	1839	-3,6%
A10M10E-R	1866	-2,2%
A10M20E-R	1899	-0,6%
A20M10E-R	1847	-3,2%
A20M20E-R	1925	0,8%

Através da Tabela 4.12, foi possível verificar que a introdução de MgO origina um aumento da massa volúmica no estado fresco das argamassas. Pelo contrário, a utilização de escória provoca uma diminuição desta propriedade.

Ao analisar as Tabelas 4.12 e 4.13, conclui-se que, nas argamassas que contêm AR finos, as tendências para a variação da massa volúmica relativamente à AC são semelhantes às obtidas para as argamassas sem AR, mas muito menos acentuadas.

4.5 Propriedades das argamassas no estado endurecido

4.5.1 Resistência à compressão e à flexão

O ensaio foi realizado de acordo com o descrito na norma europeia EN 1015-11 (1999), tendo sido repetido a 7, 28 e 91 dias de idade de cada argamassa.

O efeito da incorporação de MgO e escória, em separado e em simultâneo, na resistência à compressão e à flexão a 28 dias, é apresentado nas Tabelas 4.14 e 4.15, respetivamente.

Nas referidas tabelas, colocou-se um parâmetro com a soma das variações obtidas em cada um dos materiais em separado, de modo a determinar qual a variação esperada para cada uma das argamassas que incorporam os dois materiais em simultâneo.

Analisando as tabelas, é possível verificar que, a 28 dias de cura em câmara húmida, à medida que o teor de MgO aumenta, tanto a resistência à compressão como à flexão têm tendência a diminuir. No caso da resistência à compressão, quando se incorpora apenas 10% de MgO, verifica-se uma perda

de 17% e, quando se incorpora 20% de MgO, verifica-se uma perda de 23%. Esta tendência também se confirma na flexão, mas com perdas inferiores (até 16%).

Tabela 4.14 - Resistência à compressão a 28 dias

Misturas	AC	A10M	A20M	A10E	A20E	A10M10E	A10M20E	A20M10E	A20M20E
Resistência à compressão - 28 dias (MPa)	54,34	45,32	41,88	43,85	41,70	40,26	33,74	34,28	26,88
MgO		-17%	-23%						
Δ real (%)	Escória			-19%	-23%				
	MgO + Escória					-26%	-38%	-37%	-51%
Δ esperada (%)*						-36%	-40%	-42%	-46%
Substituição total de cimento (%)	0%	10%	20%	10%	20%	20%	30%	30%	40%

* Δ esperada (%) da argamassa AxMyE corresponde à soma da Δ real (%) da argamassa AxM com a Δ real (%) da argamassa AyE.

Tabela 4.15 - Resistência à flexão a 28 dias

Misturas	AC	A10M	A20M	A10E	A20E	A10M10E	A10M20E	A20M10E	A20M20E
Resistência à flexão - 28 dias (MPa)	6,95	6,46	5,85	7,22	6,84	6,42	5,33	5,44	4,34
MgO		-7%	-16%						
Δ real (%)	Escória			4%	-2%				
	MgO + Escória					-8%	-23%	-22%	-38%
Δ esperada (%)*						-3%	-9%	-12%	-18%
Substituição total de cimento (%)	0%	10%	20%	10%	20%	20%	30%	30%	40%

* Δ esperada (%) da argamassa AxMyE corresponde à soma da Δ real (%) da argamassa AxM com a Δ real (%) da argamassa AyE.

Relativamente à incorporação de escória, verifica-se a mesma tendência de diminuição da resistência à compressão com o aumento do teor. Para uma incorporação de 10%, tem-se uma perda de resistência à compressão de 19% e, para uma substituição de 20%, obteve-se uma perda de 23%. No entanto, para um acréscimo de 10% de escória, verifica-se um acréscimo pouco significativo (apenas de 4%) da resistência à flexão. Este pequeno acréscimo desaparece aquando da utilização de 20% de escória, verificando-se mesmo uma diminuição de 2%, comparativamente à AC.

Uma análise interessante consiste na observação de que existe um melhoramento da resistência à compressão com a introdução simultânea de MgO e escória, relativamente ao resultado teórico expectável, ou seja, relativamente à soma dos efeitos da colocação individual destes elementos. A mesma tendência não se verifica na resistência à flexão.

É também interessante analisar-se se a soma das adições incorporadas, como substitutos do cimento, é inferior à variação obtida relativamente à argamassa de referência. Por exemplo, a argamassa A20M20E

corresponde a uma argamassa em que se substituiu 40% do cimento Portland por 20% de MgO e 20 % de escória. A 28 dias de cura, verificou-se uma diminuição em 51% da sua capacidade resistente à compressão, comparativamente à argamassa de referência. Assim, pode-se constatar que a diminuição ocorrida na resistência à compressão (51%) é superior à soma das adições (40%). Nesta situação, o resultado obtido para esta taxa máxima de substituição é visto como desfavorável, considerando apenas esta propriedade, pois a diminuição é maior do que a taxa de cimento substituída. Através desta análise, pode-se constatar que todas as argamassas analisadas possuem diminuições da resistência à compressão superiores às taxas de cimento poupadas. Pelo contrário, obteve-se em todas as argamassas diminuições da resistência à flexão inferiores às percentagens de cimento substituídas.

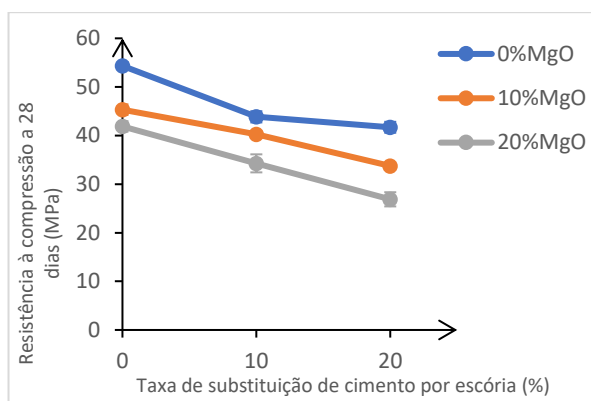


Figura 4.1 - Relação entre resistência à compressão e a taxa de substituição de MgO e escória a 28 dias

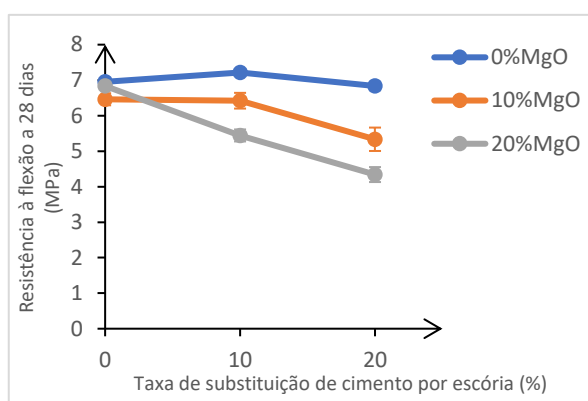


Figura 4.2 - Relação entre resistência à flexão e a taxa de substituição de MgO e escória

As Figuras 4.1 e 4.2 confirmam que as resistências à compressão e à flexão a 28 dias diminuem com o aumento do teor de MgO e com o aumento da escória.

Os valores obtidos a 28 dias estão coerentes com os resultados obtidos por Gonçalves et al. (2020) e apresentados em 2.4.1.2. A 28 dias, os autores obtêm um decréscimo de resistência de aproximadamente 21,2% para uma substituição parcial de 20% de MgO, enquanto na presente investigação ocorre um decréscimo de 23% para a mesma taxa de incorporação de MgO.

Mo et al. (2015) concluíram que, à medida que o tempo de cura aumenta, a diferença de resistência entre a argamassa de referência e a argamassa com MgO tende a diminuir. Na presente investigação, constata-se que, ao longo do tempo, a variação entre a resistência à compressão nos betões com MgO e no betão de referência tende a ser semelhante. A 7 dias, o betão com MgO apresenta um decréscimo de resistência entre 17% (incorporação de 10% de MgO) e 23% (incorporação de 20% de MgO), relativamente ao valor de referência. A 91 dias, essa redução de resistência varia entre 13% (10% de MgO) e 25% (20% de MgO). No caso da resistência à flexão, verifica-se mesmo um aumento da variação das argamassas com MgO em relação à argamassa de referência com o aumento do tempo de cura.

A tendência verificada nos resultados da resistência à compressão está de acordo com os estudos expostos em 2.4.1.2. Em suma, a redução dos valores de resistência à compressão em materiais cimentícios com incorporação de MgO, como substituto parcial de cimento, pode-se explicar por diversas razões:

- a incorporação de MgO leva a uma diminuição da quantidade de cimento e, sendo os produtos de hidratação do cimento (C-S-H) mais resistentes do que os do óxido ($Mg(OH)_2$), quanto maior a quantidade de MgO presente no betão, maior será a redução da resistência à compressão (Mo et al., 2015);
- a própria natureza expansiva do MgO poderá causar fissuras no material cimentício, aumentando a porosidade do mesmo, fator determinante no que respeita à resistência à compressão.

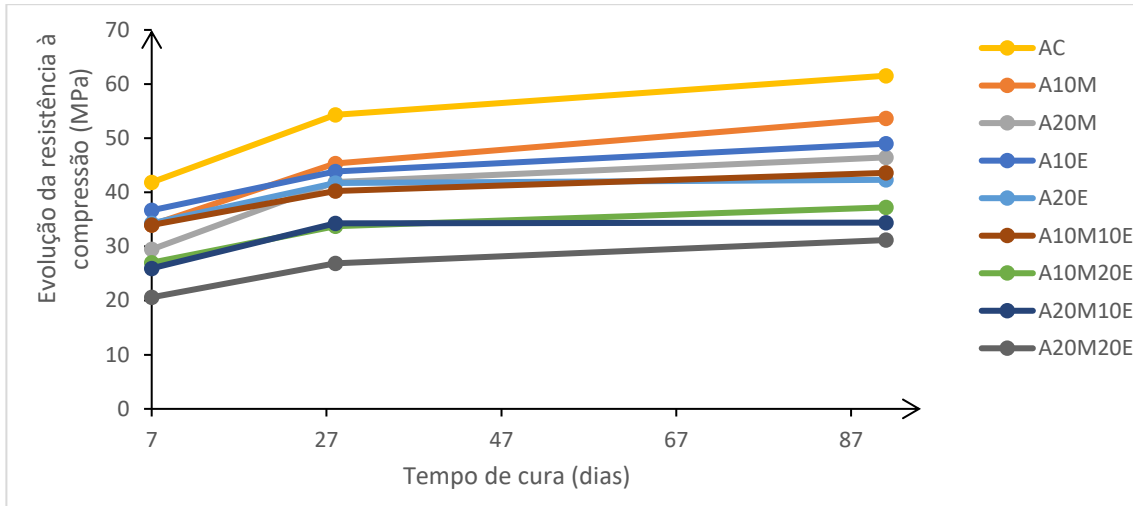


Figura 4.3 - Evolução da resistência à compressão em 91 dias

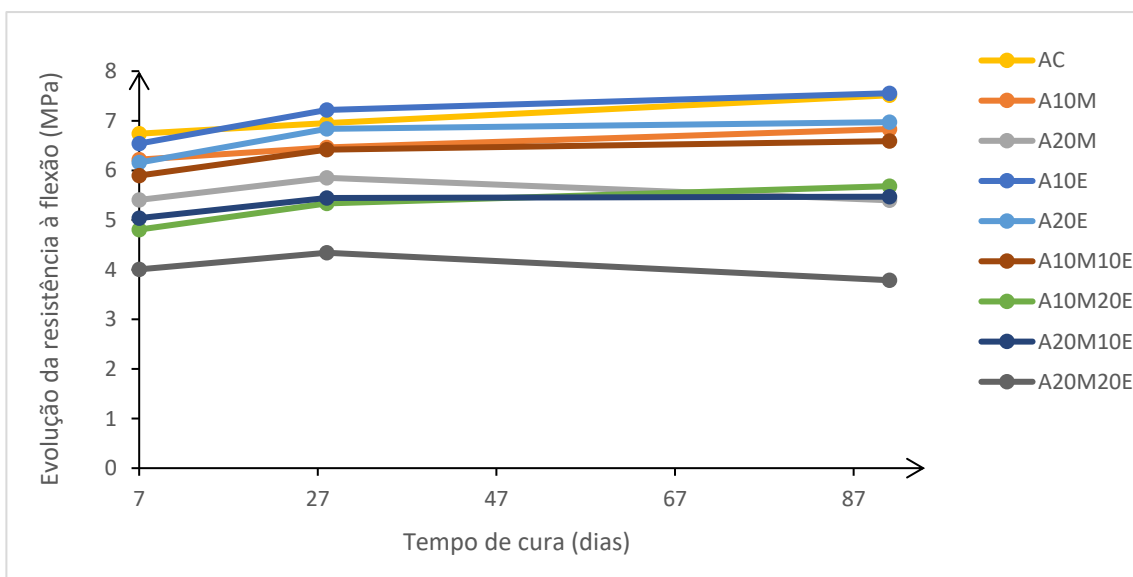


Figura 4.4 - Evolução da resistência à flexão em 91 dias

Analisando as Figuras 4.3 e 4.4, é perceptível, de um modo geral, que ao longo de 91 dias todas as argamassas melhoram de forma semelhante as suas resistências, quer à compressão quer à flexão, exceto a argamassa A20M20E, em que se verifica uma diminuição da resistência à flexão de 28 para 91 dias.

Destaca-se o facto de a argamassa A10E, que incorpora 10% de escória, apresentar um aumento de 1%, em relação à argamassa de referência, da resistência à flexão ao final de 91 dias de cura. Por sua vez, a argamassa 20E apresentou um decréscimo de apenas 7% na resistência à compressão a 91 dias, em

comparação com a argamassa de referência. Estes resultados, apesar de serem muito próximos, não confirmam os incrementos de resistência obtidos por Yun et al. (2020). Os autores referem que a percentagem ótima de substituição de cimento por escória é de 40% e que essa substituição incrementa a resistência dos materiais cimentícios em cerca de 3 e 12% a 28 e 90 dias de cura, respetivamente.

Tabela 4.16 - Evolução da resistência à compressão em argamassas curadas em CO₂

Argamassas	Resistência à compressão (MPa)											
	28	σ	ΔA_0	CO14-28d	σ	ΔA_0	CO28-42d	σ	ΔA_0	91	σ	ΔA_0
AC	54,3	0,8	-	60,3	0,5	-	56,8	1,5	-	61,5	1,3	-
A10M	45,3	1,1	-17%	53,0	0,2	-12%	55,9	2,3	-1%	53,7	2,3	-13%
A20M	41,9	1,1	-23%	50,4	2,3	-16%	53,3	0,0	-6%	46,5	1,2	-25%
A10E	43,9	1,2	-19%	54,4	0,9	-10%	56,0	0,0	-1%	49,0	1,0	-20%
A20E	41,7	1,1	-23%	51,8	1,4	-14%	53,2	1,8	-6%	42,3	2,6	-31%
A10M10E	40,3	0,4	-26%	44,4	0,9	-26%	54,3	1,0	-4%	43,6	0,6	-29%
A10M20E	33,7	0,4	-38%	37,1	0,6	-38%	52,2	0,8	-8%	37,2	0,9	-40%
A20M10E	34,3	1,9	-37%	38,2	1,7	-37%	50,2	0,0	-12%	34,4	1,0	-44%
A20M20E	26,9	1,5	-51%	32,7	1,3	-46%	44,5	0,0	-22%	31,2	0,9	-49%

Tabela 4.17 - Evolução da resistência à flexão em argamassas curadas em CO₂

Argamassas	Resistência à flexão (MPa)											
	28	σ	ΔA_0	CO14-28d	σ	ΔA_0	CO28-42d	σ	ΔA_0	91	σ	ΔA_0
AC	7,0	0,1	-	5,2	0,9	-	5,0	0,3	-	7,5	0,2	-
A10M	6,5	0,2	-7%	4,5	0,2	-14%	4,6	0,0	-7%	6,8	0,0	-9%
A20M	5,9	0,2	-16%	4,4	0,3	-16%	4,5	0,0	-9%	5,4	0,2	-28%
A10E	7,2	0,1	4%	7,6	0,1	46%	7,4	0,3	49%	7,6	0,2	1%
A20E	6,8	0,1	-2%	7,4	0,3	43%	7,5	0,4	51%	7,0	0,3	-7%
A10M10E	6,4	0,2	-8%	4,9	0,1	-5%	5,7	0,7	15%	6,6	0,3	-12%
A10M20E	5,3	0,3	-23%	7,2	0,1	40%	7,8	0,6	57%	5,7	0,3	-24%
A20M10E	5,4	0,2	-22%	5,9	0,1	15%	2,5	0,3	-49%	5,5	0,7	-27%
A20M20E	4,3	0,2	-38%	5,2	0,1	0%	4,3	0,3	-14%	3,8	0,2	-50%

Ao analisar as Tabelas 4.16 e 4.17, é de destacar a forma positiva como a carbonatação influencia as resistências das argamassas que incorporam escória. Esta influência positiva nas argamassas sujeitas a carbonatação forçada ocorre especialmente no ensaio de resistência à flexão, em que as argamassas com escória apresentam valores de resistência à flexão muito superiores aos da argamassa de referência (acréscimos entre 43 e 51%).

Os resultados obtidos estão de acordo com os de Hussain *et al.* (2020), ou seja, em argamassas que contêm escória, a cura em câmara de carbonatação promove a redução da porosidade. Esta propriedade é correlacionável com a resistência, uma vez que uma menor porosidade contribui para uma maior coesão

da estrutura da argamassa, pelo que é expectável um melhor desempenho em termos de resistência.

Nas Tabelas 4.18 e 4.19, é possível analisar os resultados obtidos com a substituição da totalidade dos AN por AR e a respetiva variação para a argamassa de controlo (com 100% de AN). Ao analisar a tabela, conclui-se que a incorporação de AR finos implicou uma perda de resistência de 60 a 76% na resistência à compressão e de 39 a 57% na resistência à flexão, em relação à argamassa de referência. Destaca-se que a introdução de AR nas argamassas originou quase sempre diminuições superiores nas argamassas com MgO e/ou escória, comparativamente com o que se observou na argamassa de controlo.

Tabela 4.18 - Variação da resistência à compressão ao incorporar AR

Resistência à compressão - 28 dias (MPa)			
ARGAMASSAS	0% AR	100%AR	Δ A0
AC	54,3	21,3	-61%
A10M	45,3	18,1	-60%
A20M	41,9	13,9	-67%
A10E	43,9	15,4	-65%
A20E	41,7	11,7	-72%
A10M10E	40,3	10,8	-73%
A10M20E	33,7	7,9	-76%
A20M10E	34,3	12,3	-64%
A20M20E	26,9	8,9	-67%

Tabela 4.19 - Variação da resistência à flexão ao incorporar AR

Resistência à flexão - 28 dias (MPa)			
ARGAMASSAS	0% AR	100%AR	Δ A0
AC	7,0	4,2	-40%
A10M	6,5	3,8	-40%
A20M	5,9	3,3	-44%
A10E	7,2	3,9	-46%
A20E	6,8	3,0	-56%
A10M10E	6,4	2,8	-56%
A10M20E	5,3	2,3	-57%
A20M10E	5,4	3,3	-39%
A20M20E	4,3	2,0	-54%

De forma a confirmar as tendências descritas, nas tabelas 4.20 e 4.21, é possível analisar as variações esperadas e as variações realmente obtidas, e concluir que, ao integrar os AR finos, os decréscimos obtidos foram sempre superiores ao esperado, quer na compressão quer na flexão, com exceção dos resultados obtidos no ensaio à compressão nas argamassas A20M10E-R e A20M20E-R.

Tabela 4.20 - Resistência à compressão a 28 dias em argamassas com AR

Misturas	AC-R	A10M-R	A20M-R	A10E-R	A20E-R	A10M10E-R	A10M20E-R	A20M10E-R	A20M20E-R
Resistência à compressão - 28 dias (MPa)	21,25	18,05	13,88	15,35	11,70	10,81	7,93	12,33	8,90
Δ real (%)	MgO	-15%	-35%						
	Escória			-28%	-45%				
	MgO + Escória					-49%	-63%	-42%	-58%
Δ esperada (%)*						-43%	-60%	-62%	-80%
Substituição total de cimento (%)	0%	10%	20%	10%	20%	20%	30%	30%	40%

* Δ esperada (%) da argamassa AxMyE corresponde à soma da Δ real (%) da argamassa AxM com a Δ real (%) da argamassa AyE.

Tabela 4.21 - Resistência à flexão a 28 dias em argamassas com AR

Misturas	AC-R	A10M-R	A20M-R	A10E-R	A20E-R	A10M10E-R	A10M20E-R	A20M10E-R	A20M20E-R
Resistência à flexão - 28 dias (MPa)	4,18	3,85	3,27	3,89	2,97	2,82	2,31	3,29	2,02
Δ real (%)	MgO	-8%	-22%						
	Escória			-7%	-29%				
	MgO + Escória					-32%	-45%	-21%	-52%
Δ esperada (%)*						-15%	-37%	-29%	-51%
Substituição total de cimento (%)	0%	10%	20%	10%	20%	20%	30%	30%	40%

* Δ esperada (%) da argamassa AxMyE corresponde à soma da Δ real (%) da argamassa AxM com a Δ real (%) da argamassa AyE.

Por último, é importante perceber qual a influência da incorporação simultânea de AR finos, MgO e escória nas argamassas, ao longo do tempo. Para tal, analisou-se os resultados das diversas argamassas em diferentes tempos de cura (a 7, 28 e 91 dias).

Relativamente à variação da resistência ao longo do tempo, verifica-se nas Figuras 4.5 e 4.6 que, existe uma tendência de evolução semelhante em todas as argamassas com AR.

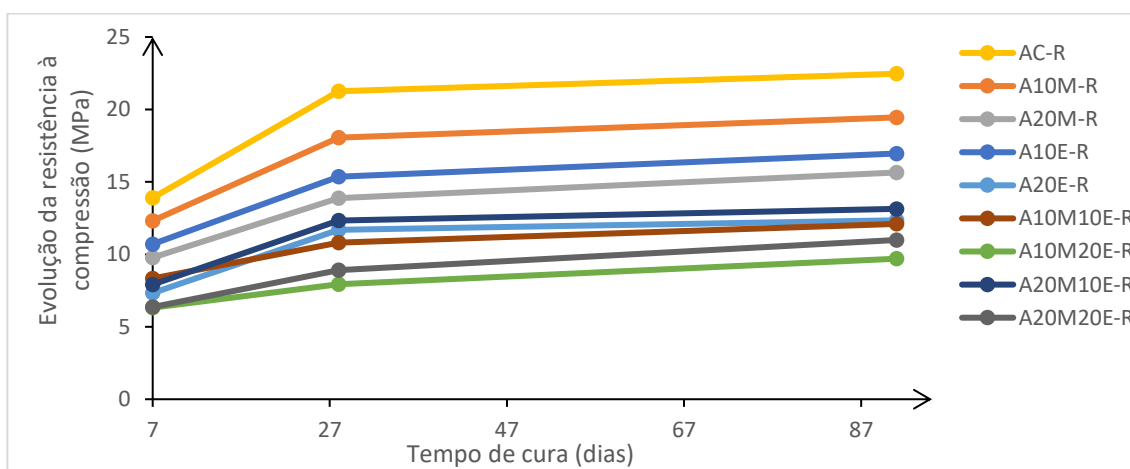


Figura 4.5 - Evolução da resistência à compressão em 91 dias em argamassas com AR

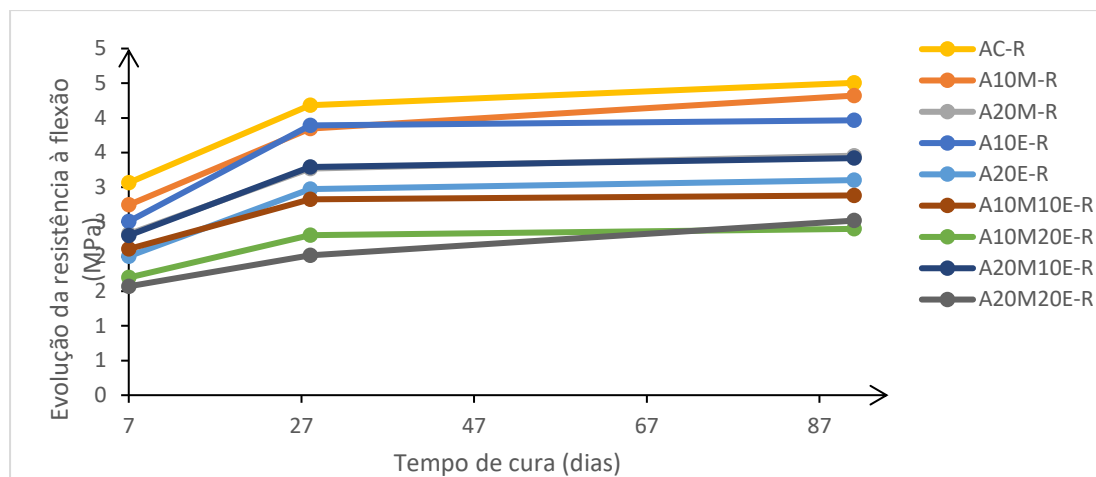


Figura 4.6 - Evolução da resistência à flexão em 91 dias em argamassas com AR

Analisando ainda esses gráficos, é possível concluir que a utilização de escória afeta particularmente as argamassas com AR finos, tanto quando utilizada individualmente como quando usada em simultâneo com o MgO. É de destacar que a maior diminuição das resistências nas argamassas com MgO e/ou escória, ao introduzir-se AR, ocorre nas três idades estudadas (7, 28 e 91 dias).

As Tabelas 4.22 e 4.23 permitem duas análises muito importantes. Primeiro, permitem analisar os resultados obtidos a 28 dias de cura nas argamassas com AR finos, aquando da introdução de MgO e/ou escória. Ao fazê-lo, conclui-se que, ao integrar 10 e 20% de MgO, ocorre uma perda de resistência à compressão de 15 e 35%, que é semelhante à obtida nas argamassas com AN finos (cerca de 17 e 23%). Por sua vez, ao utilizar-se escória individualmente, é de destacar que este material afeta mais as argamassas com AR finos. Nas argamassas com AR, verificam-se decréscimos na resistência à compressão a 28 dias de 28 e 45% para incorporações de 10 e 20% deste material. Por sua vez, nas argamassas com AN, ocorrem decréscimos de 19 e 23% para as mesmas taxas de incorporação.

Tabela 4.22 - Evolução da resistência à compressão em argamassas com AR curadas em CO₂

Argamassas	Resistência à compressão (MPa)								
	28	σ	Δ_{Ac}	CO14-28d	σ	Δ_{A28}	CO28-42d	σ	Δ_{A28}
AC-R	21,3	0,7	-	31,5	1,3	48%	34,4	0,3	62%
A10M-R	18,1	0,4	-15%	23,6	0,6	30%	27,1	0,3	50%
A20M-R	13,9	2,0	-35%	22,8	0,9	65%	26,5	0,7	91%
A10E-R	15,4	0,4	-28%	16,3	2,1	6%	18,5	1,5	21%
A20E-R	11,7	0,3	-45%	15,2	0,7	30%	17,0	2,2	45%
A10M10E-R	10,8	0,3	-49%	24,6	0,5	127%	26,6	0,4	147%
A10M20E-R	7,9	0,2	-63%	21,7	1,0	174%	23,4	1,7	196%
A20M10E-R	12,3	0,4	-42%	25,1	0,3	104%	25,4	0,6	106%
A20M20E-R	8,9	0,0	-58%	20,3	1,0	128%	23,9	1,4	168%

Tabela 4.23 - Evolução da resistência à flexão em argamassas com AR curadas em CO₂

Argamassas	Resistência à compressão (MPa)								
	28	σ	Δ_{Ac}	CO14-28d	σ	Δ_{A28}	CO28-42d	σ	Δ_{A28}
AC-R	4,2	0,2	-	6,0	0,2	43%	6,9	0,3	65%
A10M-R	3,8	0,3	-8%	5,6	0,0	46%	6,0	0,0	56%
A20M-R	3,3	0,2	-22%	5,2	0,8	58%	5,5	0,4	69%
A10E-R	3,9	0,2	-7%	5,6	0,2	44%	6,6	0,2	69%
A20E-R	3,0	0,3	-29%	5,2	0,1	76%	5,3	0,3	77%
A10M10E-R	2,8	0,1	-32%	3,1	0,4	11%	3,7	0,1	32%
A10M20E-R	2,3	0,1	-45%	2,2	0,1	-6%	2,7	0,3	16%
A20M10E-R	3,3	0,3	-21%	2,4	0,0	-28%	2,5	0,1	-23%
A20M20E-R	2,0	0,3	-52%	2,5	0,3	23%	2,5	0,4	26%

As mesmas tendências são obtidas quando se considera os dois ligantes (MgO e escória) em simultâneo, ou seja, a introdução simultânea destes substitutos do cimento afeta as argamassas com AR de forma mais significativa do que as que incorporam AN. Refira-se que são observadas tendências semelhantes para a resistência à flexão.

A segunda análise decorrente das Tabelas 4.22 e 4.23 consiste na avaliação da influência da cura em câmara de carbonatação das argamassas com AR. Note-se que, tanto nos resultados à compressão como à flexão, há um aumento da resistência com o aumento do tempo de cura em câmara de carbonatação. Pode-se então concluir que este tipo de cura promove o desenvolvimento resistente das argamassas com AR.

Importa destacar, ao comparar as argamassas com 28 dias de cura em câmara húmida com as argamassas curadas durante 14 dias em câmara húmida e 14 dias em câmara de carbonatação, que o aumento de resistência provocado pela carbonatação das argamassas é muito mais intenso nas argamassas que contêm AR, comparativamente com as argamassas com AN. Verifica-se o mesmo comportamento nos resultados de resistência à flexão.

Em termos gerais, foi constante a constatação de que, à medida que a percentagem de MgO, escória e AR aumenta, o desempenho mecânico das argamassas diminui. Por exemplo, considerando que as percentagens de perda de resistência mecânica das argamassas que incorporam 100% de AR, 20% de MgO e 20% de escória são de 52 e 58%, na resistência à flexão e à compressão, respetivamente, em relação à argamassa de referência, é perceptível que a utilização simultânea destes três materiais não origina uma sobreposição de efeitos, ou seja, a utilização simultânea dos três materiais na produção de argamassas origina uma redução menor, apesar de significativa, do que a soma dos efeitos individuais de cada material.

4.5.2 Módulo de elasticidade

O ensaio referente ao módulo de elasticidade dinâmico das argamassas produzidas decorreu como especificado na norma E 1876-1 (2010), sendo realizado a 28 dias de idade de cada argamassa

produzida, para além de ter sido ensaiados provetes após 14 e 28 dias em câmara de carbonatação, ou seja, com 28 e 42 dias de idade, respetivamente.

Ao analisar a Tabela 4.24, verifica-se que não existem variações significativas desta propriedade, mesmo para grandes taxas de substituição de cimento. Primeiramente, pode-se analisar as incorporações de MgO, em que ocorre um decréscimo de 10 e 16% para taxas de substituição de 10 e 20%, respetivamente. De seguida, pode-se verificar que a incorporação da escória se traduz num decréscimo de 4 e 8%, para taxas de substituição de 10 e 20%, respetivamente.

Tabela 4.24 - Módulo de elasticidade a 28 dias

Misturas	AC	A10M	A20M	A10E	A20E	A10M10E	A10M20E	A20M10E	A20M20E
Módulo de elasticidade - 28 dias (GPa)	35,39	31,96	29,69	33,98	32,63	32,58	31,38	32,10	31,12
Δ real (%)									
MgO		-10%	-16%						
Escória				-4%	-8%				
MgO + Escória						-8%	-11%	-9%	-12%
Δ esperada (%)*						-14%	-17%	-20%	-24%
Substituição total de cimento (%)	0%	10%	20%	10%	20%	20%	30%	30%	40%

*Δ esperada (%) da argamassa AxMyE corresponde à soma da Δ real (%) da argamassa AxM com a Δ real (%) da argamassa AyE.

Ao incorporar os dois materiais em simultâneo, o máximo decréscimo do módulo de elasticidade é de 12% para a argamassa A20M20E, ou seja, para uma substituição de 40% de cimento, obteve-se um decréscimo de 12%, o que acaba por ser uma relação substituição / perda bastante interessante. Todas as argamassas tiveram uma variação real inferior à variação esperada, o que significa que a adição simultânea de MgO e escória é bastante benéfica para o módulo de elasticidade das argamassas.

Na Figura 4.7, verifica-se um decréscimo da propriedade com o aumento da percentagem de MgO. Os resultados estão coerentes com o estudo de Sequeira *et al.* (2021), onde os autores verificaram que a perda da capacidade de resistir elasticamente atinge a maior redução em betões com 20% de MgO na sua constituição e que essa redução ocorre de maneira praticamente linear. Os autores obtiveram reduções máximas de 6,7 e 14,6% com diferentes tipos de MgO.

De acordo com a Tabela 4.25, ao comparar esta propriedade em argamassas curadas 28 dias em câmara húmida e em argamassas curadas 14 dias em câmara húmida e 14 ou 28 dias em câmara de carbonatação, conclui-se que a carbonatação das argamassas influencia o módulo de elasticidade das argamassas com MgO e com escória de forma positiva, sendo que aparentemente não tem qualquer influência na argamassa de controlo. Estes benefícios já não são tão visíveis em argamassas sujeitas a 28 dias de carbonatação.

Ao incorporar AR em argamassas, verifica-se, de acordo com a Tabela 4.26, um decréscimo na capacidade de resistir elasticamente das argamassas, sendo que esse decréscimo varia entre 49 e 65%. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Khatib (2004) e Evangelista e de Brito (2007), que também obtiveram diminuições do módulo de elasticidade em amostras de betão com ARF. Os autores

atribuem estes resultados ao aumento da porosidade das misturas, resultante da incorporação de ARF, e à própria massa volúmica aparente bastante reduzida dos ARF, em comparação com a dos ANF (como se comprovou no subcapítulo 4.3.2) , originando betões menos densos.

Os resultados obtidos também estão de acordo com os de Gonçalves *et al.* (2020).

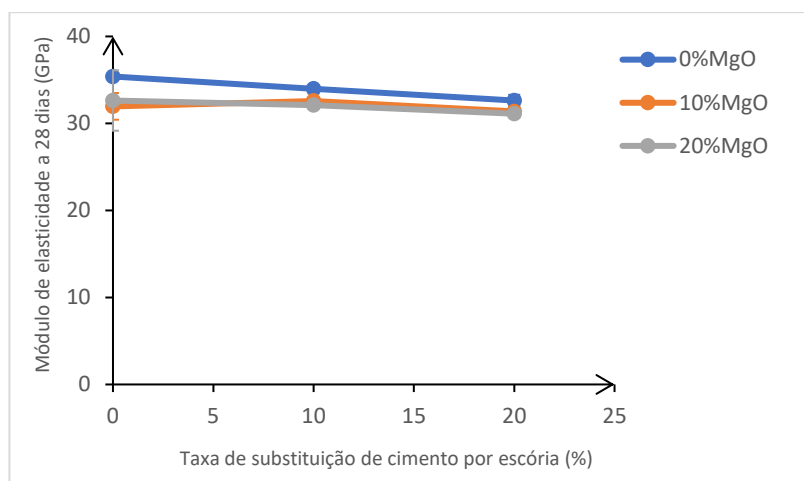


Figura 4.7 - Relação entre o módulo de elasticidade e a taxa de substituição de MgO e escória a 28 dias

Tabela 4.25 - Evolução do módulo de elasticidade em argamassas curadas em CO₂

Argamassas	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)								
	28	σ	Δ_{A0}	CO14-28d	σ	Δ_{A0}	CO28-42d	σ	Δ_{A0}
AC	35,4	0,1	-	35,5	0,2	-	36,9	0,7	-
A10M	32,0	1,5	-10%	36,2	0,5	2%	36,6	0,2	-1%
A20M	29,7	3,5	-16%	35,4	0,8	0%	35,9	0,4	-3%
A10E	34,0	0,3	-4%	35,7	0,9	1%	36,6	0,8	-1%
A20E	32,6	0,7	-8%	35,6	0,0	0%	37,4	0,1	1%
A10M10E	32,6	0,9	-8%	36,4	0,4	3%	35,7	0,9	-3%
A10M20E	31,4	0,7	-11%	36,8	0,4	4%	38,6	0,1	4%
A20M10E	32,1	0,3	-9%	37,2	0,4	5%	34,5	3,8	-7%
A20M20E	31,1	0,4	-12%	35,9	0,4	1%	36,6	0,2	-1%

Ao incorporar MgO e escória em argamassas com 100% de AR, já não se obtém variações tão pouco significativas como obtidas nas argamassas com AN. Ao analisar a Tabela 4.27, verifica-se um decréscimo de 8 e 15% para substituições de 10 e 20% de cimento por MgO, respetivamente. Por sua vez, observa-se decréscimos de 14 e 24% para substituições de 10 e 20% de cimento por escória, respetivamente. Neste caso, todas as variações reais obtidas nas argamassas com MgO e escória simultaneamente foram superiores às esperadas, o que indicia que não houve reações positivas entre estes dois elementos

Tabela 4.26 - Variação do módulo de elasticidade ao incorporar AR

Módulo de elasticidade - 28 dias (GPa)				
ARGAMASSAS	0% AR	100%AR	$\Delta A0$	
AC	35,4	17,9	-49%	
A10M	32,0	16,4	-49%	
A20M	29,7	15,2	-49%	
A10E	34,0	15,3	-55%	
A20E	32,6	13,6	-58%	
A10M10E	32,6	11,5	-65%	
A10M20E	31,4	11,4	-64%	
A20M10E	32,1	11,0	-66%	
A20M20E	31,1	11,0	-65%	

Tabela 4.27 - Módulo de elasticidade a 28 dias em argamassas com AR

Misturas	AC-R	A10M-R	A20M-R	A10E-R	A20E-R	A10M10E-R	A10M20E-R	A20M10E-R	A20M20E-R
Módulo de elasticidade -28 dias (GPa)	17,91	16,40	15,15	15,32	13,57	11,55	11,36	11,04	10,97
Δ real (%)	MgO	-8%	-15%						
	Escória			-14%	-24%				
	MgO + Escória					-36%	-37%	-38%	-39%
Δ esperada (%)*						-23%	-33%	-30%	-40%
Substituição total de cimento (%)	0%	10%	20%	10%	20%	20%	30%	30%	40%

* Δ esperada (%) da argamassa AxMyE corresponde à soma da Δ real (%) da argamassa AxM com a Δ real (%) da argamassa AyE.

Em função da Tabela 4.28, pretende-se analisar comparativamente os efeitos causados por cada um dos materiais, individualmente e em simultâneo, nas argamassas com e sem AR finos.

Ao incorporar MgO, parece que o módulo de elasticidade varia de um modo semelhante tanto em argamassas com e sem AR finos. A escória, quando integrada individualmente e em simultâneo com MgO, afeta mais o módulo de elasticidade de argamassas com AR, uma vez que estas apresentam decréscimos mais acentuados do que o que se verificou nas com AN finos.

Por fim, pode-se analisar de que forma a carbonatação influencia esta propriedade em argamassas que contêm 100% de AR finos. É de notar que, em argamassas que contêm apenas MgO, a carbonatação influencia de forma bastante positiva esta propriedade. Este efeito pode ser verificado nos resultados obtidos após 14 e 28 dias de câmara de carbonatação. Destaca-se que a introdução de 10 e 20% de MgO melhora inclusivamente o módulo de elasticidade das argamassas sujeitas a câmara de carbonatação entre 5 a 15%, quando comparadas com a argamassa de controlo.

Tabela 4.28 - Evolução do módulo de elasticidade em argamassas com AR curadas em CO₂

Argamassas	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)								
	28	σ	Δ_{A0}	CO14-28d	σ	Δ_{A0}	CO28-42d	σ	Δ_{A0}
AC-R	17,9	0,6	-	17,5	0,5	-	18,2	0,1	-
A10M-R	16,4	0,2	-8%	20,2	0,0	15%	20,9	0,4	15%
A20M-R	15,2	0,7	-15%	18,5	0,0	5%	19,9	0,6	9%
A10E-R	15,3	0,0	-14%	13,7	0,1	-22%	15,4	0,1	-15%
A20E-R	13,6	0,6	-24%	13,8	0,8	-21%	15,4	0,4	-15%
A10M10E-R	11,5	0,1	-36%	16,5	0,2	-6%	16,1	0,9	-11%
A10M20E-R	11,4	0,0	-37%	16,8	0,3	-4%	16,6	0,4	-9%
A20M10E-R	11,0	0,2	-38%	15,7	0,5	-10%	17,3	1,2	-5%
A20M20E-R	11,0	0,4	-39%	15,1	0,0	-14%	15,6	0,3	-14%

4.5.3 Velocidade de propagação de ultrassons

O presente ensaio permite determinar a velocidade da onda sónica no interior do provete de argamassa.

Na Tabela 4.29, verifica-se que a introdução de MgO, bem como a de escória, nas argamassas, como substituto parcial do cimento, tem pouca influência nos resultados. A perda de velocidade é de 3% quando se incorpora 10 ou 20% de MgO. Esta perda de velocidade está de acordo com os resultados obtidos por Sequeira *et al.* (2021), que também estudou esta propriedade para betões que incorporam MgO.

Tabela 4.29 - Velocidade de propagação dos ultrassons a 28 dias

Misturas	AC	A10M	A20M	A10E	A20E	A10M10 E	A10M20 E	A20M10 E	A20M20 E
Velocidade ultrassons - 28 dias (m/s)	4425,22	4294,78	4279,00	4253,00	4207,11	4231,17	4099,56	4121,78	3897,00
Δ real (%)	MgO	-3%	-3%						
	Escória			-4%	-5%				
	MgO + Escória					-4%	-7%	-7%	-12%
Δ esperada (%)*						-7%	-8%	-7%	-8%
Substituição total de cimento (%)	0%	10%	20%	10%	20%	20%	30%	30%	40%

* Δ esperada (%) da argamassa AxMyE corresponde à soma da Δ real (%) da argamassa AxM com a Δ real (%) da argamassa AyE.

Verifica-se uma tendência semelhante com a utilização de escória, verificando-se perdas de 4 e 5% com a utilização de 10 e 20% de escória, respetivamente. Estes valores estão de acordo com o ensaio realizado por Çakir e Akoz (2008), que obtiveram decréscimos de 5,8 e 9,9% para taxas de substituição de cimento de 30 e 60%, respetivamente. Os autores justificaram estes dados pelo facto de o ensaio ter sido realizado a 7 dias de cura, e que a tendência é que estas diferenças diminuem com o aumento do tempo de cura. Pelo contrário, Demirboga (2004) defende que a velocidade de ultrassons dos betões aumenta com o aumento da quantidade de escória de alto-forno granulada moída. É interessante notar que, quando se incorpora MgO e escória em simultâneo, a variação real é igual ou inferior à variação

esperada, exceto no caso da argamassa A20M20E. Esta última é, de facto, a argamassa com a maior redução de velocidade de ultrassons, entre todas as misturas produzidas. No entanto, não deixa de ser interessante notar que, para uma substituição de cimento de 40%, com 20% de MgO e 20% de escória, ocorre uma perda de velocidade de apenas 12%.

Analisando a Figura 4.8, verifica-se que a integração destes dois ligantes, individualmente e em conjunto, tem uma influência pouco significativa na velocidade de propagação dos ultrassons a 28 dias.

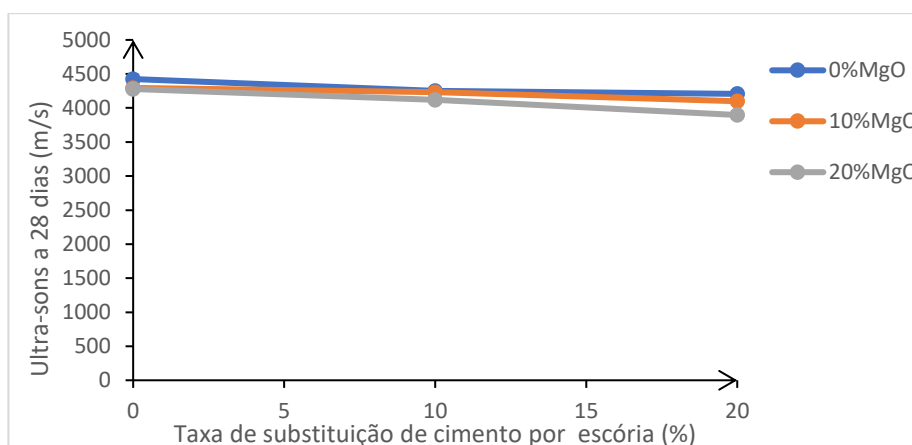


Figura 4.8 - Relação entre a velocidade de propagação dos ultrassons e a taxa de substituição de MgO e escória a 28 dias

Analisando a Tabela 4.30, conclui-se que não é clara qual a influência que a carbonatação tem na velocidade dos ultrassons de argamassas com MgO e/ou escória.

Tabela 4.30 - Evolução da velocidade de propagação dos ultrassons em argamassas curadas em CO₂

Argamassas	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DOS ULTRASSONS (m/s)								
	28	σ	Δ_{A0}	C014-28d	σ	Δ_{A0}	C028-42d	σ	Δ_{A0}
AC	4425,2	66,7	-	4314,1	6,6	-	4255,0	0,0	-
A10M	4294,8	23,7	-3%	4350,2	63,2	1%	4203,7	25,9	-1%
A20M	4279,0	33,9	-3%	4274,9	46,9	-1%	4191,0	33,3	-2%
A10E	4253,0	23,1	-4%	4211,3	16,5	-2%	4222,7	0,9	-1%
A20E	4207,1	26,1	-5%	4233,2	24,1	-2%	4235,3	9,4	0%
A10M10E	4231,2	9,2	-4%	4172,0	5,0	-3%	4226,0	16,0	-1%
A10M20E	4099,6	49,5	-7%	4022,3	8,6	-7%	4141,3	0,9	-3%
A20M10E	4121,8	32,1	-7%	3726,3	491,3	-14%	4142,7	3,8	-3%
A20M20E	3897,0	58,5	-12%	3963,7	2,6	-8%	4071,3	12,0	-4%

Apenas três das nove argamassas produzidas tiveram um aumento desta propriedade com a sua colocação em câmara de carbonatação durante 14 dias. Assim, pode-se concluir que a carbonatação não tem influência significativa na velocidade de propagação dos ultrassons nas argamassas estudadas.

Ao incorporar AR em argamassas, verifica-se um decréscimo na velocidade de ultrassons das argamassas de entre 22 e 33% (Tabela 4.31). Refira-se que a menor percentagem (22%) foi obtida para as argamassas de controlo e com 10% de MgO.

Tabela 4.31 - Variação da velocidade de propagação dos ultrassons ao incorporar AR

Velocidade de propagação dos ultrassons - 28 dias (m/s)			
ARGAMASSAS	0% AR	100%AR	$\Delta A0$
AC	4425,2	3432,7	-22%
A10M	4294,8	3368,7	-22%
A20M	4279,0	3163,4	-26%
A10E	4253,0	3195,4	-25%
A20E	4207,1	3010,9	-28%
A10M10E	4231,2	2835,9	-33%
A10M20E	4099,6	3145,8	-23%
A20M10E	4121,8	2804,8	-32%
A20M20E	3897,0	2767,3	-29%

Comparando com o estudo realizado por Revilla-Cuesta *et al.* (2020) , onde os autores também consideraram uma substituição de 100% de AN finos por AR finos, obteve-se um decréscimo, em média, mais acentuado. Os autores obtiveram um decréscimo de apenas 14,4%.

Ao observar a Tabela 4.32, conclui-se que a utilização de MgO e/ou escória em argamassas tem mais impacto na velocidade dos ultrassons em argamassas com AR. O decréscimo máximo obtido agora é de 19%, mais 7% do que nas misturas com AN.

É importante destacar também que, em argamassas com 100% de AR, para uma substituição de 40% de cimento por ligantes sustentáveis, se obtém um decréscimo de apenas 19% na velocidade de ultrassons.

Tabela 4.32 - Velocidade dos ultrassons a 28 dias em argamassas com AR

Misturas	AC-R	A10M-R	A20M-R	A10E-R	A20E-R	A10M10E-R	A10M20E-R	A20M10E-R	A20M20E-R
Velocidade ultrassons - 28 dias (m/s)	3432,67	3368,67	3163,44	3195,44	3010,89	2835,89	3145,78	2804,78	2767,33
MgO		-2%	-8%						
Δ real (%)	Escória			-7%	-12%				
	MgO + Escória					-17%	-8%	-18%	-19%
Δ esperada (%)*						-9%	-14%	-15%	-20%
Substituição total de cimento (%)	0%	10%	20%	10%	20%	20%	30%	30%	40%

* Δ esperada (%) da argamassa AxMyE corresponde à soma da Δ real (%) da argamassa AxM com a Δ real (%) da argamassa AyE.

Observando a Tabela 4.33, conclui-se que a incorporação de MgO afeta de um modo semelhante a velocidade dos ultrassons nas argamassas com e sem AR. No caso da escória, quando integrada

individualmente e em simultâneo com MgO, esta afeta mais as argamassas com AR finos, mas a variação é muito ligeira comparativamente ao efeito provocado nas argamassas com AN.

Tabela 4.33 - Evolução da velocidade de propagação dos ultrassons em argamassas com AR curadas em CO₂

Argamassas	VELOCIDADE ULTRASSONS (m/s)								
	28	σ	Δ_{A0}	CO14-28d	σ	Δ_{A0}	CO28-42d	σ	Δ_{A0}
AC-R	3432,7	15,2	-	3442,7	5,0	-	3558,7	1,9	-
A10M-R	3368,7	10,4	-2%	3340,0	9,9	-3%	3462,0	5,7	-3%
A20M-R	3163,4	39,2	-8%	3187,0	1,4	-7%	3347,7	10,7	-6%
A10E-R	3195,4	25,1	-7%	3232,3	1,7	-6%	3478,0	24,0	-2%
A20E-R	3010,9	11,6	-12%	3132,7	9,5	-9%	3419,3	6,6	-4%
A10M10E-R	2835,9	58,9	-17%	2866,0	31,1	-17%	3272,0	7,5	-8%
A10M20E-R	3145,8	25,8	-8%	2688,0	0,8	-22%	3070,0	0,0	-14%
A20M10E-R	2804,8	36,8	-18%	2781,3	10,8	-19%	3156,3	20,0	-11%
A20M20E-R	2767,3	80,2	-19%	2876,3	0,5	-16%	3131,0	0,0	-12%

Por último, facilmente se pode concluir que, de um modo geral, a carbonatação atua de forma ligeiramente positiva sobre esta propriedade.

A 14 dias de carbonatação, 6 das 9 argamassas produzidas com AR possuem melhores resultados do que as argamassas curadas 28 dias em câmara húmida. Após 28 dias em câmara de carbonatação, os resultados parecem melhorar mais significativamente em todas as argamassas produzidas.

4.5.4 Absorção de água por capilaridade

O presente ensaio permite avaliar a capacidade de a argamassa absorver água por ascensão através dos vasos capilares, que está diretamente relacionado com a porosidade do material. Este ensaio foi realizado segundo o proposto na especificação LNEC E-393 (1993). Neste ensaio, foram considerados provetes curados em câmara húmida durante 28 dias.

Ao analisar a Tabela 4.34, verifica-se que o incremento da incorporação de MgO de 10 para 20% aumenta consideravelmente o acréscimo provocado na absorção de água por capilaridade, comparativamente à argamassa de controlo, de 11 para 40%, respetivamente.

No caso da escória, a influência é totalmente distinta. Por um lado, a substituição de 10% de cimento por escória origina imediatamente um aumento de 74% nesta propriedade. Por outro lado, ao aumentar a escória de 10 para 20%, obteve-se um decréscimo da absorção de água, passando de um aumento de 74 para 59%, comparativamente à AC. Os resultados obtidos não estão coerentes com os resultados de Çakir e Aköz (2008), que defendem que a absorção da água por capilaridade em argamassas que contêm escória diminui com o aumento da percentagem de escória incorporada.

Todas as argamassas que contêm os dois ligantes alternativos em simultâneo apresentam variações de absorção de água muito inferiores às variações esperadas, o que indicia que existe uma vantagem clara na introdução simultânea destes dois elementos.

O maior incremento de absorção de água ocorre para a argamassa A20M10E, onde se obteve um aumento de 63% para uma taxa de substituição de cimento de 30% (20% de MgO e 10% de escória).

Tabela 4.34 - Absorção de água por capilaridade a 28 dias

Misturas	AC	A10M	A20M	A10E	A20E	A10M10E	A10M20E	A20M10E	A20M20E
Absorção de água por capilaridade - 28 dias (g/mm²)	1,21E-02	1,35E-02	1,70E-02	2,11E-02	1,93E-02	1,74E-02	1,89E-02	1,97E-02	1,80E-02
Δ real (%)									
MgO		11%	40%						
Escória				74%	59%				
MgO + Escória						44%	56%	63%	48%
Δ esperada (%)*						85%	70%	114%	99%
Substituição total de cimento (%)	0%	10%	20%	10%	20%	20%	30%	30%	40%

*Δ esperada (%) da argamassa AxMyE corresponde à soma da Δ real (%) da argamassa AxM com a Δ real (%) da argamassa AyE.

Ao analisar a Figura 4.9, facilmente se verifica que, quando se considera uma utilização individual de 20% de escória, obtém-se um máximo absoluto, ou seja, a maior taxa de absorção de água por capilaridade. Conclui-se, assim, que os dois ligantes, em simultâneo, apresentam um melhor desempenho do que individualmente.

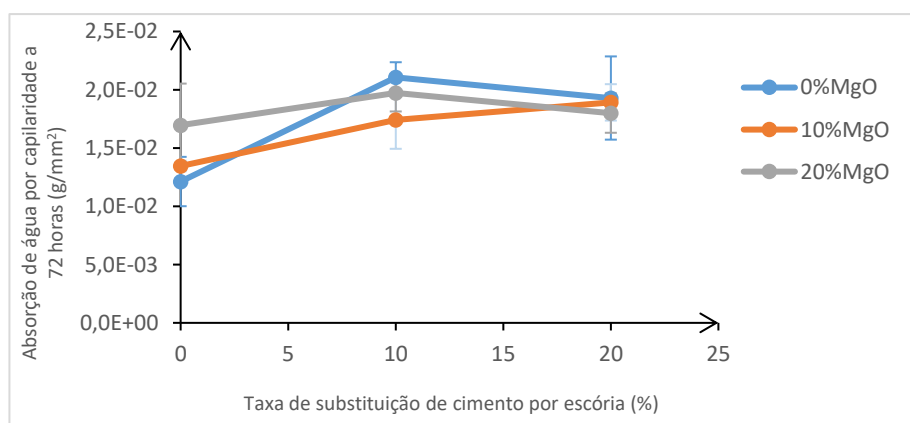


Figura 4.9 - Relação entre a absorção de água por capilaridade e a taxa de substituição de MgO e escória a 28 dias

Observando a Tabela 4.35, verifica-se que, ao substituir 100% dos AN por AR, ocorre um aumento da absorção de água de entre 8 e 19%, quando comparadas com as mesmas argamassas com AN. No entanto, destaca-se que em quatro das argamassas produzidas com escória (A10E, A20E, A10M10E e A20M10E) ocorreram melhores resultados (menores absorções) com a introdução de AR.

Relativamente à Tabela 4.36, verifica-se que, ao integrar MgO individualmente, as argamassas com e sem AR apresentam acréscimos de absorção de água por capilaridade semelhantes, observando-se aumentos de 11 e 40% para incorporações de 10 e 20% de MgO, respetivamente, em argamassas com

AN e aumentos de 13 e 35% para incorporações de 10 e 20% de MgO, respetivamente, em argamassas com AR. Como verificado, quando se integra escória, dá-se um decréscimo acentuado da absorção de água por capilaridade nas argamassas com AR finos, quando comparadas com as com AN.

Ao integrar MgO e escória em simultâneo, as argamassas com AR são favorecidas, pois apresentam, de um modo geral, um aumento da absorção menor do que as argamassas com AN.

Tabela 4.35 - Variação da absorção de água por capilaridade ao incorporar AR

Absorção de água por capilaridade (g/mm ²)			
ARGAMASSAS	0% AR	100%AR	ΔA0
AC	1,21E-02	1,42E-02	17%
A10M	1,35E-02	1,60E-02	19%
A20M	1,70E-02	1,92E-02	13%
A10E	2,11E-02	1,73E-02	-18%
A20E	1,93E-02	1,80E-02	-7%
A10M10E	1,74E-02	1,60E-02	-8%
A10M20E	1,89E-02	2,58E-02	36%
A20M10E	1,97E-02	1,88E-02	-5%
A20M20E	1,80E-02	1,95E-02	8%

Com base na Tabela 3.36, pode-se também concluir que todas as misturas que contêm AR finos, MgO e escória em simultâneo, à exceção da argamassa A10M20E-R, apresentam resultados melhores do que os expectáveis, uma vez que a variação obtida é inferior à estimada.

Tabela 4.36 - Absorção de água por capilaridade a 28 dias em argamassas com AR

Misturas	AC-R	A10M-R	A20M-R	A10E-R	A20E-R	A10M10E-R	A10M20E-R	A20M10E-R	A20M20E-R
Absorção de água por capilaridade - 28 dias (g/mm ²)	1,42E-02	1,60E-02	1,92E-02	1,73E-02	1,80E-02	1,60E-02	2,58E-02	1,88E-02	1,95E-02
Δ real (%)	MgO	13%	35%						
	Escória			21%	27%				
	MgO + Escória					13%	81%	32%	37%
Δ esperada (%)*						34%	39%	57%	62%
Substituição total de cimento (%)	0%	10%	20%	10%	20%	20%	30%	30%	40%

*Δ esperada (%) da argamassa AxMyE corresponde à soma da Δ real (%) da argamassa AxM com a Δ real (%) da argamassa AyE.

4.5.5 Absorção de água por imersão

A absorção de água por imersão está diretamente relacionada com a porosidade da argamassa. O presente ensaio seguiu a norma RILEM Test No. I.1 (1980). De acordo com a Tabela 4.37, ao incorporar

apenas MgO na mistura em percentagens de 10 e 20%, verifica-se um aumento da absorção de água por imersão de 62 e 81%, respetivamente. Ao integrar a escória, considerando substituições de 10 e 20%, ocorre um aumento de 37 e 52% da absorção de água por imersão.

Ao considerar os dois ligantes alternativos em simultâneo, verifica-se que, em todas as argamassas, existe um aumento da absorção de água inferior à soma dos aumentos obtidos por cada material individualmente. Este aspeto permite inferir que em conjunto, estes dois elementos, originam melhores resultados de absorção de água do que em separado.

Tabela 4.37 - Absorção de água por imersão a 28 dias

Misturas	AC	A10M	A20M	A10E	A20E	A10M10E	A10M20E	A20M10E	A20M20E
Absorção de água por imersão - 28 dias (%)	6,0	9,8	10,9	8,3	9,2	8,7	11,5	12,7	13,3
Δ real (%)	MgO	62%	81%						
	Escória			37%	52%				
	MgO + Escória					45%	90%	110%	121%
Δ esperada (%)*						99%	114%	117%	133%
Substituição total de cimento (%)	0%	10%	20%	10%	20%	20%	30%	30%	40%

* Δ esperada (%) da argamassa AxMyE corresponde à soma da Δ real (%) da argamassa AxM com a Δ real (%) da argamassa AyE.

Na Figura 4.10, a absorção de água aumenta de forma bastante linear com o aumento da escória para todas as percentagens de utilização de MgO, à exceção das argamassas que contêm 10% de MgO.

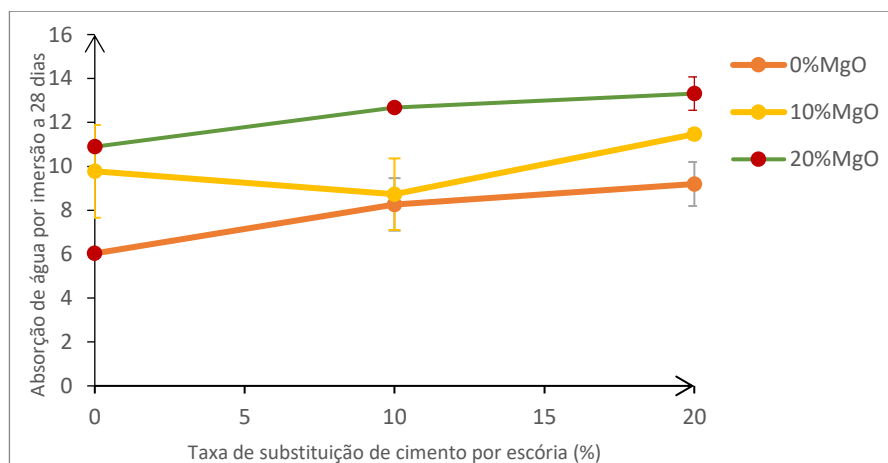


Figura 4.10 - Relação entre a absorção de água por imersão e a taxa de substituição de MgO e escória a 28 dias

Na Tabela 4.38, são apresentados os resultados de absorção de água em argamassas com diferentes condições de cura. As do lado esquerdo foram curadas em câmara húmida durante 28 dias. As argamassas do lado direito foram curadas durante 14 dias em câmara húmida e posteriormente foram colocadas 28 dias em câmara de carbonatação.

No que concerne à absorção de água, é notório uma diminuição qualitativa generalizada desta propriedade (aumento da absorção) com a colocação das argamassas em câmara de carbonatação.

Por outro lado, observa-se um decréscimo significativo nas variações das argamassas com MgO e/ou escória, em relação à argamassa de referência, o que significa que estas argamassas não foram tão prejudicadas com a colocação em câmara de carbonatação como a AC. O decréscimo mais acentuado verifica-se precisamente nas argamassas que contêm os dois ligantes em simultâneo, nomeadamente nas argamassas A20M10E e A20M20E.

Tabela 4.38 - Evolução da absorção de água por imersão em argamassas curadas em CO₂

Argamassas	Absorção de água por imersão a 28 dias de câmara húmida (%)			Absorção de água por imersão a 14 dias de câmara húmida + 28 dias de CO ₂ (%)		
	28	σ	Δ_{A0}	CO28- 42d	σ	Δ_{A0}
AC	6,0	0,1	-	6,9	1,1	-
A10M	9,8	2,1	61,9%	10,3	1,2	48,1%
A20M	10,9	0,2	80,5%	11,4	0,8	63,8%
A10E	8,3	1,2	37,0%	11,3	0,4	62,0%
A20E	9,2	1,0	52,4%	10,8	1,6	55,2%
A10M10E	8,7	1,6	44,7%	12,8	1,8	83,7%
A10M20E	11,5	0,2	90,0%	14,1	1,0	103,4%
A20M10E	12,7	0,0	110,0%	12,8	0,4	85,0%
A20M20E	13,3	0,8	120,6%	14,0	0,5	102,1%

Tabela 4.39 - Variação da absorção de água por imersão ao incorporar AR

Absorção de água por imersão (%)			
ARGAMASSAS	0% AR	100% AR	$\Delta A0$
AC	6,0	24,6	308%
A10M	9,8	25,9	165%
A20M	10,9	26,1	140%
A10E	8,3	28,0	239%
A20E	9,2	28,2	207%
A10M10E	8,7	29,9	243%
A10M20E	11,5	27,8	143%
A20M10E	12,7	29,0	129%
A20M20E	13,3	34,3	158%

Ao substituir os AN finos por AR finos, verifica-se que há um aumento bastante significativo da absorção de água por imersão, tal como apresentado na Tabela 4.39. No caso da argamassa de referência, verificou-se um aumento de 308% desta propriedade, acréscimo superior ao verificado em todas as outras argamassas.

Ao analisar a Tabela 4.40, é notório que a utilização de escória nas argamassas com AR afeta mais a absorção de água das argamassas do que o uso de MgO.

Pode-se também constatar que a utilização de MgO individualmente afeta de forma muito dispar a absorção de água por imersão das argamassas com e sem AR. Incorporações de 10 e 20% de MgO em argamassas sem AR provocou aumentos de 62 e 81%, respetivamente, enquanto incorporações de 10 e 20% de MgO em argamassas com AR originou acréscimos de 5 e 6%, respetivamente.

Tabela 4.40 - Absorção de água por imersão a 28 dias em argamassas com AR

Misturas	AC-R	A10M-R	A20M-R	A10E-R	A20E-R	A10M10E-R	A10M20E-R	A20M10E-R	A20M20E-R
Absorção de água por imersão - 28 dias (%)	24,6	25,9	26,1	28,0	28,2	29,9	27,8	29,0	34,3
Δ real (%)									
MgO		5%	6%						
Escória				14%	14%				
MgO + Escória						21%	13%	18%	39%
Δ esperada (%)*						19%	19%	20%	20%
Substituição total de cimento (%)	0%	10%	20%	10%	20%	20%	30%	30%	40%

*Δ esperada (%) da argamassa AxMyE corresponde à soma da Δ real (%) da argamassa AxM com a Δ real (%) da argamassa AyE.

Quando se integra escória individualmente, dá-se também um menor acréscimo da absorção de água por imersão em argamassas com AR, quando comparado com o aumento obtido nas argamassas com AN. As primeiras aumentam a absorção em 14 e 14% para incorporações de 10 e 20% de escória, enquanto as últimas aumentam em 37 e 52% para incorporações de 10 e 20%. Ao integrar MgO e escória em simultâneo, verifica-se a mesma tendência.

Ao analisar os resultados das argamassas com os três materiais em conjunto (MgO, escória e AR), verifica-se que metade das argamassas (A10M10E-R e A20M20E-R) têm um aumento da absorção de água superior ao expectável.

Através da Tabela 4.41, pode-se analisar o efeito da exposição à carbonatação das diversas argamassas produzidas com AR na absorção de água por imersão, verificando-se que a cura por carbonatação não tem uma contribuição positiva, tal como se tinha verificado nas argamassas com AN. A maioria das argamassas expostas à carbonatação chegam mesmo a aumentar a sua absorção de água, quando comparadas com as não carbonatadas.

Tabela 4.41 - Evolução da absorção de água por imersão em argamassas com AR curadas em CO₂

Argamassas	Absorção de água por imersão a 28 dias de câmara húmida (%)			Absorção de água por imersão a 14 dias de câmara húmida + 28 dias de CO ₂ (%)		
	28	σ	Δ_{A0}	CO28- 42d	σ	Δ_{A0}
AC-R	24,6	2,0	-	25,2	0,1	-
A10M-R	25,9	0,8	5,1%	25,8	0,1	2,3%
A20M-R	26,1	1,3	6,1%	26,4	0,7	4,7%
A10E-R	28,0	0,2	13,7%	27,2	2,7	8,0%
A20E-R	28,2	0,8	14,4%	28,8	0,5	14,3%
A10M10E-R	29,9	0,6	21,4%	30,2	1,6	19,8%
A10M20E-R	27,8	0,1	13,0%	28,4	1,0	12,8%
A20M10E-R	29,0	0,3	17,5%	28,3	0,6	12,4%
A20M20E-R	34,3	2,4	39,2%	35,3	0,6	40,2%

4.5.6 Resistência à carbonatação

Uma das principais causas da diminuição da durabilidade do betão armado é a sua carbonatação. Uma vez que as argamassas em estudo na presente investigação podem ser consideradas microbetões, era importante determinar o seu desempenho à carbonatação, de modo a perceber a influência nesta propriedade da introdução de MgO, escória e AR, tanto individualmente como em simultâneo

A Tabela 4.42 permite perceber que, ao incorporar individualmente o MgO, ocorre um aumento significativo da profundidade de carbonatação nas argamassas com AN. Quando se considera a utilização individual de escória, obtém-se igualmente um aumento significativo da profundidade de carbonatação com a utilização de escória em argamassa. Ao considerar os dois materiais em simultâneo, verifica-se que a soma dos efeitos real é inferior ao expectável, com exceção da argamassa A20M20E.

Tabela 4.42 - Profundidade de carbonatação a 28 dias

Misturas	AC	A10M	A20M	A10E	A20E	A10M10E	A10M20E	A20M10E	A20M20E
Carbonatação CO14 - 28 dias (mm)	2,0	3,5	3,7	2,9	3,0	3,5	4,0	4,5	4,9
Δ real (%)		MgO	75%	83%					
		Escória		45%	50%				
		MgO + Escória				75%	100%	125%	145%
Δ esperada (%)*						120%	125%	128%	133%
Substituição total de cimento (%)	0%	10%	20%	10%	20%	20%	30%	30%	40%

* Δ esperada (%) da argamassa AxMyE corresponde à soma da Δ real (%) da argamassa AxM com a Δ real (%) da argamassa AyE.

Ao analisar a Figura 4.11, verifica-se que a profundidade da carbonatação aumenta em função do aumento da percentagem de substituição do cimento pelos ligantes alternativos.

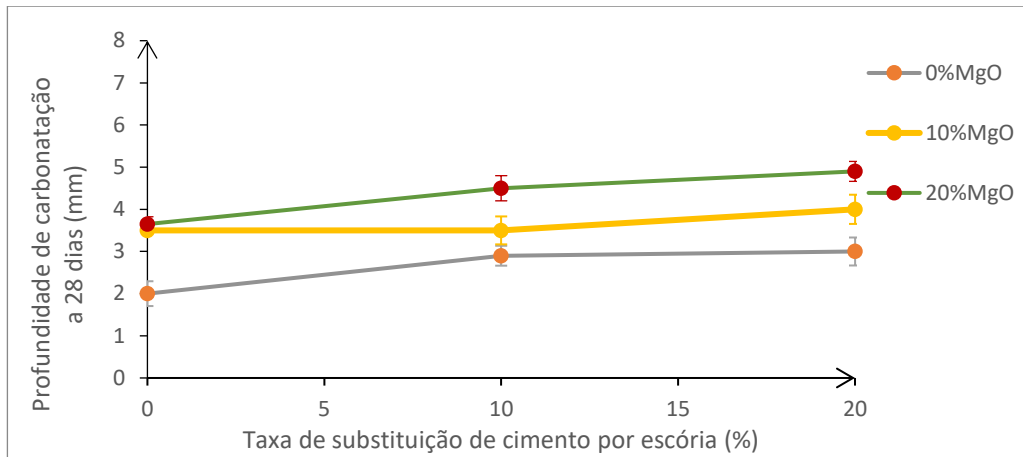


Figura 4.11 – Relação entre a profundidade de carbonatação e a taxa de substituição de MgO e escória a 28 dias

Com o aumento do tempo de exposição à carbonatação, verifica-se um aumento generalizado da profundidade da carbonatação, tal como apresentado na Tabela 4.43.

Tabela 4.43 – Profundidade de carbonatação em argamassas com na com 14 e 28 dias de exposição à carbonatação

Argamassas	Profundidade de carbonatação (mm)					
	CO14-28d	σ	Δ_{A0}	CO28-42d	σ	Δ_{A0}
AC	2,00	0,29	-	2,90	0,26	-
A10M	3,50	0,00	75%	4,75	0,48	64%
A20M	3,65	0,17	83%	5,00	0,50	72%
A10E	2,90	0,24	45%	3,70	0,00	28%
A20E	3,00	0,33	50%	3,95	0,10	36%
A10M10E	3,50	0,33	75%	3,80	0,71	31%
A10M20E	4,00	0,35	100%	4,40	0,44	52%
A20M10E	4,50	0,30	125%	4,90	0,15	69%
A20M20E	4,90	0,24	145%	5,40	0,26	86%

Tabela 4.44 - Variação da profundidade de carbonatação ao incorporar AR

ARGAMASSAS	Profundidade de carbonatação (mm)		
	0% AR	100%AR	Δ_{A0}
AC	2,0	2,8	38%
A10M	3,5	3,9	11%
A20M	3,7	4,7	29%
A10E	2,9	4,3	47%
A20E	3,0	5,0	67%
A10M10E	3,5	5,2	49%
A10M20E	4,0	5,5	38%
A20M10E	4,5	5,7	27%
A20M20E	4,9	5,8	18%

Ao analisar a Tabela 4.44, é notório que a utilização da escória juntamente com AR potencia o aumento da profundidade da carbonatação.

Tabela 4.45 - Profundidade de carbonatação a 28 dias com AR

Misturas	AC-R	A10M-R	A20M-R	A10E-R	A20E-R	A10M10E-R	A10M20E-R	A20M10E-R	A20M20E-R
Carbonatação CO14 - 28 dias (mm)	2,8	3,9	4,7	4,3	5,0	5,2	5,5	5,7	5,8
Δ real (%)									
MgO		42%	71%						
Escória				55%	82%				
MgO + Escória						89%	100%	107%	111%
Δ esperada (%)*						96%	124%	125%	153%
Substituição total de cimento (%)	0%	10%	20%	10%	20%	20%	30%	30%	40%

*Δ esperada (%) da argamassa AxMyE corresponde à soma da Δ real (%) da argamassa AxM com a Δ real (%) da argamassa AyE.

Ao observar a Tabela 4.45, verifica-se as mesmas tendências apresentadas na Tabela 4.42, relativamente à incorporação de MgO, ou seja, observa-se um aumento da profundidade da carbonatação. É também possível concluir que este aumento é menos significativo nas argamassas com AR, quando comparado com as argamassas com NA.

Quando se considera a utilização individual de escória, obtém-se igualmente um aumento significativo da profundidade de carbonatação com a utilização de escória em argamassas. Ao comparar os resultados obtidos nas argamassas com e sem AR, verifica-se que a escória parece afetar mais as argamassas com AR do que as argamassas com AN.

Ao considerar os dois materiais em simultâneo, conclui-se que estes elementos afetam de modo semelhante as argamassas com e sem AR.

Tabela 4.46 - Profundidade de carbonatação em argamassas com AR com 14 e 28 dias de exposição à carbonatação

Argamassas	Profundidade carbonatação (mm)					
	CO14-28d	σ	Δ _{A0}	CO28-42d	σ	Δ _{A0}
AC-R	2,75	0,2	-	3,40	0,39	-
A10M-R	3,90	0,22	42%	4,75	0,21	40%
A20M-R	4,70	0,22	71%	5,55	0,37	63%
A10E-R	4,25	0,34	55%	5,20	0,18	53%
A20E-R	5,00	0,13	82%	5,45	0,17	60%
A10M10E-R	5,20	0,24	89%	6,25	0,29	84%
A10M20E-R	5,50	0,20	100%	6,55	0,31	93%
A20M10E-R	5,70	0,22	107%	6,75	0,14	99%
A20M20E-R	5,80	0,13	111%	6,45	0,14	90%

Segundo a Tabela 4.46, a variação da profundidade de carbonatação das diversas argamassas produzidas, em relação às argamassas de referência, de um modo geral, é menos acentuada nas argamassas com maior tempo de exposição à carbonatação (colocadas 28 dias na câmara de carbonatação).

4.5.7 Retração

A característica mais interessante da utilização de MgO como ligante em argamassas ou betões é a sua teórica capacidade de reduzir a retração nestes materiais cimentícios.

Um dos objetivos do presente trabalho é a análise da influência do MgO na retração (ou expansão) das argamassas com MgO como ligante. Recorde-se que foi utilizado um MgO que consistiu na mistura de dois MgOs com reatividades distintas. Utilizou-se o MgO-A, MgO com elevada reatividade e que origina uma hidratação muito rápida que, conseqüentemente, promove a expansão rápida das argamassas nas primeiras idades. Por outro lado, utilizou-se o MgO-E, MgO muito pouco reativo, com uma hidratação lenta, que, em teoria, equilibra os efeitos do MgO-A. Por outras palavras, procurou-se analisar o comportamento de um MgO que tivesse características mistas, por ser uma mistura de 2 MgOs totalmente diferentes. Contrariamente ao que acontece nos materiais cimentícios com MgO, uma das principais desvantagens da utilização de AR é o aumento da variação dimensional dos materiais cimentícios com AR devido à sua reduzida rigidez. No caso da escória, de acordo com Afroz *et al.* (2022), a utilização de escória em argamassas tem tendência a aumentar a retração a longo prazo.

Assim sendo, é importante analisar este parâmetro ao longo da presente investigação e entender de que forma é que estes três materiais afetam esta propriedade, individualmente e em simultâneo.

O ensaio de retração foi realizado de acordo com o descrito na norma europeia prEN1015-3 (1993).

Na Tabela 4.47, pode-se observar que a incorporação de MgO e de escória individualmente contribui para uma diminuição da retração a 91 dias de cura. Contrariamente ao que se encontrou na bibliografia, pode-se verificar que a utilização de escória contribuiu para uma diminuição da retração mais acentuada do que a que sucedeu com o MgO. A introdução simultânea destes dois elementos origina os menores valores de retração a 91 dias, entre as argamassas estudadas. Assim, as argamassas com menores valores nestas propriedades foram as argamassas A10M20E e A20M20E, em que se verificaram reduções de 71 e 79%, respetivamente, em comparação com a argamassa de controlo.

Tabela 4.47 - Retração a 7 dias

Misturas	AC	A10M	A20M	A10E	A20E	A10M10E	A10M20E	A20M10E	A20M20E
Retração-7 dias ($\mu\text{m/m}$)	-403,6	-237,4	-261,8	-174,2	-174,7	-94,5	-163,5	-249,9	-92,6
MgO		-41%	-35%						
Δ real (%)				-57%	-57%				
MgO + Escória						-77%	-59%	-38%	-77%
Δ esperada (%)*						-98%	-98%	-92%	-92%
Substituição total de cimento (%)	0%	10%	20%	10%	20%	20%	30%	30%	40%

Ao observar a Tabela 4.47, verifica-se que, nos primeiros 7 dias de cura, as argamassas que incorporam apenas MgO apresentam uma retração mais acentuada quando comparadas com as argamassas curadas

durante 91 dias, apresentadas na Tabela 4.48. No entanto essa diferença não é significativa, devido a se ter misturado dois tipos de MgO com reatividades distintas de modo a contrariar a expansão excessiva.

Quanto às restantes misturas, as tendências são bastante semelhantes quer a 7 quer a 91 dias de cura.

Tabela 4.48 - Retração a 91 dias

Misturas	AC	A10M	A20M	A10E	A20E	A10M10E	A10M20E	A20M10E	A20M20E
Retração - 91 dias ($\mu\text{m/m}$)	-1210,8	-1102,4	-915,3	-550,2	-509,8	-546,1	-354,3	-367,6	-252,5
Δ real (%)	MgO	-9%	-24%						
	Escória			-55%	-58%				
	MgO + Escória					-55%	-71%	-70%	-79%
Δ esperada (%)*						-64%	-67%	-79%	-82%
Substituição total de cimento (%)	0%	10%	20%	10%	20%	20%	30%	30%	40%

* Δ esperada (%) da argamassa AxMyE corresponde à soma da Δ real (%) da argamassa AxM com a Δ real (%) da argamassa AyE.

A Figura 4.12 mostra também que a retração ao longo de 91 dias é tanto menor quanto maior é a percentagem de substituição do ligante, tanto através da utilização de MgO como através do uso de escória. Quando se incorpora os dois materiais em simultâneo, mantém-se a tendência.

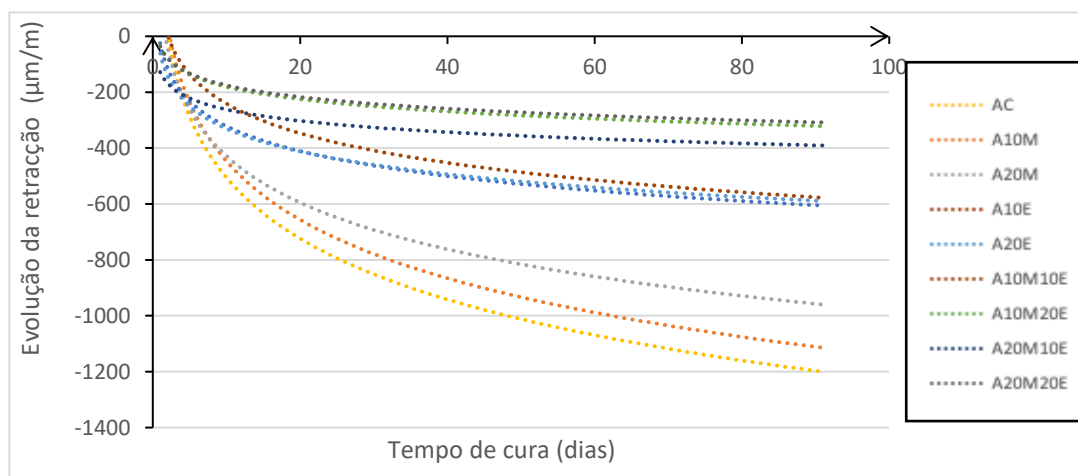


Figura 4.12 - Evolução da retração ao longo de 91 dias

De acordo com a Tabela 4.49, ao substituir AN por AR, a retração das argamassas aumenta substancialmente, com exceção da argamassa A20M em que se verifica uma ligeira redução possivelmente devido a algum erro experimental não identificado.

Esta tendência também foi observada nos estudos de Neno *et al.* (2014) e Silva *et al.* (2015). Segundo Neno *et al.* (2014), o aumento de retração referente à utilização de AR finos deve-se ao facto de os AR serem mais porosos do que os AN, o que faz com que a argamassa com AR tenha menor rigidez do que as argamassas correntes. Se a rigidez da argamassa diminui, esta terá uma maior tendência para acompanhar e acentuar a retração da matriz cimentícia.

Tabela 4.49 - Variação da retração ao incorporar AR

ARGAMASSAS	Retração a 91 dias ($\mu\text{m}/\text{m}$)		
	0% AR	100%AR	ΔA0
AC	-1210,8	-2348,1	93,93%
A10M	-1102,4	-1391,7	26,24%
A20M	-915,3	-851,0	-7,03%
A10E	-550,2	-1967,8	257,68%
A20E	-509,8	-1979,5	288,28%
A10M10E	-546,1	-2216,0	305,79%
A10M20E	-354,3	-2437,2	587,85%
A20M10E	-367,6	-2171,6	490,78%
A20M20E	-252,5	-2510,6	894,39%

Ao analisar a Tabela 4.50, verifica-se que, no caso das argamassas com AR, a integração de MgO individualmente contribui para uma diminuição da retração em 41 e 64%, em argamassas com 10 e 20% de MgO, respetivamente. No caso das argamassas com AN, a utilização de 10 e 20% de MgO diminuiu a retração em 9 e 24%, respetivamente. Assim, conclui-se que a introdução de MgO tem um efeito mais significativo nas argamassas com AR. No caso da utilização de escória, já não se verifica a mesma tendência. Nas argamassas com AR, observou-se uma diminuição de apenas 16% para substituições de 10 e 20% de cimento por escória, enquanto nas argamassas com AN se obteve uma diminuição de 55 e 58% para as mesmas percentagens de substituição de ligante.

Quando se utilizou os dois materiais simultaneamente em argamassas com AR, os resultados não correspondem aos expectáveis, chegando mesmo a observar-se um aumento da retração de 7% para a argamassa A20M20E-R. Analisando a Tabela 4.50, pode-se considerar que a introdução simultânea de MgO e escória parece anular os efeitos positivos verificados na introdução individual destes elementos.

Tabela 4.50 - Retração a 91 dias em argamassas com AR

Misturas	AC-R	A10M-R	A20M-R	A10E-R	A20E-R	A10M10E-R	A10M20E-R	A20M10E-R	A20M20E-R
Retração - 91 dias ($\mu\text{m}/\text{m}$)	-2348,1	-1391,7	-851,0	-1967,8	-1979,5	-2216,0	-2437,2	-2171,6	-2510,6
Δ real (%)	MgO	-41%	-64%						
	Escória			-16%	-16%				
	MgO + Escória					-6%	4%	-8%	7%
Δ esperada (%)*						-57%	-56%	-80%	-79%
Substituição total de cimento (%)	0%	10%	20%	10%	20%	20%	30%	30%	40%

* Δ esperada (%) da argamassa AxMyE corresponde à soma da Δ real (%) da argamassa AxM com a Δ real (%) da argamassa AyE

5 Conclusões

5.1 Considerações iniciais

Nos dias de hoje, a preocupação com as gerações futuras e o sentir que se leva um estilo de vida sustentável faz parte das preocupações do nosso cotidiano.

No sector da construção, não pode ser diferente, uma vez que a indústria da Construção gera grandes quantidades de emissões poluentes e consome grandes quantidades de recursos, trazendo o seu crescimento e desenvolvimento grandes desvantagens a nível ambiental.

Apesar do impacte negativo da pandemia COVID-19, a indústria global da construção foi das menos afetadas durante o ano de 2020. O volume da produção global de construção caiu apenas 2%, acabando por ser uma queda menos pesada relativamente a outras indústrias.

À medida que o mundo recupera da crise pandémica, o mercado global da construção deverá continuar a crescer a um ritmo superior ao da economia como um todo, devendo atingir uma média global de 3,2% ao ano entre 2021 e 2023, de acordo com o relatório anual Global Powers of Construction (GPoC) da Deloitte Global.

Tendo em conta os valores acima referidos, é fundamental para a sustentabilidade do sector que sejam criadas diversas alternativas que permitam tanto a redução das emissões de CO₂, como a diminuição dos recursos consumidos. Assim sendo, é importante que existam estudos e investigações que não só incentivem a reciclagem e reutilização dos materiais, como também identifiquem materiais que consigam competir em termos de qualidade e custo com os materiais tradicionais, mas que tenham menores impactes ambientais.

É neste contexto que a presente investigação se torna importante. Ao longo dos tempos, têm existido diversos estudos sobre a utilização de AR nos betões e argamassas, devido à diminuição do impacte ambiental, mas a grande inovação desta investigação é a utilização desses agregados juntamente com a incorporação de MgO e escória como ligante, em substituição parcial de cimento. Deste modo, pretendeu-se analisar os efeitos que as utilizações destes dois materiais têm no desempenho das argamassas (prós e contras) e perceber se esta substituição é competitiva com os materiais cimentícios tradicionais.

Analisou-se a viabilidade destes dois materiais em simultâneo também na produção de argamassas com AR, testando-se a influência da taxa de substituição do cimento por estes dois materiais no desempenho mecânico e de durabilidade das argamassas, quando comparadas com a argamassa de referência.

Neste capítulo final, são apresentadas as principais conclusões retiradas, aquando da análise e discussão dos resultados obtidos. Desde já, conclui-se que os objetivos inicialmente propostos foram cumpridos.

5.2 Conclusões gerais

A presente dissertação teve três fases principais distintas. A primeira, denominada de “Estado da arte”, permitiu perceber quais as conclusões das investigações já efetuadas, tanto relativamente à utilização de AR finos como à utilização de MgO e/ou escória, e, deste modo, refletir sobre os possíveis resultados que se pode obter com a utilização destes três materiais.

Na segunda parte, denominada de “Campanha experimental”, foram descritos todos os procedimentos de cada ensaio, tendo em conta as normas europeias adotadas.

Nas Tabelas 5.1 e 5.2, são apresentados todos os resultados obtidos para as diferentes argamassas estudadas, no que concerne a todos os ensaios realizados. Estas tabelas permitem resumir toda a informação apresentada no Capítulo 4 e facilitar a obtenção de conclusões gerais.

A análise dos resultados em cada um dos ensaios realizados é baseada na percentagem de perda ou ganho de cada propriedade, comparativamente com o resultado obtido na argamassa de referência, e é representada recorrendo a setas, sendo que as mesmas podem significar que os resultados foram favoráveis ou desfavoráveis. Quando os resultados são considerados constantes (quando a percentagem de perda ou ganho é de 0%), em comparação com a argamassa de referência, a sua representação é feita pelo sinal de igualdade, “=”.

Tabela 5.1 - Resultados obtidos a 28 dias em argamassas sem AR finos

Ensaio	AC	A10M	A20M	A10E	A20E	A10M10 E	A10M20 E	A20M10 E	A20M20 E
Consistência (mm)	224	238	235	250	256	228	249	247	241
		6% ↗	5% ↗	11% ↗	14% ↗	2% ↗	11% ↗	10% ↗	8% ↗
Massa volúmica no estado fresco (Kg/m ³)	2620	3038	3018	2236	2219	2173	2202	2189	2182
		16% ↗	15% ↗	-15% ↘	-15% ↘	-17% ↘	-16% ↘	-16% ↘	-17% ↘
Resistência à compressão (28 dias) (MPa)	54,3	45,3	41,9	43,9	41,7	40,26	33,74	34,28	26,88
		-17% ↘	-23% ↘	-19% ↘	-23% ↘	-26% ↘	-38% ↘	-37% ↘	-51% ↘
Resistência à flexão (28 dias) (MPa)	6,9	6,46	5,85	7,22	6,84	6,42	5,33	5,44	4,34
		-7% ↘	-16% ↘	4% ↗	-2% ↘	-8% ↘	-23% ↘	-22% ↘	-38% ↘
Módulo de elasticidade (28 dias) (GPa)	35,4	31,96	29,69	33,98	32,63	32,58	31,38	32,10	31,12
		-10% ↘	-16% ↘	-4% ↘	-8% ↘	-8% ↘	-11% ↘	-9% ↘	-12% ↘
Velocidade ultrassons (28 dias) (m/s)	4425,2	4425,2	4294,8	4279,0	4207,1	4231,2	4099,6	4121,8	3897,0
		-3% ↘	-3% ↘	-4% ↘	-5% ↘	-4% ↘	-7% ↘	-7% ↘	-12% ↘
Absorção de água por capilaridade (28 dias) (g/mm ²)	1,21E-02	1,35E-02	1,70E-02	2,11E-02	1,93E-02	1,74E-02	1,89E-02	1,97E-02	1,80E-02
		11% ↗	40% ↗	74% ↗	59% ↗	44% ↗	56% ↗	63% ↗	48% ↗
Absorção de água por imersão (28 dias)	6,0	9,8	10,9	8,3	9,2	8,7	11,5	12,7	13,3
		62% ↗	81% ↗	37% ↗	52% ↗	45% ↗	90% ↗	110% ↗	121% ↗
Carbonatação (28 dias) (mm)	2,0	3,5	3,65	2,9	3,0	3,5	4,0	4,5	4,9
		75% ↗	83% ↗	45% ↗	50% ↗	75% ↗	100% ↗	125% ↗	145% ↗
Retração (91 dias) (µm/m)	-1210,8	-1102,4	-915,3	-550,2	-509,8	-546,1	-354,3	-367,6	-760,3
		-9% ↘	-24% ↘	-55% ↘	-58% ↘	-55% ↘	-71% ↘	-70% ↘	-37% ↘

As argamassas que contêm na sua constituição apenas MgO apresentam, de um modo geral e excetuando a retração, resultados inferiores aos obtidos pela argamassa de referência. Verifica-se a mesma tendência quando se considera apenas a utilização de escória.

Assim, é de salientar que, ao incorporar estes dois materiais individualmente, a única propriedade beneficiada é a retração, que, por exemplo, diminui sensivelmente para metade quando se incorpora escória na mistura (em 10 ou 20%).

Ao considerar os dois materiais em simultâneo, verifica-se uma diferença de valores mais acentuada, comparativamente com a argamassa de referência.

Um dos principais motivos de se estudar a utilização de MgO como ligante em argamassas ou betões é a sua capacidade de diminuir a retração dos materiais cimentícios. No entanto, por vezes, ele pode provocar uma expansão inicial prejudicial quando hidratado. Neste estudo, foi considerada uma mistura de 2 MgOs, de reatividades distintas, de forma a perceber o seu comportamento em conjunto. Atendendo aos resultados da retração de todas as argamassas que incorporam MgO, verifica-se que, quando se incorporou MgO (qualquer que fosse a percentagem utilizada), as respetivas argamassas apresentaram resultados de retração inferiores aos da argamassa de referência.

No entanto, os resultados obtidos pelas argamassas que incorporam escória foram ainda mais positivos. Tal como apresentado na Tabela 5.1, a escória, quando considerada individualmente, contribuiu para uma diminuição da retração muito mais significativa do que a verificada nas argamassas com MgO. Talvez estes resultados se justifiquem pela mistura de MgOs, uma vez que o MgO menos reativo pode ter diminuído a capacidade expansiva do MgO mais reativo.

Tabela 5.2 - Resultados obtidos a 28 dias com 100% AR finos

Ensaio	AC-R	A10M-R	A20M-R	A10E-R	A20E-R	A10M10E-R	A10M20E-R	A20M10E-R	A20M20E-R										
Consistência (mm)	204	204	204	210	210	221	241	223	228										
		0%	= 0%	= 3%	↗	3%	↗	8%	↗	15%	↗	6%	↗	3%	↗				
Massa volúmica no estado fresco (Kg/m³)	1909	1916	1954	1895	1839	1866	1899	1847	1925										
		0,4%	↗	2,2%	↗	-0,6%	↘	-3,6%	↘	-2,2%	↘	-0,6%	↘	-3,2%	↘	0,8%	↗		
Resistência à compressão (28 dias) (MPa)	21,3	18,05	13,88	15,35	11,70	10,81	7,93	12,33	8,90										
		-15%	↘	-35%	↘	-28%	↘	-45%	↘	-49%	↘	-63%	↘	-42%	↘	-58%	↘		
Resistência à flexão (28 dias) (MPa)	4,18	3,85	3,27	3,89	2,97	2,82	2,31	3,29	2,02										
		-8%	↘	-22%	↘	-7%	↘	-29%	↘	-32%	↘	-45%	↘	-21%	↘	-52%	↘		
Módulo de elasticidade (28 dias) (GPa)	17,9	16,40	15,15	15,32	13,57	11,55	11,36	11,04	10,97										
		-8%	↘	-15%	↘	-14%	↘	-24%	↘	-36%	↘	-37%	↘	-38%	↘	-39%	↘		
Velocidade ultrassons (28 dias) (m/s)	3432,7	3368,7	3163,44	3195,44	3010,89	2835,89	3145,78	2804,78	2767,33										
		-2%	↘	-8%	↘	-7%	↘	-12%	↘	-17%	↘	-8%	↘	-18%	↘	-19%	↘		
Absorção de água por capilaridade (28 dias) (g/mm²)	1,42E-02	1,60E-02	1,92E-02	1,73E-02	1,80E-02	1,60E-02	2,58E-02	1,88E-02	1,95E-02										
		13%	↗	35%	↗	21%	↗	27%	↗	13%	↗	81%	↗	32%	↗	37%	↗		
Absorção de água por imersão (28 dias)	24,6	25,9	26,1	28,0	28,2	29,9	27,8	29,0	34,3										
		5%	↗	6%	↗	14%	↗	14%	↗	21%	↗	13%	↗	18%	↗	39%	↗		
Carbonatação (28 dias) (mm)	2,75	3,9	4,7	4,25	5,0	5,2	5,5	5,7	5,8										
		42%	↗	71%	↗	55%	↗	82%	↗	89%	↗	100%	↗	107%	↗	111%	↗		
Retração (91 dias) (µm/m)	-2348,1	-1391,7	-851,0	-1967,8	-1979,5	-2216,0	-2437,2	-2171,6	-2510,6										
		-41%	↘	-64%	↘	-16%	↘	-16%	↘	-6%	↘	-6%	↘	4%	↘	-8%	↘	-7%	↘

Ao incorporar os AR finos, verifica-se um conjunto de tendências semelhante ao verificado nas argamassas com AN.

Na Tabela 5.2, pode-se verificar que, ao incorporar MgO e AR finos na mistura, as perdas são bastante

semelhantes às da Tabela 5.1, onde não se considera a utilização de AR finos. Assim, a junção dos dois materiais contribuiu para uma menor absorção de água por imersão e para uma diminuição da retração mais acentuada.

Quando se considera a utilização simultânea de escória e AR finos, verifica-se que as tendências são semelhantes às obtidas para as argamassas com AN finos. No entanto, destaque-se que as perdas são muito mais acentuadas nas argamassas que contêm AR finos, com exceção dos ensaios à absorção de água por capilaridade e imersão, em que se obtém absorções de água consideravelmente mais baixas. A junção destes dois materiais contribuiu também para um aumento da retração, comparativamente com o observado nas argamassas com AN finos.

Nas argamassas que incorporam os dois ligantes e AR finos, verifica-se uma sobreposição de efeitos, o que resulta numa diferença de valores muito mais acentuada, comparativamente com a argamassa de referência e com as mesmas argamassas contendo AN finos na sua constituição. Assim sendo, a utilização dos três materiais em simultâneo apresentou os piores desempenhos. Esta tendência não se verificou nos ensaios de absorção de água por capilaridade e por imersão.

Na presente dissertação, foi avaliada também a influência da cura por carbonatação, comparativamente à cura húmida, no desenvolvimento da resistência mecânica e das propriedades em termos de durabilidade das argamassas.

Na Tabela 5.3, são apresentados os resultados dos ensaios das argamassas curadas durante 14 dias em câmara húmida e posteriormente colocadas 14 dias em câmara de carbonatação (com um total de 28 dias de cura).

Tabela 5.3 - Resultados obtidos em provetes curados em câmara de carbonatação sem AR finos

Ensaio	AC	A10 M	A20M	A10E	A20E	A10M10E	A10M20E	A20M10E	A20M20E
Resistência à compressão (28 dias) (MPa)	60,3	53,0	50,4	54,4	51,8	44,4	37,1	38,2	32,7
		-12% ↘	-16% ↘	-10% ↘	-14% ↘	-26% ↘	-38% ↘	-37% ↘	-46% ↘
Resistência à flexão (28 dias) (MPa)	5,2	4,5	4,4	7,6	7,4	4,9	7,2	5,9	5,2
		-14% ↘	-16% ↘	46% ↗	43% ↗	-5% ↘	-40% ↘	15% ↗	0% =
Módulo de elasticidade (28 dias) (GPa)	35,5	36,2	35,4	35,7	35,6	36,4	36,8	37,2	35,9
		2% ↗	0% =	1% ↗	0% =	3% ↗	4% ↗	5% ↗	1% ↗
Velocidade ultrassons (28 dias) (m/s)	4314,1	4350,2	4274,9	4211,3	4233,2	4172,0	4022,3	3726,3	3963,7
		1% ↗	-1% ↘	-2% ↘	-2% ↘	-3% ↘	-7% ↘	-14% ↘	-8% ↘
Absorção de água por imersão (42 dias)	6,9	10,3	11,4	11,3	10,8	12,8	14,1	12,8	14,0
		48% ↗	64% ↗	62% ↗	55% ↗	84% ↗	103,4% ↗	85% ↗	102% ↗

Ao analisar comparativamente a Tabela 5.3 com os resultados apresentados na Tabela 5.1, pode-se inferir que, de uma forma geral, a cura com exposição à carbonatação de argamassas com MgO e/ou escória contribuiu para uma perda de resistência mecânica menos acentuada do que a verificada nas mesmas argamassas expostas a cura húmida.

Ao considerar as argamassas que contêm AR finos na sua constituição, percebe-se que a cura com exposição à carbonatação destas não traz benefícios. Analisando e comparando a Tabela 5.4 com a

Tabela 5.1, percebe-se que este tipo de cura não beneficia em nada a resistência à flexão, chegando até a piorar o desempenho neste ensaio de algumas das argamassas.

Para os ensaios de velocidade de propagação de ultrassons e de absorção de água por imersão, os resultados são bastante idênticos aos obtidos em provetes de cura húmida. Assim sendo, conclui-se que este tipo de cura não é benéfico em argamassas que contêm AR finos na sua constituição.

Tabela 5.4 - Resultados obtidos em provetes curados em câmara de carbonatação com 100% AR finos

Ensaio	AC-R	A10M-R	A20M-R	A10E-R	A20E-R	A10M10E-R	A10M20E-R	A20M10E-R	A20M20E-R
Resistência à compressão (28 dias) (MPa)	31,5	23,6	22,8	16,3	15,2	24,6	21,7	25,1	20,3
		-25,1% 📉	-27,6% 📉	-48,2% 📉	-51,7% 📉	-21,9% 📉	-31,1% 📉	-20,3% 📉	-35,6% 📉
Resistência à flexão (28 dias) (MPa)	6,0	5,6	5,2	5,6	5,2	3,1	2,2	2,4	2,5
		-6,7% 📉	-13% 📉	-7% 📉	-13% 📉	-48,3% 📉	-63,3% 📉	-60% 📉	-58,3% 📉
Módulo de elasticidade (28 dias) (GPa)	17,5	20,2	18,5	13,7	13,8	16,5	16,8	15,7	15,1
		15% 📈	5% 📈	-22% 📉	-21% 📉	-6% 📉	-4% 📉	-10% 📉	-14% 📉
Velocidade ultrassons (28 dias) (m/s)	3442,7	3340,0	3187,0	3232,3	3132,7	2866,0	2688,0	2781,3	2876,3
		-3% 📉	-7% 📉	-6% 📉	-9% 📉	-17% 📉	-22% 📉	-19% 📉	-16% 📉
Absorção de água por imersão (42 dias)	25,2	25,9	26,1	28,0	28,2	29,9	27,8	29,0	34,3
		2,3% 📈	4,7% 📈	8% 📈	14,3% 📈	19,8% 📈	12,8% 📈	12,4% 📈	40,2% 📈

5.3 Proposta de desenvolvimentos futuros

A presente dissertação investigou a viabilidade da utilização de MgO, escória e AR finos em argamassas que podem ser consideradas micro betões. Uma vez que a utilização de MgO e escória, como substituição parcial de cimento, juntamente com AR finos é uma solução que nunca foi estudada, existem diversas sugestões de trabalhos futuros, de modo a aprofundar a investigação feita ao longo desta investigação.

Como tal, sugere-se as seguintes propostas de desenvolvimentos futuros sobre este tema:

- análise de betões com substituição de AN por AR e de cimento por MgO e/ou escória, em quantidades semelhantes às adotadas na presente investigação;
- análise do desempenho mecânico das diferentes argamassas estudadas na presente dissertação para períodos de cura mais extensos;
- realização de ensaios complementares, como por exemplo o ensaio de penetração de cloretos;
- substituição de AN por AR para taxas de substituição inferiores a 100%, mantendo os valores de substituição de cimento por MgO e escória adotados na presente dissertação.

Dado que as argamassas estudadas neste estudo podem ser consideradas micro betões, devido à sua composição, seria também interessante que se investigasse a utilização de MgO, escória e AR em argamassas com exigências de desempenho mecânico mais reduzidas como, por exemplo, em argamassas de revestimento.

Referências bibliográficas

- Afroz, S.; Zhang, Y.; Nguyen, Q; Kim, T; Castel, A. (2022) 'Effect of limestone in General Purpose cement on autogenous shrinkage of high strength GGBFS concrete and pastes', *Construction and Building Materials*, 327, p. 126949.
- Ahmadi, M.; Farzin, S.; Hassani, A.; Motamedi, M. (2017) 'Mechanical properties of the concrete containing recycled fibers and aggregates', *Construction and Building Materials*, 144, pp. 392-398.
- Bapat, J.D. (2013) 'Mineral admixtures in cement and concrete', *CRC Press, Taylor & Francis Group, London*.
- Benhelal, E.; Gholamreza, Z.; Shamsaei, E.; Bahadori, A. (2013) Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 51, pp.142–161.
- Çakır, Ö. and Aköz, F. (2008) 'Effect of curing conditions on the mortars with and without GGBFS', *Construction and Building Materials*, 22(3), pp. 308–314.
- Cao, F. M.M.P.Y. (2018) 'Effects of reactivity of MgO expansive agent on its performance in cement-based materials and an improvement of the evaluating method of MEA reactivity', *Construction and Building Materials*, 187, pp. 257–266.
- Cao, F. and Yan, P. (2019) 'The influence of the hydration procedure of MgO expansive agent on the expansive behavior of shrinkage-compensating mortar', *Construction and Building Materials*, 202, pp. 162–168.
- Choi, S.W.; J.B.S.; K.J.H.; L.K.M. (2014) 'Durability characteristics of fly ash concrete containing lightly-burnt MgO', *Construction and Building Materials*, 58, pp. 77–88.
- Demirboga R, Turkmen I.K., M. (2004) 'Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral- admixed concrete', *Cement and Concrete Research*, 34, pp. 2329-2336.
- Dhir, R.K., Limbachiya, M.C. and Leelawat, T. (1999) 'Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes', *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings* 134, pp. 257–274.
- Dhir, R.K. and Paine, K.A. (2004) 'Suitability and practicality of using coarse RCA in normal and high strength concrete', *International Conference on Sustainable Construction: Waste Management*, pp. 108–123.
- Du, C. (2005) 'A review of magnesium oxide in concrete', *Concrete International*, pp. 45–50.
- Evangelista, L. and de Brito, J. (2010) 'Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates', *Cement and Concrete Composites*, 32(1), pp. 9–14.
- Fan, C.-C.; Huang, R., Hwang, H., Chao, S. (2016) 'Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes', *Construction and Building Materials*, 112, pp. 708–715.

- Mahmoud, F.; Boissiere, R.; Mercier, C.; Khelil, A. (2020) 'Shear behavior of reinforced concrete beams made from recycled coarse and fine aggregates', 25, pp. 660-669.
- Medina, C.; Zhu, W.; Howind, T.; Rojas, M.; Frías, M. (2014) 'Influence of mixed recycled aggregate on the physical-mechanical properties of recycled concrete', *Journal of Cleaner Production*, 68, pp.216-225.
- Gonçalves, T.; Silva, R.; Brito, J.; Fernández, J.; Esquinas, A. (2020) 'Mechanical and durability performance of mortars with fine recycled concrete aggregates and reactive magnesium oxide as partial cement replacement', *Cement and Concrete Composites*, 105, pp. 103420.
- Hussain, F., Kaur, I. and Hussain, A. (2020a) 'Reviewing the influence of GGBFS on concrete properties', *Materials Today: Proceedings*, 32, pp. 997–1004.
- Hussain, F., Kaur, I. and Hussain, A. (2020b) 'Reviewing the influence of GGBFS on concrete properties', *Materials Today: Proceedings*, 32, pp. 997–1004.
- Jesus, S.; Maia, C.; Farinha, C.; Brito, J.; Veiga, R. (2019) 'Rendering mortars with incorporation of very fine aggregates from construction and demolition waste', *Construction and Building Materials*, 229, pp. 116844.
- Jin, F. and Al-Tabbaa, A. (2014) 'Characterisation of different commercial reactive magnesia', *Advances in Cement Research*, 26(2), pp. 101–113.
- Ramakrishnan, K.; Pugazhmani, G.; Sripragadeesh, R.; Muthu, D.; Venkatasubramanian, C. (2017) 'Experimental study on the mechanical and durability properties of concrete with waste glass powder and ground granulated blast furnace slag as supplementary cementitious materials', *Construction and Building Materials*, 156, pp. 739–749.
- Khatib, J.M. (2005) 'Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate', *Cement and Concrete Research*, 35(4), pp. 763–769.
- Kramer, D. (2001) 'Magnesium, its alloys and compounds', *US Geological Survey* [Preprint].
- Butler, L.; Wes, J.; Tighe, S. (2011) 'The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement', *Cement and Concrete Research*, 40, pp. 1037-1049.
- L. Mo, D.K.P. (2012) 'Effects of accelerated carbonation on the microstructure of Portland cement pastes containing reactive MgO', *Cement and Concrete Research*, 42, pp. 769–777.
- Bui, N., Satomi, T., Takahashi, H. (2018) 'Recycling woven plastic sack waste and PET bottle waste as fiber in recycled aggregate concrete: an experimental study', *Waste Management*, 78, pp. 79,93.
- Ledesma, E., Jiménez, J.; Fernández, J.; Galvín, A; Agrela, F.; Barbudo, A. (2014) 'Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates', *Computers and Chemical Engineering*, 71, pp. 289–298.

Liska, M. and Al-Tabbaa, A. (2009) 'Ultra-green construction: reactive magnesia masonry products', *Proceedings of ICE-Waste Resource Management*, 162(4), pp. 185–196.

Limbachiya, M.; Meddah, M.; Ouchagour, Y. (2012) 'Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete', *Construction and Building Materials*, 27, pp.439-449.

Shetty M. S (2005) 'Concrete Technology'.

Schneider, M., (2015) 'Process technology for efficient and sustainable cement production', *Cement and Concrete Research*, 78, pp. 14-23.

Maddalena, R., Roberts, J.J. and Hamilton, A. (2018) 'Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements', *Journal of Cleaner Production*, 186, pp. 933–942.

Martínez-García, R.; Rojas, M.; Jagadesh, P.; López-Gayarre, F.; Morán- del- Pozo, J.; Juan-Valdes, A. (2022) 'Effect of pores on the mechanical and durability properties on high strength recycled fine aggregate mortar', *Case Studies in Construction Materials*, 16, pp. e01050.

Miraldo, S.; Lopes, S.; Pacheco-Torgal, F.; Lopes, A. (2021) 'Advantages and shortcomings of the utilization of recycled wastes as aggregates in structural concretes', *Construction and Building Materials*, 298, pp. 123729.

Mo, L.; Liu, M.; Al-Tabbaa, A.; Deng, M. (2015) 'Deformation and mechanical properties of the expansive cements produced by inter-grinding cement clinker and MgOs with various reactivities', *Construction and Building Materials*, 80, pp. 1–8.

Mo, L., Deng, M. and Wang, A. (2012) 'Effects of MgO-based expansive additive on compensating the shrinkage of cement paste under non-wet curing conditions', *Cement and Concrete Composites*, 34(3), pp. 377–383.

Poon, C.; Chan, D. (2007) 'The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong', *Resources, Conservation & Recycling*, 50, pp. 293-305.

Revilla-Cuesta, V.; Ortega-López, V.; Skaf, M.; Manso, M. (2020) 'Effect of fine recycled concrete aggregate on the mechanical behavior of self-compacting concrete', *Construction and Building Materials*, 263, pp. 120671.

Revilla-Cuesta, V.; Evangelista, L.; Brito, J.; Ortega-López, V.; Manso, J. (2021) 'Effect of the maturity of recycled aggregates on the mechanical properties and autogenous and drying shrinkage of high-performance concrete', *Construction and Building Materials*, 299, pp. 124001.

Rafat, S.; I.K. Mohammad. (2011) 'Supplementary Cementing Materials', Springer, Berlin.

Sanjuán, M.Á.; Estévez, E.; Argiz, C.; Barrio, D., (2018) 'Effect of curing time on granulated blast-furnace slag cement mortars carbonation', *Cement and Concrete Composites*, 90, pp. 257–265.

Kou, S.; Poon, C.; Etxeberria, M., (2011) 'Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete', *Cement and Concrete Composites*, 33, pp. 286-291.

- Kou, S.; Poon, C. (2013) 'Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash', *Cement and Concrete Composites*, 37, pp. 12-19.
- Sequeira, L. (2021) 'Performance evaluation of cementitious materials with reactive MgO and fly ash'.
- Shand, M.A. (2006) 'The chemistry and technology of magnesia', *Wiley, Hoboken, NJ, USA* [Preprint].
- Shi, C.; Li, Y.; Zhang, J.; Li, W.; Chong, L.; Xie, Z. (2015) 'Performance enhancement of recycled concrete aggregate', *A review. Journal of Cleaner Production*, 112, pp. 466–472.
- Silva, J., Brito, J. de and Veiga, R. (2009) 'Incorporation of fine ceramics in mortars', *Construction and Building Materials*, 23(1), pp. 556–564. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.014>.
- Silva, R., de Brito, J. and Dhir, R. (2016) 'Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete', *Journal of Cleaner Production*, 112, pp. 2171–2186. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.064>.
- Sha, W. and G.B. Pereira. (2001) 'Differential scanning calorimetry study of hydrated ground granulated blast-furnace slag', *Cement and Concrete Research*, 31, pp. 327–329.
- Worrell, E.; Zhang, S. (2001) 'Carbon dioxide emissions from the global cement industry', *Annual Review of Energy and the Environment*, 26, pp. 303–329.
- Xiao, J.Z., Li, J. and Zhang, C. (2005) 'Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading', *Cement and Concrete Research*, 35, pp. 1187–1194.
- Yun, C.M.; Rahman, M.; Phing, C.; Chie, A.; Bakri, M., (2020) 'The curing times effect on the strength of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) mortar', *Construction and Building Materials*, 260, pp. 120622.

Normas EN

ACI-209, 2008, “*Guide for modeling and calculating shrinkage and creep in hardened concrete*”, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, pp. 48.

E 391, Especificação LNEC, “Betões. Determinação da resistência à carbonatação”

EN 1015-1, European Standard, “*Methods of test for mortar for masonry - Part 1: Determination of particle size distribution (by sieve analysis)*”, European Committee for Standardization (CEN), October 1998.

EN 1015-2, European Standard, “*Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*”, European Committee for Standardization (CEN), October 1998.

EN 1015-3, European Standard, “*Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*”, European Committee for Standardization (CEN), February 1999.

EN 1015-6, European Standard, “*Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar*”, European Committee for Standardization (CEN), October 1998.

EN 1015-7, European Standard, “*Methods of test for mortar for masonry – Part 7: Determination of air content of fresh mortar*”, European Committee for Standardization (CEN), October 1998.

EN 1015-10, European Standard, “*Methods of test for mortar for masonry - Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar*”, European Committee for Standardization (CEN), August 1999.
Committee, A.C.I., “*Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep*”, 2009.

EN 1015-11, European Standard, “*Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*”, European Committee for Standardization (CEN), August 1999

EN 1015-18, European Standard, “*Methods of test for mortar for masonry – Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*”, European Committee for Standardization (CEN), December 2002.

EN 1097-3, European Standard, “*Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 3: Determination of loose bulk density and voids*”, European Committee for Standardization (CEN), April 1998.

EN 1097-6, European Standard, “*Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 6: Determination of particle density and water absorption*”, European Committee for Standardization (CEN), July 2013

prEN 1015-13, draft European Standard, “*Methods of test for mortar for masonry - Part 13: Determination of dimensional stability of hardened mortars*”, European Committee for Standardization (CEN), February 1993.

Anexos

Anexo 1 - Composição química do cimento CEM I 42,5R, produzido pela Secil

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	C ₄ AF (%)
19,49	5,02	3,32	63,48	1,26	3,26	57,7	16,5	4,3	11,2

Anexo 2 - Características físicas do cimento CEM I 42,5R, produzido pela Secil

Tempo inicial de presa (min)	Tempo final de presa (min)	Expansão
161	232	0

Anexo 3 - Resultados da resistência à compressão com AN, ao longo do tempo de cura

Argamassas	Resistência à compressão (MPa)								
	7	σ	Δ_{A0}	28	σ	Δ_{A0}	91	σ	Δ_{A0}
AC	41,9	3,2	-	54,3	0,8	-	61,5	1,3	-
A10M	34,0	1,1	-19%	45,3	1,1	-17%	53,7	2,3	-13%
A20M	29,5	2,4	-30%	41,9	1,1	-23%	46,5	1,2	-25%
A10E	36,7	1,2	-12%	43,9	1,2	-19%	49,0	1,0	-20%
A20E	34,3	0,9	-18%	41,7	1,1	-23%	42,3	2,6	-31%
A10M10E	34,0	1,6	-19%	40,3	0,4	-26%	43,6	0,6	-29%
A10M20E	27,0	1,2	-35%	33,7	0,4	-38%	37,2	0,9	-40%
A20M10E	26,0	2,5	-38%	34,3	1,9	-37%	34,4	1,0	-44%
A20M20E	20,6	0,7	-51%	26,9	1,5	-51%	31,2	0,9	-49%

Anexo 4 - Resultados da resistência à compressão com AR, ao longo do tempo de cura

Argamassas	Resistência à compressão (MPa)								
	7	σ	Δ_{A0}	28	σ	Δ_{A0}	91	σ	Δ_{A0}
AC-R	13,9	1,7	-	21,3	0,5	-	22,5	0,5	-
A10M-R	12,3	0,9	-11%	18,1	0,7	-15%	19,5	0,4	-13%
A20M-R	9,8	0,4	-30%	13,9	0,4	-35%	15,7	1,1	-30%
A10E-R	10,7	1,0	-23%	15,4	2,0	-28%	17,0	0,5	-25%
A20E-R	7,3	0,4	-47%	11,7	0,4	-45%	12,4	1,4	-45%
A10M10E-R	8,3	2,1	-40%	10,8	0,3	-49%	12,1	0,7	-46%
A10M20E-R	6,3	0,7	-55%	7,9	0,3	-63%	9,7	1,0	-57%
A20M10E-R	7,9	0,5	-43%	12,3	0,2	-42%	13,1	0,6	-42%
A20M20E-R	6,4	0,4	-54%	8,9	0,4	-58%	11,0	0,3	-51%

Anexo 5 - Resultados da resistência à compressão com AN, expostas à carbonatação

Argamassas	Resistência à compressão (MPa)								
	28	σ	Δ_{A0}	CO14-28d	σ	Δ_{A0}	CO28-42d	σ	Δ_{A0}
AC	54,3	0,8	-	60,3	0,5	10,95%	56,8	1,5	4,52%
A10M	45,3	1,1	-17%	53,0	0,2	17,04%	55,9	2,3	23,45%
A20M	41,9	1,1	-23%	50,4	2,3	20,43%	53,3	0,0	27,17%
A10E	43,9	1,2	-19%	54,4	0,9	24,01%	56,0	0,0	27,68%
A20E	41,7	1,1	-23%	51,8	1,4	24,33%	53,2	1,8	27,66%
A10M10E	40,3	0,4	-26%	44,4	0,9	10,38%	54,3	1,0	34,84%
A10M20E	33,7	0,4	-38%	37,1	0,6	10,02%	52,2	0,8	54,56%
A20M10E	34,3	1,9	-37%	38,2	1,7	11,52%	50,2	0,0	46,31%
A20M20E	26,9	1,5	-51%	32,7	1,3	21,75%	44,5	0,0	65,63%

Anexo 6 - Resultados da resistência à compressão com AR, expostas à carbonatação

Argamassas	Resistência à compressão (MPa)								
	28	σ	Δ_{A0}	CO14-28d	σ	Δ_{A0}	CO28-42d	σ	Δ_{A0}
AC-R	21,3	0,7	-	31,5	1,3	48%	34,4	0,3	62%
A10M-R	18,1	0,4	-15%	23,6	0,6	30%	27,1	0,3	50%
A20M-R	13,9	2,0	-35%	22,8	0,9	65%	26,5	0,7	91%
A10E-R	15,4	0,4	-28%	16,3	2,1	6%	18,5	1,5	21%
A20E-R	11,7	0,3	-45%	15,2	0,7	30%	17,0	2,2	45%
A10M10E-R	10,8	0,3	-49%	24,6	0,5	127%	26,6	0,4	147%
A10M20E-R	7,9	0,2	-63%	21,7	1,0	174%	23,4	1,7	196%
A20M10E-R	12,3	0,4	-42%	25,1	0,3	104%	25,4	0,6	106%
A20M20E-R	8,9	0,0	-58%	20,3	1,0	128%	23,9	1,4	168%

Anexo 7 - Resultados da resistência à flexão com AN, ao longo do tempo de cura

Argamassas	Resistência à flexão (MPa)								
	7	σ	Δ_{A0}	28	σ	Δ_{A0}	91	σ	Δ_{A0}
AC	6,7	0,3	-	7,0	0,1	-	7,5	0,2	-
A10M	6,2	0,3	-8%	6,5	0,2	-7%	6,8	0,0	-9%
A20M	5,4	0,1	-20%	5,9	0,2	-16%	5,4	0,2	-28%
A10E	6,5	0,4	-3%	7,2	0,1	4%	7,6	0,2	1%
A20E	6,2	0,1	-9%	6,8	0,1	-2%	7,0	0,3	-7%
A10M10E	5,9	0,4	-13%	6,4	0,2	-8%	6,6	0,3	-12%
A10M20E	4,8	0,2	-29%	5,3	0,3	-23%	5,7	0,3	-24%
A20M10E	5,0	0,3	-25%	5,4	0,2	-22%	5,5	0,7	-27%
A20M20E	4,0	0,2	-41%	4,3	0,2	-38%	3,8	0,2	-50%

Anexo 8 - Resultados da resistência à flexão com AR, ao longo do tempo de cura

Argamassas	Resistência à flexão (MPa)								
	7	σ	Δ_{A0}	28	σ	Δ_{A0}	91	σ	Δ_{A0}
AC-R	3,1	0,1	-	4,2	0,2	-	4,5	0,5	-
A10M-R	2,7	0,2	-10%	3,8	0,3	-8%	4,3	0,2	-4%
A20M-R	2,3	0,0	-24%	3,3	0,2	-22%	3,5	0,2	-23%
A10E-R	2,5	0,2	-18%	3,9	0,2	-7%	4,0	0,3	-12%
A20E-R	2,0	0,0	-35%	3,0	0,3	-29%	3,1	0,2	-31%
A10M10E-R	2,1	0,1	-31%	2,8	0,1	-32%	2,9	0,2	-36%
A10M20E-R	1,7	0,1	-45%	2,3	0,1	-45%	2,4	0,1	-47%
A20M10E-R	2,3	0,3	-25%	3,3	0,3	-21%	3,4	0,2	-24%
A20M20E-R	1,6	0,1	-49%	2,0	0,3	-52%	2,5	0,2	-44%

Anexo 9 - Resultados da resistência à flexão em argamassas expostas à carbonatação

Argamassas	Resistência à flexão (MPa)											
	28	σ	Δ_{A0}	CO14-28d	σ	Δ_{A0}	CO28-42d	σ	Δ_{A0}	91	σ	Δ_{A0}
AC	7,0	0,1	-	5,2	0,9	-	5,0	0,3	-	7,5	0,2	-
A10M	6,5	0,2	-7%	4,5	0,2	-14%	4,6	0,0	-7%	6,8	0,0	-9%
A20M	5,9	0,2	-16%	4,4	0,3	-16%	4,5	0,0	-9%	5,4	0,2	-28%
A10E	7,2	0,1	4%	7,6	0,1	46%	7,4	0,3	49%	7,6	0,2	1%
A20E	6,8	0,1	-2%	7,4	0,3	43%	7,5	0,4	51%	7,0	0,3	-7%
A10M10E	6,4	0,2	-8%	4,9	0,1	-5%	5,7	0,7	15%	6,6	0,3	-12%
A10M20E	5,3	0,3	-23%	7,2	0,1	40%	7,8	0,6	57%	5,7	0,3	-24%
A20M10E	5,4	0,2	-22%	5,9	0,1	15%	2,5	0,3	-49%	5,5	0,7	-27%
A20M20E	4,3	0,2	-38%	5,2	0,1	0%	4,3	0,3	-14%	3,8	0,2	-50%
AC-R	4,2	0,2	-	6,0	0,2	-	6,9	0,3	-	4,5	0,5	-
A10M-R	3,8	0,3	-8%	5,6	0,0	-6%	6,0	0,0	-13%	4,3	0,2	-4%
A20M-R	3,3	0,2	-22%	5,2	0,8	-14%	5,5	0,4	-20%	3,5	0,2	-23%
A10E-R	3,9	0,2	-7%	5,6	0,2	-6%	6,6	0,2	-5%	4,0	0,3	-12%
A20E-R	3,0	0,3	-29%	5,2	0,1	-13%	5,3	0,3	-24%	3,1	0,2	-31%
A10M10E-R	2,8	0,1	-32%	3,1	0,4	-48%	3,7	0,1	-46%	2,9	0,2	-36%
A10M20E-R	2,3	0,1	-45%	2,2	0,1	-64%	2,7	0,3	-61%	2,4	0,1	-47%
A20M10E-R	3,3	0,3	-21%	2,4	0,0	-60%	2,5	0,1	-63%	3,4	0,2	-24%
A20M20E-R	2,0	0,3	-52%	2,5	0,3	-59%	2,5	0,4	-63%	2,5	0,2	-44%

Anexo 10 - Resultados módulo de elasticidade

Argamassas	MODULO DE ELASTECIDADE (GPa)								
	28	σ	Δ_{A0}	CO14-28d	σ	Δ_{A0}	C028-42d	σ	Δ_{A0}
AC	35,4	0,1	-	35,5	0,2	-	36,9	0,7	-
A10M	32,0	1,5	-10%	36,2	0,5	2%	36,6	0,2	-1%
A20M	29,7	3,5	-16%	35,4	0,8	0%	35,9	0,4	-3%
A10E	34,0	0,3	-4%	35,7	0,9	1%	36,6	0,8	-1%
A20E	32,6	0,7	-8%	35,6	0,0	0%	37,4	0,1	1%
A10M10E	32,6	0,9	-8%	36,4	0,4	3%	35,7	0,9	-3%
A10M20E	31,4	0,7	-11%	36,8	0,4	4%	38,6	0,1	4%
A20M10E	32,1	0,3	-9%	37,2	0,4	5%	34,5	3,8	-7%
A20M20E	31,1	0,4	-12%	35,9	0,4	1%	36,6	0,2	-1%
AC-R	17,9	0,6	-	17,5	0,5	-	18,2	0,1	-
A10M-R	16,4	0,2	-8%	20,2	0,0	15%	20,9	0,4	15%
A20M-R	15,2	0,7	-15%	18,5	0,0	5%	19,9	0,6	9%
A10E-R	15,3	0,0	-14%	13,7	0,1	-22%	15,4	0,1	-15%
A20E-R	13,6	0,6	-24%	13,8	0,8	-21%	15,4	0,4	-15%
A10M10E-R	11,5	0,1	-36%	16,5	0,2	-6%	16,1	0,9	-11%
A10M20E-R	11,4	0,0	-37%	16,8	0,3	-4%	16,6	0,4	-9%
A20M10E-R	11,0	0,2	-38%	15,7	0,5	-10%	17,3	1,2	-5%
A20M20E-R	11,0	0,4	-39%	15,1	0,0	-14%	15,6	0,3	-14%

Anexo 11 - Resultados de velocidade de propagação de ultrassons

Argamassas	VELOCIDADE ULTRASSONS (m/s)								
	28	σ	Δ_{A0}	CO14	σ	Δ_{A0}	C028	σ	Δ_{A0}
AC	4425,2	66,7	-	4314,1	6,6	-	4255,0	0,0	-
A10M	4294,8	23,7	-3%	4350,2	63,2	1%	4203,7	25,9	-1%
A20M	4279,0	33,9	-3%	4274,9	46,9	-1%	4191,0	33,3	-2%
A10E	4253,0	23,1	-4%	4211,3	16,5	-2%	4222,7	0,9	-1%
A20E	4207,1	26,1	-5%	4233,2	24,1	-2%	4235,3	9,4	0%
A10M10E	4231,2	9,2	-4%	4172,0	5,0	-3%	4226,0	16,0	-1%
A10M20E	4099,6	49,5	-7%	4022,3	8,6	-7%	4141,3	0,9	-3%
A20M10E	4121,8	32,1	-7%	3726,3	491,3	-14%	4142,7	3,8	-3%
A20M20E	3897,0	58,5	-12%	3963,7	2,6	-8%	4071,3	12,0	-4%
AC-R	3432,7	15,2	-	3442,7	5,0	-	3558,7	1,9	-
A10M-R	3368,7	10,4	-2%	3340,0	9,9	-3%	3462,0	5,7	-3%
A20M-R	3163,4	39,2	-8%	3187,0	1,4	-7%	3347,7	10,7	-6%
A10E-R	3195,4	25,1	-7%	3232,3	1,7	-6%	3478,0	24,0	-2%
A20E-R	3010,9	11,6	-12%	3132,7	9,5	-9%	3419,3	6,6	-4%
A10M10E-R	2835,9	58,9	-17%	2866,0	31,1	-17%	3272,0	7,5	-8%
A10M20E-R	3145,8	25,8	-8%	2688,0	0,8	-22%	3070,0	0,0	-14%
A20M10E-R	2804,8	36,8	-18%	2781,3	10,8	-19%	3156,3	20,0	-11%
A20M20E-R	2767,3	80,2	-19%	2876,3	0,5	-16%	3131,0	0,0	-12%

Anexo 12 - Capacidade de absorção de água por capilaridade

Argamassas	ACi (g/mm ²)		
	72 horas	σ	Δ_{A0}
AC	1,21E-02	2,12E-03	-
A10M	1,35E-02	4,52E-04	11%
A20M	1,70E-02	3,19E-03	40%
A10E	2,11E-02	1,30E-03	74%
A20E	1,93E-02	3,57E-03	59%
A10M10E	1,74E-02	2,48E-03	44%
A10M20E	1,89E-02	1,56E-03	56%
A20M10E	1,97E-02	1,59E-03	63%
A20M20E	1,80E-02	1,69E-03	48%
AC-R	1,42E-02	3,83E-03	-
A10M-R	1,60E-02	1,23E-03	13%
A20M-R	1,92E-02	2,31E-03	35%
A10E-R	1,73E-02	3,09E-04	21%
A20E-R	1,80E-02	2,31E-03	27%
A10M10E-R	1,60E-02	0,00E+00	13%
A10M20E-R	2,58E-02	6,38E-03	81%
A20M10E-R	1,88E-02	9,46E-04	32%
A20M20E-R	1,95E-02	1,21E-03	37%

Anexo 13 - Capacidade de absorção de água por imersão a 28 dias de cura húmida

Argamassas	Absorção de água por imersão a 28 dias de câmara húmida (%)		
	28	σ	Δ_{A0}
AC	6,0	0,1	-
A10M	9,8	2,1	61,9%
A20M	10,9	0,2	80,5%
A10E	8,3	1,2	37,0%
A20E	9,2	1,0	52,4%
A10M10E	8,7	1,6	44,7%
A10M20E	11,5	0,2	90,0%
A20M10E	12,7	0,0	110,0%
A20M20E	13,3	0,8	120,6%
AC-R	24,6	2,0	-
A10M-R	25,9	0,8	5,1%
A20M-R	26,1	1,3	6,1%
A10E-R	28,0	0,2	13,7%
A20E-R	28,2	0,8	14,4%
A10M10E-R	29,9	0,6	21,4%
A10M20E-R	27,8	0,1	13,0%
A20M10E-R	29,0	0,3	17,5%
A20M20E-R	34,3	2,4	39,2%

Anexo 14 - Capacidade de absorção de água por imersão e a 14 dias de camara húmida + 28 dias de CO₂

(Argamassas)	Absorção de água por imersão a 14 dias de camara húmida + 28 dias de CO ₂ (%)		
	42	σ	Δ_{A0}
AC	6,9	1,1	-
A10M	10,3	1,2	48,1%
A20M	11,4	0,8	63,8%
A10E	11,3	0,4	62,0%
A20E	10,8	1,6	55,2%
A10M10E	12,8	1,8	83,7%
A10M20E	14,1	1,0	103,4%
A20M10E	12,8	0,4	85,0%
A20M20E	14,0	0,5	102,1%
AC-R	25,2	0,1	-
A10M-R	25,8	0,1	2,3%
A20M-R	26,4	0,7	4,7%
A10E-R	27,2	2,7	8,0%
A20E-R	28,8	0,5	14,3%
A10M10E-R	30,2	1,6	19,8%
A10M20E-R	28,4	1,0	12,8%
A20M10E-R	28,3	0,6	12,4%
A20M20E-R	35,3	0,6	40,2%

Anexo 15 - Profundidade da carbonatação em argamassas com AN e com AR

Argamassas	Profundidade carbonatação (mm)					
	CO14-28d	σ	Δ_{A0}	CO28-42d	σ	Δ_{A0}
AC	2,00	0,29	-	2,90	0,26	-
A10M	3,50	0,00	75%	4,75	0,48	64%
A20M	3,65	0,17	83%	5,00	0,50	72%
A10E	2,90	0,24	45%	3,70	0,00	28%
A20E	3,00	0,33	50%	3,95	0,10	36%
A10M10E	3,50	0,33	75%	3,80	0,71	31%
A10M20E	4,00	0,35	100%	4,40	0,44	52%
A20M10E	4,50	0,30	125%	4,90	0,15	69%
A20M20E	4,90	0,24	145%	5,40	0,26	86%
AC-R	2,75	0,2	-	3,40	0,39	-
A10M-R	3,90	0,22	42%	4,75	0,21	40%
A20M-R	4,70	0,22	71%	5,55	0,37	63%
A10E-R	4,25	0,34	55%	5,20	0,18	53%
A20E-R	5,00	0,13	82%	5,45	0,17	60%
A10M10E-R	5,20	0,24	89%	6,25	0,29	84%
A10M20E-R	5,50	0,20	100%	6,55	0,31	93%
A20M10E-R	5,70	0,22	107%	6,75	0,14	99%
A20M20E-R	5,80	0,13	111%	6,45	0,14	90%

Anexo 16 - Resultados da retração ao longo do tempo de cura

Argamassas	Retração ($\mu\text{m}/\text{m}$)								
	7 dias	σ	Δ_{A0}	28 dias	σ	Δ_{A0}	91 dias	σ	Δ_{A0}
AC	-403,6	0,1	-	-724,4	12,2	-	-1210,8	48,5	-
A10M	-237,4	25,3	-41%	-780,8	19,7	8%	-1102,4	10,1	-9%
A20M	-261,8	61,9	-35%	-680,6	72,7	-6%	-915,3	91,6	-24%
A10E	-174,2	24,3	-57%	-558,3	94,6	-23%	-550,2	61,8	-55%
A20E	-174,7	170,6	-57%	-578,7	240,0	-20%	-509,8	224,6	-58%
A10M10E	-94,5	0,0	-77%	-478,9	0,0	-34%	-546,1	0,0	-55%
A10M20E	-163,5	0,0	-59%	-206,4	0,0	-72%	-354,3	0,0	-71%
A20M10E	-249,9	0,0	-38%	-261,8	0,0	-64%	-367,6	0,0	-70%
A20M20E	-92,6	-92,6	-77%	-302,5	-302,5	-58%	-252,5	-252,5	-79%
AC-R	-764,8	0,0	-	-1947,4	0,0	-	-2348,1	0,0	-
A10M-R	55,2	87,3	-107%	-530,9	61,4	-73%	-1391,7	61,3	-41%
A20M-R	-205,7	147,8	-73%	-723,4	513,0	-63%	-851,0	602,2	-64%
A10E-R	509,2	1275,9	-167%	-1822,8	406,5	-6%	-1967,8	337,9	-16%
A20E-R	-861,5	-817,2	13%	-1948,8	-1978,7	0%	-1979,5	-1968,6	-16%
A10M10E-R	-654,1	0,0	-14%	-1860,3	0,0	-4%	-2216,0	0,0	-6%
A10M20E-R	-680,4	0,0	-11%	-1836,4	0,0	-6%	-2437,2	0,0	4%
A20M10E-R	-645,3	87,2	-16%	-1680,9	188,6	-14%	-2171,6	125,2	-8%
A20M20E-R	-808,0	0,0	6%	-2326,4	0,0	19%	-2510,6	0,0	7%