

Desempenho em termos de durabilidade de betões com incorporação de agregados grossos de resíduos da indústria do mármore

Durability performance concrete incorporating waste coarse aggregates from the marble industry

António André¹, Jorge de Brito², Alexandra Rosa³, Diogo Pedro⁴

¹Eng.º Civil, Mestre em Engenharia Civil (IST)

antonio.andre@ist.utl.pt@ist.utl.pt

²Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa

jb@civil.ist.utl.pt

³ Eng.ª Civil, Mestre em Engenharia Civil (IST)

alexandra.rosa@ist.utl.pt

⁴ Eng.º Civil, Mestre em Engenharia Civil (IST)

diogo.pedro@ist.utl.pt

RESUMO: A indústria extractiva de rochas ornamentais é uma actividade extremamente importante para a economia Portuguesa mas é também susceptível de gerar elevados impactes ambientais. O processo extractivo origina um volume de resíduos que pode ascender a 80% do total de rocha desmontada. Os resíduos que não são utilizados na recuperação das frentes inactivas são transportados e colocados em locais afastados da frente de escavação, onde se acumulam indiscriminadamente, não existindo ainda alternativas viáveis para inverter esta problemática.

Neste âmbito, é necessário encontrar soluções que transformem este resíduo em subproduto, restituindo-lhe algum do seu valor económico. Contudo, a generalidade das investigações existentes não consideram a hipótese de utilizar mármore como agregado a incorporar em betão e as poucas que o fazem analisam preferencialmente as suas características mecânicas. A elaboração deste estudo pretendeu contribuir para aprofundar o conhecimento desta temática, enfatizando a substituição de agregado primário por agregado de mármore, não introduzindo qualquer tipo de adição ou adjuvante, que pudesse alterar as características do betão tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Na campanha experimental, foram produzidas três famílias de betões, cada uma formada por agregados primários tradicionalmente utilizados na construção (basalto, calcário e granito), os quais foram substituídos por agregados grossos de mármore em percentagens de 20, 50 e 100%, num total de 10 composições. Estas foram ensaiadas, no estado fresco, à trabalhabilidade e massa volúmica, e no estado endurecido, à absorção de água, por imersão e capilaridade, profundidade de carbonatação e penetração de cloretos.

Os resultados obtidos demonstram que as propriedades dos betões produzidos com agregados grossos reciclados não diferem significativamente das propriedades dos betões produzidos com agregados primários, ao nível da durabilidade, sendo perfeitamente exequível a utilização deste resíduo como agregado para betão.

ABSTRACT: The ornamental stone extraction industry is an extremely important activity for the Portuguese economy even though capable of generating large environmental impacts. The extraction process originates a waste volume which can rise up to 80% of all materials extracted. The waste that cannot be used to recuperate the inactive quarries is transported and dumped away from the quarry, where it accumulates indiscriminately, and a viable alternative to reverse this problem is not available yet.

In this context, it is necessary to find solutions that can transform this waste into a by-product and restore some of its economic value. Although most of the past research does not consider the possibility of using marble as aggregate in concrete, the few studies that do examine preferentially its mechanical properties. This study intended to contribute to further the knowledge on this subject, emphasizing the replacement of primary aggregates by marble aggregates, without introducing any type of additions or admixtures, which could change the fresh or hardened properties of the resulting concrete.

In the experimental campaign three distinct concrete families were produced, each with conventional aggregates (basalt, granite and limestone), replaced by marble coarse aggregates at 20%, 50% and 100% ratios, totalling 10 mixes. These mixes were tested, in the fresh state, for workability and specific gravity, and hardened state, for water absorption, by capillary and immersion, carbonation and chloride penetration. The results show that the properties of concrete produced using marble coarse aggregates do not significantly differ from the properties of concrete made with primary aggregates, in terms of durability, making the use of this waste as concrete aggregate perfectly feasible.

1. INTRODUÇÃO

A indústria extractiva é extremamente importante, não só para a economia Portuguesa, como também mundial. No entanto, devido à sua natureza, é capaz de gerar elevados impactes ambientais. Com o avanço na exploração das pedreiras, os blocos extraídos apresentam mais impurezas e pior qualidade, originando uma diminuição da produção de rochas ornamentais. Os resíduos gerados no processo de extracção podem atingir 80% da quantidade total de rocha desmontada. Os resíduos de maiores dimensões são depositados em locais afastados da frente de escavação, onde não só contribuem para a degradação do meio ambiente e da paisagem natural, como ocupam indiscriminadamente o solo.

Apesar de existirem actualmente vários destinos para estes resíduos, como utilizar blocos de maiores dimensões para recuperar as pedreiras inactivas, ou a micronização, estes são manifestamente insuficientes para inverter a crescente acumulação de materiais que se tem registado. Surge com naturalidade a indústria da construção como alternativa, uma vez que, segundo Saboya Jr. et al. [1], esta indústria é a que exhibe um maior potencial para consumir recursos minerais gerando, assim, um grande volume de resíduos.

De todas as alternativas existentes, o pó de mármore é a mais estudada, devido à sua polivalência. Binici et al. [2] demonstrou que a utilização de até 15% de pó de mármore como aditivo pode conduzir a betões mais duráveis. O mesmo pó, quando adicionado em uma quantidade de 200 kg/m³, é capaz de melhorar todas as

propriedades do betão auto-compactável ensaiadas por Topçu et al. [3]. Corinaldesi et al. [4] verificaram que a substituição de 10% de areia por pó de mármore, na presença de superplastificantes, se traduz na máxima resistência à compressão de argamassas, com o mesmo nível de trabalhabilidade.

Apesar da utilização com sucesso do pó de mármore, o destino a dar aos resíduos de maiores dimensões continua pouco explorado. Akbulut e Güner [5] partiram dessa premissa e concluíram que os agregados grossos de mármore podem ser utilizados como camada de regularização de pavimentos em estradas de pequeno a médio volume de tráfego. Também Gencil et al. [6] determinaram que os blocos de betão para pavimentos produzidos com agregados grossos de mármore apresentam qualidade suficiente.

No que concerne à alteração das propriedades do betão com a introdução de agregados grossos de mármore, ao nível da durabilidade, os estudos são praticamente inexistentes. Ainda assim, Binici et al. [7] registaram que a introdução de agregados grossos de mármore aumenta significativamente a resistência à penetração de cloretos. Pereira et al. [8] concluíram que a durabilidade de um betão de classe C30/37 não é afectada pela mineralogia do agregado.

2. OBJECTIVOS

Este estudo pretende contribuir para a escassa investigação existente relativa à variação das características de durabilidade de betões, com a substituição de agregados primários (AP) por agregados grossos de mármore (AGM). É também relevante para avaliar a exequibilidade

de transformar um resíduo, que acarreta graves consequências para o meio ambiente, num subproduto com uma função secundária, restaurando-lhe algum do seu valor económico e diminuindo a quantidade acumulada.

Como tal, foram produzidas três famílias distintas de betão, cada uma correspondente aos agregados tradicionalmente utilizados na construção (basalto, calcário e granito), nas quais se procedeu à substituição de AP por AGM, com taxas de 20, 50 e 100% do volume total de agregados grossos. As diferentes famílias foram ensaiadas, no estado fresco, à trabalhabilidade e massa volúmica, e no estado endurecido, à absorção de água, por imersão e capilaridade, profundidade de carbonatação e penetração de cloretos.

Foi desenvolvido outro estudo, em conjunto com este, com o objectivo de verificar o desempenho mecânico de betões produzidos com AGM, o qual foi realizado por Pedro Martins [9], também no Instituto Superior Técnico.

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

Neste capítulo, é descrita a formulação das misturas de betão produzidas, assim como as referências normativas utilizadas em cada um dos ensaios realizados.

3.1. Formulação dos betões

Dez famílias distintas de betões foram produzidas para este estudo: três betões de referência, respectivamente com 100% de agregados grossos de basalto, calcário e granito, e as restantes com taxas de substituição de 20, 50 e 100% do volume total de agregados grossos por AGM. Foi utilizada a seguinte nomenclatura: BRB (betão de referência de basalto), BRC (betão de referência de calcário), BRG (betão de referência de granito), BB20 (betão com substituição de 20% de agregados grossos de basalto (AGB) por AGM), BB50 (betão com substituição de 50% de AGB por AGM), BC20, BC50, BG20, BG50 e BRM (betão com substituição de 100% de AP por AGM).

De forma a compatibilizar as famílias de betões produzidas com um número significativo de aplicações estruturais correntes, foram garantidas as exigências definidas na NP EN 206-1 (2007) para uma determinada classe de

exposição ambiental. Os betões produzidos seguiram os seguintes pressupostos:

- classe de resistência: C30/37;
- classe de consistência: S3 (100 a 150 mm);
- classe de exposição: diversas;
- máxima razão água/cimento: 0,55;
- ligante: CEM II A-L 42,5 R da cimenteira da Secil, no Outão, Setúbal;
- máxima dimensão do agregado: 22,4 mm;
- água de amassadura: corrente da rede de abastecimento pública;
- local de fabrico: laboratório;
- método de compactação: vibração mecânica normal (agulha vibratória).

Todas as misturas foram produzidas com um intervalo de abaixamento de 115 ± 10 mm, inferior ao definido na norma, de forma a permitir uma comparação mais fiável entre as diferentes composições. Os três betões de referência foram formulados através das curvas de referência de Faury. A Tabela 1 apresenta as proporções dos materiais utilizados na produção dos betões de referência.

Tabela 1 - Composição dos betões de referência

	BRB	BRC	BRC	BRM	
	Peneiros (mm)	Massa (kg/m ³)			
Agregados grossos	16-22,4	366,4	324,9	337,5	331,5
	11,2-16	362,4	321,3	333,8	327,9
	8-11,2	140,6	124,6	129,5	127,2
	5,6-8	139,0	123,3	128,0	125,8
	4-5,6	122,4	108,5	112,7	110,7
Agregados finos	Areia grossa	650,7	650,7	650,7	619,1
	Areia fina	183,5	183,5	183,5	174,6
CEM II A-L 42.5 R (kg/m ³)		350,0			
Água (kg/m ³)		189,0			
a/c		0,55			

3.2. Métodos

3.2.1 Ensaio aos agregados

Os métodos de ensaio seguidos em cada um dos ensaios realizados foram os seguintes:

- análise granulométrica - segundo a Norma NP EN 933-1 (2000);
- Índice de forma - segundo a Norma NP EN 933-4 (2004);
- massa volúmica aparente (baridade) - segundo a Norma NP EN 1097-3 (2002);
- Massa volúmica e absorção de água - segundo a Norma NP EN 1097-6 (2003);

- Desgaste de “Los Angeles” - segundo a Norma LNEC E 237 (1971);

3.2.2. Ensaio ao betão no estado fresco

Os ensaios realizados ao betão no estado fresco foram:

- abaixamento (cone de Abrams) - segundo a Norma NP EN 12350-2 (2009);
- massa volúmica - segundo a Norma NP EN 12350-6 (2009);

3.2.3. Ensaio ao betão no estado endurecido

Os ensaios realizados ao betão no estado endurecido foram:

- resistência à compressão - segundo a Norma NP EN 12390-3 (2009);
- absorção de água por imersão - segundo a Norma LNEC E 394 (1993);
- absorção de água por capilaridade - segundo a Norma LNEC E 393 (1993);
- resistência à carbonatação - segundo a Norma LNEC E 391 (1993);
- resistência à penetração de cloretos - segundo a Norma LNEC E 463 (2004);

4. RESULTADOS E ANÁLISE

4.1. Propriedades dos agregados

A Tabela 2 apresenta os resultados experimentais dos vários ensaios realizados aos agregados.

Tabela 2 - Propriedades físicas dos agregados

	Areia fina	Areia grossa	AGB	AGC	AGG	AGM
ρ_{sd} (kg/m ³)	2576	2621	2953	2641	2705	2687
ρ_{sssd} (kg/m ³)	2584	2625	2976	2671	2734	2705
Baridade (kg/m ³)	1500	1543	1475	1430	1350	1352
Teor de vazios (%)	41,8	41,1	50,0	45,9	50,1	49,7
Absorção de água (%)	0,091	0,048	0,782	1,149	1,077	0,662
Coef. Los Angeles (%)	-	-	11,8	32,3	24,7	38,8
Índice de forma (%)	-	-	23,4	16,2	37,7	30,1

Os resultados demonstram que não existem diferenças significativas entre os AGM e os AP.

A sua massa volúmica é semelhante à dos agregados grossos de calcário (AGC) e dos agregados grossos de granito (AGG), e ligeiramente inferior à dos agregados grossos de basalto (AGB). A baridade apresenta uma relação similar, onde apenas os AGC registam um comportamento diferente, devido à maior continuidade da sua curva granulométrica. Os AGM apresentam a menor absorção de água entre todos os agregados ensaiados. O resultado do desgaste de Los Angeles, para os AGM, revela um valor elevado mas aquém do limite recomendado para betão, e os valores do índice de forma demonstram que a generalidade das suas partículas é mais alongada e angular. Estas duas características podem conduzir a um pior desempenho do betão a nível das suas propriedades mecânicas e de durabilidade.

4.2. Propriedades do betão no estado fresco

4.2.1. Trabalhabilidade

A Tabela 3 e a Figura 1 apresentam os resultados do ensaio de abaixamento do cone de Abrams para todas as misturas produzidas.

Tabela 3 - Abaixamento (cone de Abrams)

Taxa de substituição	Trabalhabilidade (mm)		
	BRB	BRC	BRG
0%	120,0	120,0	108,5
20%	125,0	122,5	108,5
50%	112,5	117,0	109,0
100%	123,0		

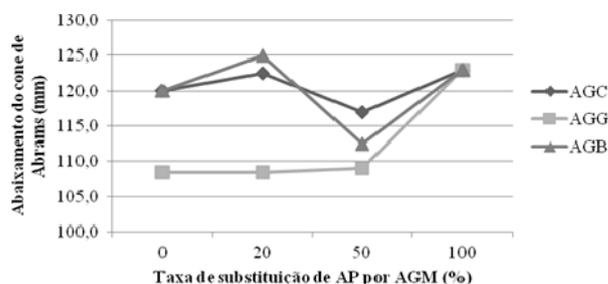


Figura 1 - Abaixamento do cone de Abrams

Como descrito, de forma a assegurar a fiabilidade da comparação entre as várias propriedades dos betões produzidos, garantiu-se que todas as composições apresentavam uma trabalhabilidade semelhante. Como tal, todos os resultados estão contidos no intervalo 115 ± 10 mm.

Pela análise da Tabela 3 e da Figura 1, verifica-se que a trabalhabilidade não apresenta uma tendência definida com a substituição de AP por AGM. Para betões produzidos com AGG, a introdução de AGM não afecta significativamente a trabalhabilidade, possivelmente pelo elevado índice de forma dos AGG. No caso dos betões com AGB e AGC, observa-se um aumento da trabalhabilidade para uma substituição de 20%, provavelmente devido à sua superfície lisa e reduzida absorção, e uma diminuição para uma taxa de substituição de 50%, supondo-se que a influência do índice de forma é superior ao aumento da fluidez observado para a taxa de 20%.

4.2.2. Massa volúmica

A Tabela 4 e a Figura 2 expõem os resultados da massa volúmica para o betão produzido.

Tabela 4 - Massa volúmica do betão no estado fresco

Taxa de substituição	Massa volúmica (kg/m ³)		
	BRB	BRC	BRG
0%	2481	2382	2403
20%	2474	2401	2421
50%	2444	2397	2402
100%	2377		

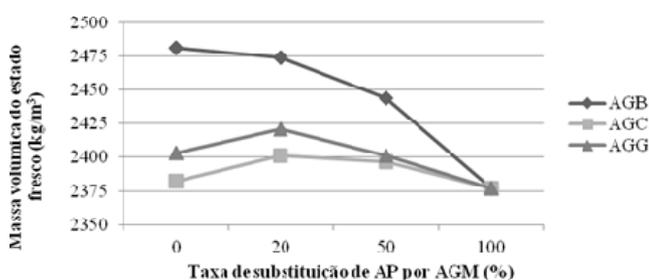


Figura 2 - Massa volúmica do betão no estado fresco

Os resultados demonstram que a massa volúmica dos betões produzidos com AGB decresce com a introdução de AGM, uma tendência esperada tendo em conta a diferença de massas volúmicas entre os dois agregados, e mantém-se praticamente constante para os betões com AGG ou AGC. A ligeira subida observada para uma taxa de substituição de 20%, nas duas famílias anteriores, pode dever-se ao melhor arranjo espacial das partículas, conferido pela melhoria da trabalhabilidade.

4.3. Propriedades do betão no estado endurecido

4.3.1. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado segundo o estipulado pela norma NP EN 12390-3 (2009) e os provetes sujeitos a uma tensão uniforme de compressão. A resistência à compressão não é uma propriedade que caracterize directamente a durabilidade de um betão. No entanto, é inúmeras vezes utilizada para avaliar a qualidade dos betões, indicando de forma indirecta a durabilidade destes. Assim, os resultados foram analisados e são apresentados na Tabela 5 e na Figura 3 os valores da resistência à compressão média aos 28 dias.

Tabela 5 - Resistência à compressão aos 28 dias

	$f_{cm,28\text{dias}}$ (MPa)	Δ (%)
BRB	45,9	0,0
BB20	44,0	-4,2
BB50	44,1	-3,9
BRM	41,8	-9,0
BRC	43,4	0,0
BC20	43,2	-0,5
BC50	44,2	1,8
BRM	41,8	-3,7
BRG	46,6	0,0
BG20	43,7	-6,2
BG50	41,3	-11,4
BRM	41,8	-10,3

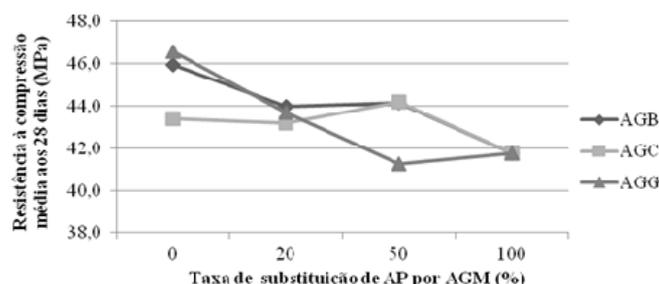


Figura 3 - Resistência à compressão média aos 28 dias

Pela análise destes resultados, verifica-se que o aumento da taxa de substituição, de uma forma geral, diminui a resistência à compressão média aos 28 dias.

4.3.2. Absorção de água por imersão

Os resultados do ensaio de absorção de água por imersão podem ser observados na Tabela 6 e na Figura 4.

Tabela 6 - Absorção de água por imersão

	Absorção por imersão (MPa)	Δ (%)
BRB	13,6	0,0
BB20	14,4	5,8
BB50	14,4	5,8
BRM	14,0	3,0
BRC	14,1	0,0
BC20	13,8	-2,3
BC50	13,3	-5,4
BRM	14,0	-0,8
BRG	13,8	0,0
BG20	13,6	-1,6
BG50	14,0	1,9
BRM	14,0	1,5

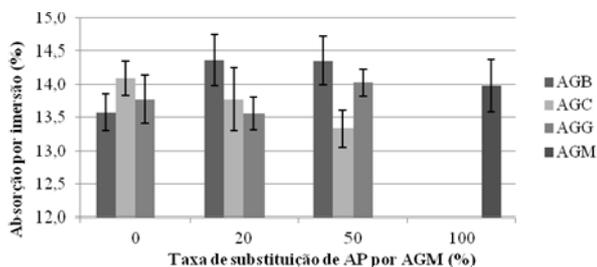


Figura 4 - Absorção de água por imersão

A Tabela 6 e a Figura 4 demonstram que o comportamento dos betões produzidos com AGM é similar ao dos betões de referência. Estes resultados eram esperados, atendendo à produção e cura igual entre todas as famílias, bem como à reduzida absorção dos agregados e possível semelhança a nível microestrutural do betão.

4.3.3. Absorção de água por capilaridade

Os resultados obtidos para a absorção e para a altura de água por capilaridade às 72 horas podem ser consultados na Tabela 7. A Figura 5 apresenta a absorção de água por capilaridade, em g/mm^2 , às 72 horas.

Os resultados alcançados permitem verificar que a absorção de água por capilaridade, para betões produzidos com AGC e AGG, diminui com a introdução de AGM, registando-se o inverso para betões com AGB. Este aumento pode dever-se à pior aderência entre os AGM e a pasta cimentícia, quando comparados com os AGB, aumentando os poros na zona de interface, onde o fenómeno de absorção é mais intenso. De um modo geral, verifica-se um bom desempenho de todas as famílias de betão produzidas com AGM, quando comparados com outros agregados reciclados.

Tabela 7 - Absorção e altura de água por capilaridade às 72h

	Absorção por capilaridade às 72 h ($\text{g}/\text{mm}^2 \times 10^{-4}$)	Δ (%)	Altura de ascensão capilar às 72 h (mm)	Δ (%)
BRB	7,2	0,0	17,4	0,0
BB20	10,0	38,2	15,8	-9,0
BB50	12,1	67,7	20,5	8,0
BRM	8,0	10,8	15,4	-11,5
BRC	14,2	0,0	21,3	0,0
BC20	11,7	-17,4	12,6	-40,6
BC50	13,3	-6,7	19,3	-9,1
BRM	8,0	-43,8	15,4	-27,6
BRG	13,6	0,0	31,2	0,0
BG20	9,4	-31,0	16,3	-47,9
BG50	11,6	-14,5	16,0	-48,7
BRM	8,0	-41,5	15,4	-50,7

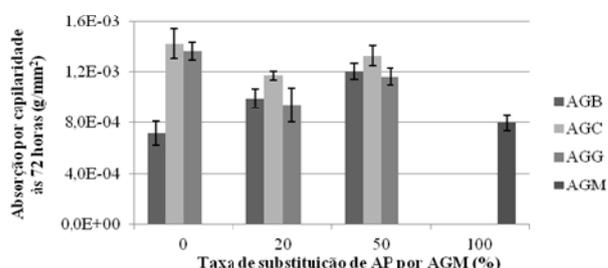


Figura 5 - Absorção de água por capilaridade às 72 h

4.3.4. Resistência à carbonatação

A Tabela 8 e as Figuras 6 a 8 demonstram a evolução da profundidade de carbonatação, em mm, para todas as composições em estudo.

Tabela 8 - Profundidade de carbonatação aos 7, 28, 56 e 91 dias

	BRB	BB20	BB50	BRM
7 dias	3,47	3,56	3,81	3,69
Δ (%)	0,0	2,4	9,6	6,3
28 dias	8,49	7,74	8,28	8,51
Δ (%)	0,0	-8,9	-2,5	0,2
56 dias	10,68	11,79	10,6	10,83
Δ (%)	0,0	10,4	-5,8	1,4
91 dias	13,54	13,36	11,12	13,53
Δ (%)	0,0	-1,3	-17,9	0,0
	BRC	BC20	BC50	BRM
7 dias	3,99	3,65	3,76	3,69
Δ (%)	0,0	-8,6	-5,7	-7,5
28 dias	7,83	7,36	7,38	8,51
Δ (%)	0,0	-6,0	-5,8	8,6
56 dias	10,32	10,81	11,45	10,83
Δ (%)	0,0	4,8	11,0	4,9
91 dias	13,06	13,24	14,47	13,53
Δ (%)	0,0	1,4	10,7	3,6
	BRG	BG20	BG50	BRM
7 dias	3,75	3,96	4,70	3,69
Δ (%)	0,0	5,6	25,1	-1,6

28 dias	8,29	8,03	9,08	8,51
Δ (%)	0,0	-3,1	9,5	2,7
56 dias	10,51	10,22	12,15	10,83
Δ (%)	0,0	-2,8	15,6	3,0
91 dias	12,61	14,04	14,01	13,53
Δ (%)	0,0	11,3	11,1	7,3

Em geral, a profundidade da frente de carbonatação foi similar nos diversos betões produzidos, para qualquer idade. As variações são tão pouco significativas que se pode concluir que a introdução de AGM contribui de forma semelhante à dos restantes AP, para a matriz cimentícia.

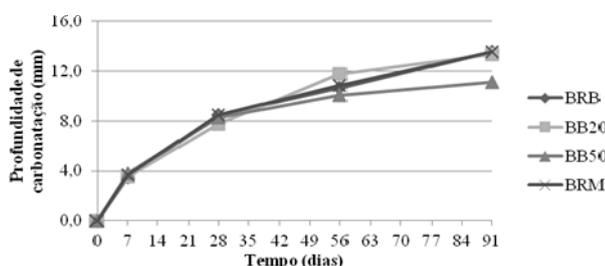


Figura 6 - Profundidade de carbonatação para betões com AGB, em função do tempo

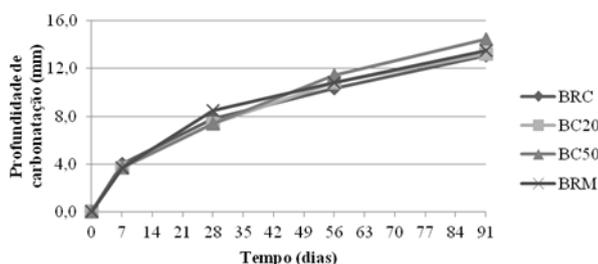


Figura 7 - Profundidade de carbonatação para betões com AGC, em função do tempo

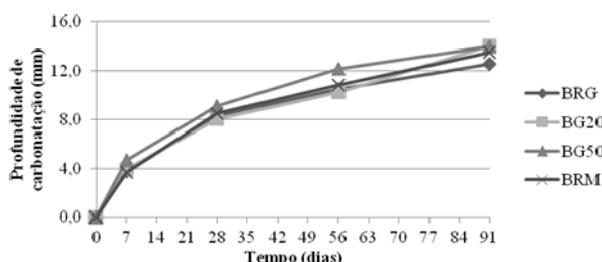


Figura 8 - Profundidade de carbonatação para betões com AGG, em função do tempo

4.3.5. Resistência à penetração por cloretos

Os resultados obtidos para a penetração de cloretos, aos 28 e 91 dias, são apresentados na Tabela 9. As Figuras 9 e 10 representam o coeficiente de migração de todas as famílias de betão produzidas.

Pela análise dos resultados, é possível verificar que o coeficiente de migração de cloretos aumenta com o aumento da taxa de substituição de AP por AGM. Este facto pode dever-se à reduzida percentagem de alumina existente nos AGM utilizados. A alumina beneficia a formação de aluminato tricálcico, responsável pela fixação de iões cloreto. Com a sua diminuição a percentagem de cloro livre no interior da matriz cimentícia aumenta, intensificando-se a migração de cloretos.

Tabela 9 - Coeficiente de migração dos cloretos aos 28 e aos 91 dias

	Coeficiente de migração dos cloretos ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)			
	28 dias	Δ (%)	91 dias	Δ (%)
BRB	13,51	0,0	-	-
BB20	-	-	-	-
BB50	15,24	12,8	-	-
BRM	-	-	17,91	-
BRC	17,92	0,0	14,34	0,0
BC20	21,49	19,9	14,86	3,6
BC50	-	-	16,27	13,5
BRM	-	-	17,91	24,9
BRG	-	0,0	15,21	0,0
BG20	18,73	-	17,39	14,3
BG50	20,51	-	19,86	30,5
BRM	-	-	17,91	17,8

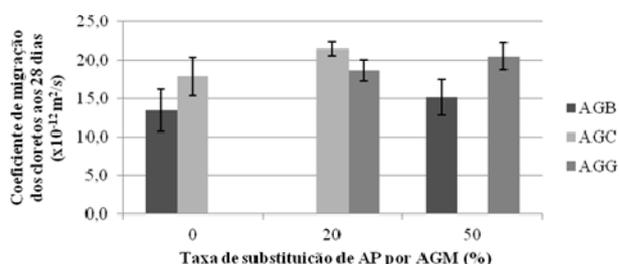


Figura 9 - Coeficiente de migração dos cloretos aos 28 dias

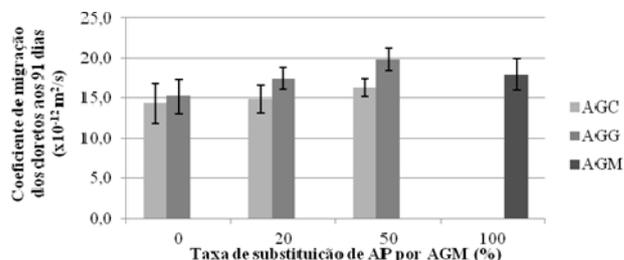


Figura 10 - Coeficiente de migração dos cloretos aos 91 dias

5. CONCLUSÕES

Esta campanha experimental permitiu avaliar o comportamento de betão produzido com a

incorporação de AGM ao nível da durabilidade. Os resultados obtidos neste estudo permitiram concluir que:

1. A trabalhabilidade não é significativamente afectada, nem apresenta uma tendência definida com a introdução de AGM. Ainda assim, foi possível observar um aumento de trabalhabilidade para a taxa de substituição de 20%, nos betões produzidos com AGB e AGC, e uma diminuição para a taxa de substituição 50%, nas mesmas famílias. Os betões produzidos com AGG permaneceram inalterados;
2. A massa volúmica reflecte a massa volúmica de cada um dos seus componentes e o seu grau de compactação. Como tal, diminui com a introdução de AGM em betões produzidos com AGB e mantém-se aproximadamente constante para os betões produzidos com AGC e AGG;
3. Genericamente, observa-se um decréscimo de resistência à compressão com o aumento da taxa de substituição de AP por AGM, aos 28 dias;
4. O comportamento dos betões produzidos com AGM, quanto à absorção de água por imersão, foi semelhante ao dos betões de referência. Tal pode dever-se à reduzida absorção dos agregados utilizados e a semelhanças a nível microestrutural das misturas produzidas;
5. A introdução de AGM em betões produzidos com AGC e AGG resulta numa diminuição da absorção de água por capilaridade. Verifica-se o resultado inverso relativamente aos produzidos com AGB. Tal pode ser justificado pela pior aderência dos AGM, aumentando os poros da zona de interface, onde este fenómeno é mais intenso;
6. A profundidade da frente de carbonatação dos betões produzidos com AGM é similar à dos betões de referência, corroborando a hipótese de semelhança a nível microestrutural das famílias produzidas;
7. A introdução de AGM nos betões produzidos resultou num aumento significativo do coeficiente de migração de cloretos. A percentagem reduzida de alumina destes agregados pode ser a principal responsável, uma vez que este composto beneficia a formação de aluminato tricálcico, que favorece a fixação de iões cloreto.

No cômputo geral, a utilização de AGM para incorporar em betão é exequível. Ao nível da durabilidade, provou-se que os AGM conferem ao betão características semelhantes às dos betões

produzidos com AGB, AGC e AGG, comumente utilizados na indústria da construção. Os principais cuidados devem ser adoptados em ambientes contaminados com cloretos, onde os AGM apresentaram os piores resultados.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do ICIST (Instituto de Engenharia de Estruturas, Território e Construção), do IST (Instituto Superior Técnico), da UTL (Universidade Técnica de Lisboa) e da FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia).

7. REFERÊNCIAS

- [1] Saboya Jr., F., Xavier, G. C., Alexandre, J. *The use of the powder marble by-product to enhance the properties of brick ceramic*. Construction and Building Materials, V. 21, N. 10, 2005, pp. 1950-1960.
- [2] Binici, H., Kaplan, H., Yilmaz, S., *Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete*. Scientific Research and Essay, V. 2, N. 9, 2007|a, pp. 372-379.
- [3] Topçu, Ý. B., Bilir, T., Uygunođlu, T. *Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete*. Construction and Building Materials, v. 23, N. 5, 2009, pp. 1947-1953.
- [4] Corinaldesi, V., Moriconi, G., Naik, T. R. *Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete*. Construction and Building Materials, V. 24, N. 1, 2009, pp. 113-117.
- [5] Akbulut, H., Güreer, C. *Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements*. Building and Environment, V. 42, N. 5, 2005, pp. 1921-1930.
- [6] Gencil, O., Ozel, C., Koksall, F., Erdogmus, E., Martínez-Barrera, G., Brostow, W. *Properties of concrete paving blocks made with waste marble*. Journal of Cleaner Production, V. 21, N. 1, 2012, pp. 62-70.
- [7] Binici, H., Shah, T., Aksogan, O., Kaplan, H. *Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates*. Journal of Materials Processing Technology, V. 208, N. 1-3, 2007|b, pp. 299-308.

[8] Pereira, C. G., Castro-Gomes, J., Oliveira, L. *Influence of natural coarse aggregate size, mineralogy and water content on the permeability of structural concrete*. Construction and Building Materials, V. 23, N. 2, 2007, pp. 602-608.

[9] Martins, P., *Desempenho mecânico de betões com incorporação de agregados grossos de resíduos da indústria do mármore*. Dissertação apresentada para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2012.

8. NORMALIZAÇÃO

NP EN 206-1. *Betão: Especificação, desempenho, produção e conformidade*, IPQ, 2007.

LNEC E 237. *Agregados: Ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles*, LNEC, Lisboa, 1971.

LNEC E 391. *Betões: Determinação da resistência à carbonatação*, LNEC, Lisboa, 1993.

LNEC E 393. *Betões: Determinação da absorção de água por capilaridade*, LNEC Lisboa, 1993.

LNEC E 394. *Betões: Determinação da absorção de água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica*, LNEC, Lisboa, 1993.

LNEC E 463. *Betões: Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário*, LNEC, Lisboa, 2004.

NP EN 933-1. *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados: Análise granulométrica. Método de peneiração*, IPQ, Lisboa, 2000.

NP EN 933-4. *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados: Determinação da forma das partículas. Índice de forma*, IPQ, Lisboa, 2004.

NP EN 1097-3. *Ensaio para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: Método para determinação da massa volúmica e dos vazios*, IPQ, Lisboa, 2002.

NP EN 1097-6. *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: Determinação da massa volúmica e da absorção de água*, IPQ, Lisboa, 2003.

NP EN 12350-2. *Ensaio do betão fresco: Ensaio de Abaixamento*, IPQ, Lisboa, 2009.

NP EN 12350-6. *Ensaio do betão fresco: Massa Volúmica*, IPQ, Lisboa, 2009.

NP EN 12390-3. *Ensaio do betão endurecido: Resistência à compressão dos provetes de ensaios*, IPQ, Lisboa, 2009.