

## **Qualidade de agregados naturais e sua influência na durabilidade do betão estrutural**



**C. Gonilho  
Pereira<sup>1</sup>**



**J. P.  
Castro-Gomes<sup>2</sup>**



**L. Pereira de  
Oliveira<sup>3</sup>**

### **RESUMO**

O trabalho experimental, aqui apresentado, compreendeu a caracterização de diferentes agregados naturais e de diferentes tipos de betão, com eles produzidos, tendo por objectivo identificar de que forma a origem geológica, dimensão máxima e teor de água dos agregados, influenciam as propriedades do betão. Neste trabalho, os agregados estudados foram de quatro tipos – granito, basalto, calcário e mármore. Foram efectuados ensaios de caracterização em corpos de prova de rocha, assim como dos respectivos agregados, nomeadamente de granulometrias 4.76/9.52mm e 9.52/12.70mm, para avaliar quer as propriedades mecânicas, quer as propriedades relativas à durabilidade, tais como absorção de água por capilaridade, absorção por imersão com vácuo, permeabilidade ao ar e à água. Três tipos de betão foram produzidos com cada um dos agregados estudados: betão com agregado 4.76/9.52mm e 9.52/12.70mm; betão com agregado 4.76/9.52mm; e betão com agregado 4.76/9.52mm, nas condições de saturado com a superfície seca. As misturas foram produzidas com agregados de igual granulometria, igual dosagem de cimento e razão A/C, bem como igual trabalhabilidade. Após 28 dias de cura, os betões foram ensaiados dando especial ênfase à avaliação dos parâmetros indicativos da durabilidade. O estudo permitiu concluir que a absorção de água por capilaridade e a permeabilidade ao ar, avaliados aos 28 dias, são afectados pela dimensão e teor de água do agregado e que a origem geológica do agregado parece não afectar significativamente estes mesmos parâmetros.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Agregado grosso, permeabilidade, absorção de água, permeabilidade, durabilidade

<sup>1</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal.  
cristiana.pereira@civil.uminho.pt

<sup>2</sup> C-MADE, Centre of Materials and Building Technologies, Universidade da Beira Interior, 6201-001 Covilhã, Portugal.  
castro.gomes@ubi.pt

<sup>3</sup> C-MADE, Centre of Materials and Building Technologies, Universidade da Beira Interior, 6201-001 Covilhã, Portugal.  
luiz.oliveira@ubi.pt

## **1. INTRODUÇÃO**

Os agregados mais comuns utilizados na produção de betão são agregados naturais britados extraídos de pedreiras de diferentes origens geológicas. Os agregados naturais britados podem ser obtidos de diferentes tipos de rochas, tais como granito, calcário, basalto e mármore. No betão, os agregados ocupam cerca de 70 a 80% do seu volume, sendo que os agregados grossos ocupam 2/3 desse mesmo volume.

A indústria europeia de agregados (produção de betão e vias de comunicação) produz 3.000 milhões de toneladas todos os anos [1]. Compreendendo mais de 28.000 pedreiras, de pequena e média dimensão [1], a produção de agregados na Europa foi mais ou menos constante ao longo dos anos 1999 a 2004 [2]. Os novos edifícios residenciais são os responsáveis por consumir  $\frac{1}{4}$  do valor gerado no sector. Por exemplo, a construção de um edifício de habitação consome até 400 toneladas de agregados [3]. A média anual da produção de agregados representa 7 toneladas por ano, por cidadão europeu, sendo que os países que apresentam maior consumo per capita são a Irlanda (21,5 t/cap) e a Finlândia (18,7 t/cap) [2, 4]. A relevância económica do sector dos agregados naturais difere em cada Estado-Membro; alguns países estão mais interessados no uso de agregados reciclados enquanto outros têm um mercado interno de agregados naturais bem definido. Portugal é um dos países onde a indústria dos agregados naturais apresenta elevada relevância económica, assim como a Eslováquia, Polónia, Irlanda, Finlândia, República Checa e a Espanha [4]. Durante o ano de 2004, mais de 82 milhões de toneladas de agregados foram produzidas em Portugal, representando cerca de 8,4 toneladas por cidadão [1, 4]. Relativamente à produção de agregados reciclados em Portugal, não existem dados estatísticos.

De acordo com Instituto Geológico e Mineiro, as rochas ígneas, sedimentares e metamórficas representam cerca de 30, 20 e 40% do território nacional, respectivamente. As rochas ígneas consistem maioritariamente em granitos e basaltos, enquanto as rochas sedimentares são predominantemente de natureza calcária. As metamórficas são xistos, quartzitos e mármore [5]. A extracção de granito é predominante no norte de Portugal, representando mais de 90% da extracção efectuada, enquanto no centro e sul do país, a extracção de agregados calcários é mais relevante, cerca de 60% e 90% do total extraído, respectivamente. Também na região centro são extraídos agregados de basalto e mármore, mas em menores percentagens [6].

Os grandes centros urbanos, como Lisboa, Setúbal, Coimbra, Braga e Porto, são os responsáveis pela maior produção e maior consumo de agregados em Portugal. Desta forma, agregados graníticos e calcários representam mais de 70% do total de agregados produzidos e consumidos no país, devido à existência deste tipo de formações geológicas na proximidade destes mesmos centros urbanos. Durante o ano de 2004, cerca de 31,4 milhões de toneladas de granito e 39,4 milhões de toneladas de agregados calcários foram produzidos em Portugal [7, 8]. Desta forma, a selecção do tipo de agregado grosso para a produção de betão é determinada pela procura e produção de agregados grossos na região. Contudo, a escolha do agregado grosso deverá apoiar-se nas características exigidas ao agregado, de acordo com o estipulado em normas. As características do betão a produzir, tais como, densidade, tensão de rotura ou mesmo resistência à abrasão, são determinadas em grande parte pelas características mecânicas e físicas do agregado [10, 11, 12, 13, 14].

## **2. OBJECTIVOS**

Pretende-se, com este trabalho, contribuir para o desenvolvimento dos estudos no âmbito da durabilidade dos materiais, nomeadamente dos agregados e do betão com eles produzido. O objectivo deste trabalho experimental foi o de compreender de que forma é que a natureza e dimensões do agregado pode influenciar as propriedades do betão. Pretende também identificar de que forma é que as condições iniciais dos agregados podem influenciar o desempenho do betão face à acção dos agentes agressivos.

### **3. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

#### **3.1 Selecção de agregados**

O estudo compreendeu a selecção de quatro tipos de agregado – granito (G), basalto (B), calcário (C) e mármore (M) –, representativos da utilização de agregados na produção de betão, em Portugal. O tipo de agregado em estudo e a sua proveniência teve por base a análise da indústria extractiva em Portugal. O agregado granítico escolhido provém de Cabeça Santa, concelho de Penafiel, distrito do Porto, na região Norte. O agregado do tipo basalto, bem como as amostras de rocha, foram obtidas na exploração em Casal Gaiola, no concelho de Rio Maior, distrito de Santarém. Atendendo que a fracção mais importante de produção de calcário para fins industriais, nomeadamente para a indústria da construção civil e obras públicas, é a explorada no distrito de Leiria, o calcário escolhido provém da exploração da região da Mendiga, concelho de Porto de Mós. Uma vez que a maior jazida portuguesa de calcários cristalinos se situa na faixa Estremoz-Borba-Vila Viçosa, as amostras de mármore foram adquiridas na zona de Bencatel, concelho de Vila Viçosa, distrito de Évora. Como agregado fino foi seleccionada uma areia rolada, proveniente da região de Lisboa e Vale do Tejo, uma vez que se verifica que 80% da areia produzida no país é desta Região.

#### **3.2 Caracterização dos agregados**

A avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos agregados naturais foi efectuada de acordo com a normalização europeia e nacional, em laboratório, em corpos de prova extraídos da rocha e em partículas de agregado obtidas da produção industrial das pedreiras.

Tensão de rotura à compressão e propriedades relacionadas com a durabilidade dos materiais, tais como absorção de água por capilaridade e permeabilidade ao ar, foram determinadas em corpos de prova de rocha. A determinação da tensão de rotura à compressão foi efectuada em carotes extraídas da rocha com 12,5cm de altura e 5cm de diâmetro de acordo com as recomendações da International Society for rock mechanics (ISRM) [15].

A determinação da absorção de água por capilaridade foi efectuada de acordo com a especificação do LNEC E393 [16]. O coeficiente de absorção e o coeficiente de capilaridade foram obtidos de acordo com a norma francesa NF B 10-502 e norma alemã DIN 52617 respectivamente [17, 18]. Também estes parâmetros foram obtidos com corpos de prova de rocha com 12,5cm de altura e 5cm de diâmetro. Após secagem dos corpos de prova, em estufa, a superfície lateral de cada provete foi impermeabilizada através do uso de fita adesiva e colocado em contacto com uma lâmina de água. A determinação do coeficiente de absorção,  $A_w$ , e de capilaridade,  $C$ , resultou das medições da variação de peso de cada um dos provetes após 15, 30 e 60 minutos, 1,5, 2, 6, 24 e 48 horas em contacto com a água [17, 18]. Os coeficientes de absorção e de capilaridade são parâmetros de avaliação do mesmo fenómeno – sucção capilar; ambos parâmetros foram obtidos através da equação presente na respectiva norma. A permeabilidade ao oxigénio e à água foram determinadas em diferentes corpos de prova cilíndricos, com 5cm de diâmetro e 4cm de altura. Detalhes do equipamento utilizado e dos procedimentos de ensaio são apresentados noutros trabalhos [13, 21]. A análise granulométrica, máxima dimensão e módulo de finura foram determinados em cada um dos agregados. O índice volumétrico, para partículas com dimensão entre 4,76mm e 50,8mm, foi obtido de acordo com o procedimento apresentado na especificação LNEC E223 [22]. A determinação da massa volúmica e baridade, absorção de água e desgaste Los Angeles foram igualmente determinados de acordo com a especificação portuguesa LNEC E227 [23]. O ensaio de esmagamento foi efectuada de acordo com a norma britânica BS 812 [24].

### 3.3 Composição de betão

Foram produzidos betões da classe de resistência C30/37. As misturas foram preparadas com constante trabalhabilidade e iguais condições de mistura e de cura. Os agregados grossos, da granulometria 4.76/9.52mm e 9.52/12.70mm, foram utilizados na condição de secos e de saturados de água, com superfície seca. As granulometrias dos diferentes agregados foram produzidas em laboratório, de forma a manter constante o módulo de finura de Faury (agregado grosso A1=6,4 e agregado grosso A2=7,0). Para cada tipo de agregado foram produzidos três tipos de betão diferentes, designados por: mistura (A1A2) com agregado das granulometrias 4.76/9.52mm e 9.52/12.70mm; mistura (A1) com agregado da granulometria 4.76/9.52mm; e mistura (A1SAT) mistura (A1) com agregado da granulometria 4.76/9.52mm, na condição de saturado com a superfície seca. Foram produzidos um total de 12 betões, com os quatro tipos diferentes de agregado grosso, de acordo com o quadro 1.

Quadro 1: Composições de betão

	Tipo de agregado			
	Basalto	Granito	Calcário	Mármore
<b>Mistura A1A2:</b>				
Areia (kg/m <sup>3</sup> )	697.5	697.5	697.5	697.5
Agregado 4.76/9.52mm (kg/m <sup>3</sup> )	511.9	475.7	459.4	502.8
Agregado 9.52/12.70mm (kg/m <sup>3</sup> )	471.4	345.2	418.7	448.4
Cimento CEM II/B-L 35.2 (kg/m <sup>3</sup> )	450.0	450.0	450.0	450.0
Água (l/m <sup>3</sup> )	198.0	198.0	198.0	198.0
Água adicionada na mistura (%)*	0	1.5	35	1.5
Trabalhabilidade (slump final) (cm)	13	11	11	13
<b>Mistura A1:</b>				
Areia (kg/m <sup>3</sup> )	813.8	813.8	813.8	813.8
Agregado 4.76/9.52mm (kg/m <sup>3</sup> )	839.9	780.5	753.8	825.1
Agregado 9.52/12.70mm (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	-
Cimento CEM II/B-L 35.2 (kg/m <sup>3</sup> )	450.0	450.0	450.0	450.0
Água (l/m <sup>3</sup> )	198.0	198.0	198.0	198.0
Água adicionada na mistura (%)*	4	13	16	5
Trabalhabilidade (slump final) (cm)	10	11	10	11
<b>Mistura A1SAT:</b>				
Areia (kg/m <sup>3</sup> )	813.8	813.8	813.8	813.8
Agregado 4.76/9.52mm (kg/m <sup>3</sup> )	839.9	780.5	753.8	825.1
Agregado 9.52/12.70mm (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	-
Cimento CEM II/B-L 35.2 (kg/m <sup>3</sup> )	450.0	450.0	450.0	450.0
Água (l/m <sup>3</sup> )	198.0	198.0	198.0	198.0
Água adicionada na mistura (%)*	0	0	0	20
Trabalhabilidade (slump final) (cm)	10	10	10	10

\* Água adicionada compreende água de absorção por parte dos agregados e ajuste de água para obtenção trabalhabilidade constante (12 ±2cm).

A composição do betão obedeceu ao método de Faury e foram mantidos constantes a dosagem de cimento, 450 kg/m<sup>3</sup>, a granulometria dos agregados, a relação água/cimento, 0,44, e o volume de vazios. Os betões foram curados durante 28 dias, em ambiente com humidade relativa de 90% e temperatura constante de, aproximadamente, 20°C.

Os betões (A1A2) e (A1) foram produzidos com agregados relativamente secos, resultado das condições atmosféricas naturais verificadas no verão. Desta forma, alguma água foi adicionada às misturas para compensar a absorção de água inicial por parte dos agregados, nos instantes iniciais da produção do betão. A absorção de água por parte de cada tipo de agregado foi determinada previamente e a quantidade de água adicional foi determinada considerando que os agregados absorvem cerca de 70% da sua água de saturação nos primeiros minutos de mistura [9]. Nalguns casos,

pequenos ajustes à quantidade de água foram necessários para garantir igual trabalhabilidade (abaixamento de cone de Abrams). Desta forma, considera-se que a pequena quantidade de água de ajuste não afecta, de forma significativa, a razão água/cimento, uma vez que é, predominantemente, absorvida pelos agregados. Contudo, de acordo com o quadro 1, verificou-se que durante a produção dos betões (A1SAT) com agregado de mármore saturado, foi necessário adicionar pequena quantidade de água para obter mesma trabalhabilidade que a obtida pelos betões produzidos com calcário, basalto e granito. Não é muito claro para os autores a necessidade deste ajuste de água uma vez que os agregados de mármore já se encontravam saturados de água. Contudo, esta necessidade pode ser explicada devido índice volumétrico dos agregados de mármore que poderão ter resultado numa mistura com baixa trabalhabilidade, logo necessitando de um acréscimo de água para aumentar este parâmetro. Neste betão em concreto, a água adicional vai afectar a relação água/cimento e o comportamento mecânico do betão. Os betões (A1SAT) foram produzidos com agregados saturados com a superfície seca. As partículas de agregado foram imersas em água durante 24 horas e a condição de saturas com a superfície seca foi obtida, em laboratório, deixando que a água da superfície evaporasse, durante cerca de 2 horas. O procedimento consistiu em colocar as partículas do agregado numa única camada sob uma malha metálica. Foram também produzidas, separadamente, as argamassas de cada um dos betões (A1A2), (A1) e (A1SAT), permitindo a avaliação das propriedades da fracção de argamassa presente em cada betão. A argamassa (A1A2) apresentou um traço 1:3.2 e a (A1) e (A1SAT) um traço 1:3.6.

#### **4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS**

##### **4.1 Propriedades dos agregados**

As propriedades mecânicas e físicas dos agregados grossos, obtidas em corpos de prova de rocha e em corpos de prova de partículas de agregado, são apresentados no quadro 2. O quadro 3 apresenta as propriedades do agregado fino – areia. Os valores apresentados são o resultado médio obtido de um número de ensaios com relevância estatística.

Quadro2: Propriedades mecânicas e físicas dos agregados grossos

	Tipo de agregado			
	Basalto	Granito	Calcário	Mármore
Agregados A1 / A2 :				
Máxima dimensão (mm)	9,52 / 12,7	9,52 / 12,7	9,52 / 12,7	9,52 / 12,7
Módulo de Finura	6,4 / 7,0	6,4 / 7,0	6,4 / 7,0	6,4 / 7,0
Índice volumétrico	0,25 / 0,25	0,12 / 0,19	0,20 / 0,26	0,17 / 0,22
Baridade (kg/m <sup>3</sup> )	1630	1420	1360	1490
Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2850	2640	2540	2750
Absorção de água do agregado (%)	1,5	0,3	2,8	0,05
Abrasão Los Angeles (%)	15	26	37	41
Esmagamento (%)	16	24	32	29
* Tensão de rotura à compressão (MPa)	138	100	61	71
* Coeficiente de absorção (kg/m <sup>2</sup> /h <sup>0,5</sup> )	0,03	0,03	1,30	0,015
* Coeficiente de capilaridade (g/cm <sup>2</sup> /min <sup>0,5</sup> )	0,04	0,04	1,68	0,02
* Permeabilidade ao oxigénio (m <sup>2</sup> ) x 10 <sup>-16</sup>	0	0,01	0,32	0

\* obtido em corpos de prova de rocha

Quadro 3: Propriedades físicas do agregado fino

	Agregado fino
	Areia
Máxima dimensão (mm)	2,4
Módulo de Finura	3,3
Baridade (kg/m <sup>3</sup> )	1690
Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2620
Absorção de água do agregado (%)	0,5

O basalto apresenta a tensão de rotura à compressão mais elevada, 140 MPa, seguido do granito com 100 MPa. Estes resultados são indicadores das boas propriedades mecânicas de agregados sem alterabilidade. A tensão de rotura à compressão média do calcário e do mármore é de 60 e 70 MPa, respectivamente. Estes resultados foram obtidos com o ensaio de dois tipos de calcário e dois tipos de mármore, presentes nos agregados grossos. Tendo em consideração a origem geológica destes dois tipos de rocha (sedimentária e metamórfica), podem também ser consideradas de bom desempenho mecânico. Os resultados do ensaio de compressão são superiores ao valor mínimo recomendado (60 MPa) para agregados a utilizar na produção de betão [26]. No que diz respeito à baridade, entre 1200 e 1700 kg/m<sup>3</sup>, os agregados são considerados regulares e adequados para a produção de betão corrente. A massa volúmica dos agregados, entre 2300 e 3000 kg/m<sup>3</sup>, é também uma característica de agregados regulares [26]. Por outro lado, todos os agregados apresentaram desgaste de abrasão Los Angeles inferior a 50%; valor máximo recomendado em agregados para produção de betão. Os agregados são considerados aceitáveis para a produção de betão caso apresentem esmagamento inferior a 45%, facto verificado nos quatro tipos de agregado [26]. Relativamente às propriedades físicas, o agregado calcário apresenta a mais elevada absorção de água, contrariamente ao mármore que apresenta absorção quase nula. De acordo com os coeficientes de absorção e de capilaridade (quadro 4) pode concluir-se que o granito, o basalto e o mármore são quase impermeáveis, apresentando muito fraca capilaridade, e que o calcário é inibidor de água, apresentando fraca capilaridade. O basalto apresenta permeabilidade ao oxigénio mais elevada enquanto o mármore não permite a atravessamento do oxigénio, nas condições de ensaio adoptadas. Por fim, no que diz respeito à penetração de água, o basalto e o mármore são impermeáveis, o granito apresenta baixa permeabilidade e o calcário apresenta a permeabilidade mais elevada.

Quadro 4: Classificação de agregados de acordo com os coeficientes de absorção [18] e de capilaridade [19].

DIN52617 Classe de absorção	Coef. de absorção (kg/m <sup>2</sup> /h <sup>0,5</sup> )	NFB10502 Classe de capilaridade	Coef. de capilaridade (kg/m <sup>2</sup> /h <sup>0,5</sup> )	Classe do agregado
Sucção rápida	> 2	Capilaridade forte	> 4	-
Inibidor de água	0,5 < A ≤ 2	Capilaridade fraca	1,5 ≤ C ≤ 4	Calcário
Quase impermeável	0,001 < A ≤ 2	Muito fraca capilaridade	C < 1,5	Granito, basalto e mármore
Impermeável	≤ 0,001	-	-	-

As propriedades mecânicas e físicas dos agregados estudados, de acordo com os quadros 2 e 3, são características de agregados regulares, de boa qualidade, apresentando nenhuma ou muito pouca alterabilidade. As propriedades físicas, tais como absorção de água e capilaridade, obtida de carotes de rocha original e em partículas de agregado são da mesma ordem de magnitude, independentemente das condições severas de britagem que podem dar origem a micro fissuras e alterar as propriedades.

#### 4.2 Propriedades dos betões produzidos

A caracterização dos betões e argamassas foi feita recorrendo aos seguintes ensaios: ensaio de compressão, determinação dos coeficientes de absorção e de capilaridade, absorção de água por imersão com vácuo e permeabilidade ao oxigénio, aos 28 dias de idade.

A tensão de rotura à compressão foi obtida em cilindros com 15cm de altura e 7,5cm de diâmetro, de acordo com a especificação do LNEC [25]. Os coeficientes de absorção e de capilaridade foram obtidas em corpos de prova com 15cm de altura e 7.5 x 7.5cm de secção, de acordo com a norma francesa [17] e a norma alemã [18], respectivamente, e o ensaio foi executado de acordo com a especificação do LNEC [16] utilizada no ensaio de corpos de prova de rocha. A permeabilidade ao oxigénio e á água foram também obtidas em corpos de prova cilíndricos com 5cm de diâmetro e 4cm de altura extraídos de cubos de betão, como descrito em [13, 21]. As células de permeabilidade utilizadas neste estudo foram desenvolvidas nos laboratórios da Universidade da Beira Interior, de acordo com as células da Universidade de Leeds (UK). A influência do tipo de agregado grosso, dimensão das partículas e condição inicial – seco ou saturado com a superfície seca – nos parâmetros de durabilidade do betão foi determinada. Os valores médios dos resultados obtidos em seis corpos de prova dos diferentes betões são apresentados no quadro 5. O quadro 6 apresenta o valor médio dos resultados obtidos nas argamassas produzidas.

Quadro 5: Valor médio dos resultados obtidos em betões

Betões A1A2 / A1 / A1SAT				
	Basalto	Granito	Calcário	Mármore
Tensão de rotura à compressão (MPa)	33 / 33 / 33	35 / 27 / 31	33 / 29 / 32	33 / 31 / 30
Coeficiente de absorção (kg/m <sup>2</sup> /h <sup>0,5</sup> )	2,09 / 1,75 / 1,65	1,78 / 2,11 / 1,89	2,32 / 2,18 / 2,06	2,01 / 1,70 / 1,69
Coeficiente de capilaridade (g/cm <sup>2</sup> /min <sup>0,5</sup> )	2,72 / 2,25 / 2,15	2,30 / 2,72 / 2,44	3,00 / 2,81 / 2,67	2,58 / 2,20 / 2,20
Absorção de água por imersão com vácuo (%)	15 / 15 / 13	15 / 15 / 13	18 / 17 / 14	15 / 14 / 13
Permeabilidade ao oxigénio (m <sup>2</sup> ) x 10 <sup>-16</sup>	2,2 / 2,0 / 1,7	2,0 / 1,5 / 1,7	2,5 / 2,4 / 1,6	2,2 / 1,9 / 1,5

Quadro 6: Valor médio dos resultados obtidos em argamassas

Argamassa		
	A1A2	A1 e A1SAT
Tensão de rotura à compressão (MPa)	31	31
Coeficiente de absorção (kg/m <sup>2</sup> /h <sup>0,5</sup> )	1,83	1,84
Coeficiente de capilaridade (g/cm <sup>2</sup> /min <sup>0,5</sup> )	2,34	2,39
Absorção de água por imersão com vácuo (%)	22	21
Permeabilidade ao oxigénio (m <sup>2</sup> ) x 10 <sup>-16</sup>	1,78	1,15

A análise dos resultados do ensaio de compressão demonstra que todos os betões apresentam tensões de rotura similares (C30/37). No betão (A1A2), a tensão de rotura obtida é ligeiramente superior à obtida nas misturas (A1) e (A1SAT), devido à presença de agregados grossos de maiores dimensões – A2. Contudo os resultados das diferentes misturas podem ser considerados do mesmo nível de magnitude.

Relativamente às argamassas, os resultados de tensão de rotura à compressão são semelhantes aos obtidos nos betões. Estes resultados demonstram que a fracção de argamassa é responsável pelo desempenho mecânico do betão, independentemente do tipo de agregado utilizado.

No que diz respeito ao coeficiente de capilaridade, todos os betões apresentaram fraca capilaridade. Analisando o coeficiente de absorção, alguns betões podem ser classificados como sendo de sucção rápida e outros como inibidores de água. Os betões produzidos com calcário apresentaram valores mais elevados de absorção de água por imersão com vácuo. Independentemente do tipo de agregado utilizado, os betões (A1A2) apresentaram absorção de água com vácuo mais elevada, seguidos dos betões (A1) e dos betões (A1SAT), que apresentaram os valores mais baixos. De acordo com estes

resultados, a permeabilidade ao oxigénio é mais elevada nos betões (A1A2) do que nos betões (A1), que por sua vez é mais elevada do que nos betões (A1SAT).

Absorção de água por imersão com vácuo é mais elevada nas argamassas do que nos betões, comprovando a maior compacidade dos betões. Contudo, parâmetros como absorção, capilaridade e permeabilidade ao oxigénio são geralmente mais elevados nos betões do que nas respectivas argamassas. Este facto pode indicar que a presença de agregados grossos aumenta os poros capilares e a sua inter-conectividade, enquanto nas argamassas o volume de poros é superior mas estão menos interligados.

Considerando os coeficientes de absorção e de capilaridade, absorção de água por imersão com vácuo e permeabilidade ao oxigénio dos betões, uma tendência decrescente é observada dos betões (A1A2) para os betões (A1) e (A1SAT). De acordo com estes resultados, comparando os betões (A1A2) com os (A1), a produção de betão com agregados de menor dimensão reduz a capilaridade, a absorção de água por imersão com vácuo e a permeabilidade. Este facto pode ser explicado devido à contribuição da presença de agregados de maior dimensão para o aumento da rede de poros capilares e sua inter-conectividade, bem como para o aumento da porosidade da zona de interface cimento-agregado, onde o fenómeno de absorção de água por capilaridade ocorre. Este facto é também realçado por outros autores [27]. Esta tendência é verificada excepto para betões produzidos com granito, para a qual não existe explicação razoável ainda que exista a possibilidade da inter-conectividade entre poros capilares de alguns corpos de prova ter sido afectada devido à secagem dos mesmos em estufa antes de cada ensaio. Comparando o desempenho dos betões (A1) e (A1SAT), é evidente que os betões produzidos com agregados saturados com a superfície seca apresentam resultados mais baixos. Neste caso, não se verifica alteração da rede de poros capilares, uma vez que a dimensão dos agregados não foi alterada, verifica-se sim alteração na porosidade da zona de interface cimento-agregado, também sugerido por outros autores [28]. Considera-se que uma vez que os agregados na condição de saturados não absorvem água da fracção de argamassa a porosidade da zona de interface cimento-agregado é minimizada. A zona de interface cimento-agregado apresenta porosidade mais elevada quando os agregados são introduzidos secos.

Por fim, os resultados das propriedades obtidas nos betões com diferentes tipos de agregados, apresentadas no quadro 5, são do mesmo nível de magnitude, indicando que a mineralogia dos agregados tem pouca influência nas propriedades do betão.

## **5. CONCLUSÕES**

Neste estudo, betões, com diferentes tipos de agregados grossos naturais, de diferentes origens geológicas, foram produzidos em laboratório. Foram utilizados agregados de boa qualidade, com absorção de água baixa e propriedades mecânicas adequadas. A influência nas propriedades mecânicas e nos parâmetros de durabilidade do betão, do tipo de agregado grosso, dimensão das partículas bem como das condições seco ou saturado com a superfície seca, foi determinada. Verificou-se que o tipo de agregado, dimensão e teor em água não influenciam significativamente o desempenho mecânico do betão da classe de resistência C30/37. Independentemente do tipo de agregado utilizado, betões produzidos com agregados de maior dimensão apresentaram absorção de água por capilaridade mais elevada, bem como permeabilidade ao oxigénio. Este facto pode ser explicado devido à presença de agregados de maior dimensão que contribuem não só para o aumento da rede de poros capilares e sua inter-conectividade, mas também para o aumento da zona de interface cimento-agregado. Independentemente do tipo de agregado utilizado, betões produzidos com agregados nas condições de saturado com a superfície seca apresentam absorção de água por imersão com vácuo e permeabilidade ao oxigénio mais baixas do que betões produzidos com agregados secos, da mesma dimensão. Quando os agregados são introduzidos saturados não absorvem água da argamassa, contribuindo para a uma zona interface cimento-agregado mais densa.



Por fim, pode concluir-se que as propriedades de durabilidade do betão não são afectadas pela mineralogia dos agregados, sendo sim, significativamente afectados pela dimensão do agregado e seu teor de água.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores estão gratos à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo financiamento do projecto-POCTI36027/99 “Influence of Physical Properties and Morphological Parameters of Granites and Calcareous Aggregates on the Permeability of Concrete”.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] UPEG (European Aggregates Association). Providing essential materials for Europe, Annual Report, Brussels, 2006.
- [2] BGS (British Geological Survey). Office of Deputy Prime Minister, European Mineral Statistics 2000-04, Keyworth Nottingham, 2006.
- [3] UPEG (European Aggregates Association). Annual Report, Brussels, 2006.
- [4] Bleishwitz, R. and Bahn-Walkowiak, B. Sustainable Development in the European aggregates industry: a case for sectoral strategies, Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy, October, 2006.
- [5] IGM (Instituto Geológico e Mineiro). Portugal – Indústria extractiva, 2000.
- [6] Gonilho Pereira, C.N. Estudo da influência de diferentes tipos de agregado no betão estrutural: Durabilidade e zona de interface, Tese de Mestrado, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, Julho, 2005.
- [7] Carvalho, J. and Martins, L. Panorama da indústria de agregados portuguesa, ambiente e uso do solo, 2º Seminário Internacional Minería, Medio Ambiente y Ordenamento Territorial, Colômbia, 2006.
- [8] DGGE (Direcção Geral de Geologia e Energia), Indústria extractiva, Informação estatística, Ministério da Economia, Portugal, 2004.
- [9] Ribeiro, A.B., Gonçalves, A., Salta, M.M. Influência dos agregados na durabilidade do betão. Congresso Betão Estrutural, LNEC, Lisboa, 2002.
- [10] Aitcin P, Perraton D. Perméabilité du béton de peau, Le choix du granulats peut-il s’avérer un élément plus déterminant que le rapport E/C Bulletin des Laboratoires des ponts et chaussées 2001:59–72.
- [11] Castro-Gomes JP, Pereira de Oliveira LA, Gonilho Pereira CN, Pacheco Torgal F. Absorção e permeabilidade de agregado grossos como parâmetro de avaliação da durabilidade do betão. UBI Engenharias 2001, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2001.
- [12] Gonilho Pereira CN, Castro-Gomes, J.P., Pereira de Oliveira, L.A. Influência de agregados e condições de mistura na durabilidade do betão estrutural, UBI Engenharias 2003, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2003.

- [13] Pacheco Torgal, F., Castro-Gomes, J.P., Lopes, S.M.R. Experimental study of concrete durability parameters produced with different types of aggregates. XXX IAHS World Congress on housing, 9-13 September, Coimbra, Portugal, 2002.
- [14] A. Kiliç, C.D. Atis, A.Teymen, O.Karahan, F.Ozcan, C.Bilim, M.Ozdemir, The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete, *Cement & Concrete Composites* 30 (2008) 290–296.
- [15] ISRM. Suggested method for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: In: Brown Et, editor, *International Society of Rock Mechanics, ISRM suggested methods*. NJ: Pergamon Press; 1981.
- [16] LNEC E393. Betão: determinação de absorção de água por capilaridade, Lisboa; 1993.
- [17] NF B 10-502: Produits de carrières. Pierres calcaires. Méseure de l'absorption de l'eau par capillarité
- [18] DIN 52617: Determination of the water absorption coefficient of construction materials.
- [19] ISRM. Suggested method for determination of the slake durability index, rock characterization testing and monitoring. In: Brown Et, editor, *International Society of Rock Mechanics, ISRM suggested methods*. NJ: Pergamon Press; 1981.
- [20] LNEC E392. Betão: determinação da permeabilidade ao oxigénio, Lisboa, 1993.
- [21] Pacheco Torgal, F. and Castro-Gomes, J.P. Influence of physical and geometrical properties of granite and limestone aggregates on the durability of a C20/25 strength class concrete, *Construction and Building Materials* 20, 2006.
- [22] LNEC E223. Agregados: determinação do índice volumétrico, Lisboa, 1968.
- [23] LNEC E227. Agregados: Ensaio de abrasão Los Angeles, Lisboa, 1970.
- [24] British standard BS812, part 110. Methodos for determination of aggregate crushing value, 1990.
- [25] LNEC E226. Betão: ensaio de compressão, Lisboa, 1968.
- [26] Sousa Coutinho, A. Fabrico e propriedades do betão. LNEC, 3ªEd., Vol I., Lisboa, 1997.
- [27] Metha, P.K. *Concrete: structure, properties and materials*. Englewood: Prentice-Hall; 1986.
- [28] Aitcin P, Perraton D. Perméabilité du béton de peau, Le choix du granulat peut-il savérer un élément plus déterminant que le rapport E/C? *Bulletin des Laboratoires des ponts et chaussées*. 2001:59–72.