

# **Desempenho em termos mecânicos de betões com incorporação de agregados finos provenientes de resíduos da indústria do mármore**

## **Mechanical properties of structural concrete containing fine aggregates from waste generated by the marble quarrying industry**

**Diogo Costa da Silva<sup>1</sup>, Jorge de Brito<sup>2</sup>,**

*<sup>1</sup>Eng.º Civil, Mestre em Engenharia Civil (IST)*

*diogo.silva@ist.utl.pt*

*<sup>2</sup>Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa*

*jb@civil.ist.utl.pt*

**RESUMO:** Com o intuito de estudar o desempenho mecânico de betões incorporando agregados finos provenientes de resíduos da indústria do mármore, produziram-se betões com diferentes taxas de substituição (0, 20, 50 e 100%) de agregados finos primários (areias de rio, basalto e granito) por agregados secundários finos de mármore. Nesse sentido, para o betão no estado fresco, procedeu-se à análise da trabalhabilidade e da massa volúmica. Nas propriedades do betão no estado endurecido, examinou-se a resistência à compressão, a resistência à tração por compressão diametral, o módulo de elasticidade e a resistência ao desgaste por abrasão.

De um modo geral, os betões com agregados secundários demonstraram piores características mecânicas, por comparação com os betões de referência. Esta redução de desempenho é tanto mais acentuada quanto maior a percentagem de substituição de agregados. No entanto, a redução observada é aceitável e não compromete o uso destes agregados secundários em betão estrutural.

**ABSTRACT:** To study the influence on the mechanical properties of concrete containing fine aggregate from the waste generated by the marble quarrying industry several mixes were produced with replacement ratios of 0%, 20%, 50% and 100% of primary fine aggregates (river, basalt and granite sand), by secondary fine marble aggregates. More specifically, the workability and bulk density of fresh concrete were analysed and the compressive strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity and abrasion resistance properties of hardened concrete were examined.

In general, concrete containing secondary aggregates was shown to have worse mechanical properties than the standard concrete. This reduced performance was clearer when the substitution percentage was higher. However, the reduction in mechanical performance is acceptable and does not compromise the use of these secondary aggregates in structural concrete.

### **1. INTRODUÇÃO**

A exploração descontrolada dos recursos naturais, pelo homem tem sido alvo de duras críticas nas últimas décadas. Todos os anos, milhões de toneladas de desperdício de mármore são

acumuladas nas escombreiras dos concelhos de Estremoz, Borba e Vila Viçosa (zona dos mármore) pela indústria extrativa local. Este enorme desperdício ronda 80 a 90% do total da rocha extraída. Assim, impõe-se a criação de destinos sustentáveis para este resíduo que

atenuem ou eliminem a tendência verificada. Neste sentido, estuda-se a utilização de agregados finos provenientes do processamento de resíduos da indústria do mármore na produção de betões estruturais como uma alternativa útil, tanto do ponto de vista da proteção ambiental, como da sustentabilidade das reservas naturais. Não obstante, para que esta alternativa seja amplamente difundida no sector da construção, é necessário assegurar a sua qualidade e segurança, bem como compreender de forma clara o desempenho de betões com agregados finos provenientes do processamento de resíduos da indústria do mármore.

## **2. ENQUADRAMENTO**

Apesar de, neste momento, a bibliografia ser relativamente extensa nesta matéria, a inexperiência em Portugal associada à existência de assuntos menos esclarecidos e outros fracamente abordados, motivou a realização deste estudo.

Ribeiro et al. (2011) inventariaram as escombrelas da zona dos mármore e os cálculos efetuados apresentaram um valor global de quantidade de matéria-prima próximo de 70 milhões de toneladas. A gravidade e dimensão deste problema forçaram uma discussão generalizada sobre os possíveis destinos a dar a estes resíduos.

Ladeira (1977) refere que as suas aplicações são muito numerosas, principalmente na indústria química. Souza et al. (2009) demonstraram que a aplicação de resíduos oriundos do corte do mármore no sector dos polímeros é viável. Bakken et al. (2000) e Van Straaten (2007) referem haver também possibilidade de aplicação de resíduos oriundos do corte de mármore no sector agrícola para correção do pH do solo. No entanto, todos estes possíveis destinos para as escombrelas da zona dos mármore têm um problema, ou seja, não geram consumos em grande escala.

As únicas aplicações que podem levar a um grande consumo deste material são as que se destinam às indústrias da construção civil. Segundo Costa et al. (1991), na década de 90, o LNEC realizou alguns estudos que demonstraram que os desperdícios de mármore possuem boas características físicas e mecânicas confirmando a sua viabilidade na utilização em grandes

empreendimentos da construção civil e obras públicas.

Neste sentido, estudos recentes demonstram que os resíduos de mármore podem ser usados como agregados em betão. Hebhoub et al. (2011) estudaram o uso de agregados provenientes de resíduos de mármore em betão. Os resultados demonstraram que a incorporação de agregados provenientes de resíduos de mármore pode levar a características interessantes em termos de resistência e que o uso de agregados de mármore resultou num aumento significativo nas resistências à compressão e à tração por compressão diametral.

Binici et al. (2007) estudaram algumas propriedades mecânicas de betões incorporando pó de mármore e calcário. Os resultados obtidos revelaram uma melhoria na resistência à compressão e à abrasão.

Martins (2012) efetuou uma investigação onde estudou as propriedades mecânicas de betões incorporando agregados grossos secundários de mármore. Os resultados obtidos apontaram para um decréscimo de todas as características mecânicas analisadas, nomeadamente as resistências à compressão, tração por compressão diametral e abrasão e módulo de elasticidade.

Quanto à trabalhabilidade dos betões com agregados provenientes de resíduos de mármore, a bibliografia parece ser relativamente consensual. Esta propriedade é negativamente afetada pela incorporação destes agregados.

A consulta da bibliografia disponível na área permitiu concluir que a massa volúmica dos betões com incorporação de agregados secundários de mármore não sofre alterações significativas.

## **3. CAMPANHA EXPERIMENTAL**

### **3.1. Materiais**

Os agregados primários são, brita 1 e 2 de origem calcária, areia de basalto, areia de granito e areia de rio de origem calcária. Os agregados secundários são agregados secundários finos provenientes do processamento de resíduos da indústria do mármore. Relativamente ao ligante, foi utilizado um cimento CEM II 42,5 R. A água foi proveniente da rede de abastecimento pública.

### **3.2. Procedimentos**

A caracterização dos agregados foi feita com base nos ensaios normalizados e especificados no Quadro 1 e os resultados destes são apresentados nos Quadros 2 e 3.

O estudo realizado consiste numa análise de viabilidade, efetuada através da realização de ensaios para determinação do comportamento mecânico do betão com incorporação sucessiva de agregados provenientes do processamento dos resíduos da indústria do mármore. Para este efeito, criaram-se 3 betões de referência com agregados grossos naturais e para cada um procedeu-se à substituição de 0, 20, 50 e 100% dos agregados finos de referência por agregados finos provenientes do processamento de resíduos da indústria do mármore (Quadro 4). As percentagens de substituição são feitas em volume.

**Quadro 1 - Ensaios de caracterização dos agregados**

Ensaio	Norma adoptada
Análise granulométrica	NP EN 933-1 (2000) / NP EN 933-2 (1999)
Massas volúmicas e absorção de água	NP EN 1097-6 (2003)
Baridade	NP EN 1097-3 (2000)
Desgaste de <i>Los Angeles</i>	LNEC E 237 (1970)
Índice de forma	NP EN 933-4 (2002)

**Quadro 2 - Resultados dos ensaios aos agregados grossos**

	Brita		Bago de arroz
	2	1	
Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2606	2620	2489
Absorção de água (%)	1.50	1.30	2.84
Massa volúmica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	1363	1356	1354
Desgaste de <i>Los Angeles</i> (%)	26.52	25.45	22.45
Índice de forma (%)	15.3	16.8	18.4

**Quadro 3- Resultados dos ensaios aos agregados finos**

	Areia				
	Rio grossa	Rio fina	Basalto	Granito	Mármore
Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	2600	2523	2820	2467	2684
Absorção de água (%)	0.75	0.20	1.05	0.59	0.14
Massa volúmica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	1542	1526	1838	1560	1784

Os betões produzidos não contêm adições e objetivou-se, para os betões de referência, uma classe de resistência C30/37. Para poder comparar os resultados, tentou-se manter as mesmas condições de trabalhabilidade, definidas *a priori* (S3 - 125 ± 10 mm), em todos os betões produzidos. As composições dos betões de referência, em percentagem relativa à massa total, são apresentadas no Quadro 5.

**Quadro 4 - Betões estudados**

	Agregado fino	Percentagem de substituição (%)
BRB	Areia de basalto	0
BRC	Areia de rio	0
BRG	Areia de granito	0
BB/M20	Areia de basalto	20
BB/M50	Areia de basalto	50
BC/M20	Areia de rio	20
BC/M50	Areia de rio	50
BG/M20	Areia de granito	20
BG/M50	Areia de granito	50
BRM	-	100

**Quadro 5 - Composição dos betões de referência**

	Granulometria	BRB	BRC	BRG
Agregados finos	< 0,063	3,68	2,4	3,02
	0,063	4,62	3,01	3,79
	0,125	6,43	4,19	5,27
	0,25	3,18	2,07	2,61
	0,5	4,37	2,85	3,58
	1	5,18	3,37	4,25
	2	4,8	3,13	3,94
Agregados grossos	4	3,12	2,03	2,56
	Bago de arroz (2-6 mm)	9,55	8,9	16,08
	Brita 1	6,07	10,68	3,57
	Brita 2	23,43	31,15	25,01
	Cimento	17,88	18,34	18,41
	Água	7,69	7,89	7,92

O betão foi produzido, introduzido nos moldes e vibrado (com um vibrador de agulha) segundo os procedimentos normalizados e mantido durante 24 horas na zona de betonagem, ao fim das quais foi transferido para o seu ambiente de cura.

Os métodos usados nos ensaios ao betão fresco e endurecido são apresentados no Quadro 6.

**Quadro 6 - Ensaios adoptados na determinação das propriedades do betão fresco e endurecido**

Ensaio	Norma
<b>Betão fresco</b>	
Abaixamento ( <i>cone de Abrams</i> )	NP EN 12350-2
Massa volúmica	NP EN 12350-6
<b>Betão endurecido</b>	
Resistência à compressão	NP EN 12390-3
Resistência à tracção por compressão diametral	NP EN 12390-6
Módulo de elasticidade	LNEC E 397
Resistência à abrasão	DIN 52108

Para os ensaios de resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias, foram produzidos, respectivamente, 3, 5 e 3 espécimes cúbicos de 150 mm x 150 mm x 150 mm. Para a resistência à tracção por compressão diametral, foram

produzidos 3 provetes cilíndricos com Ø150 mm x 300 mm para ensaiar aos 28 dias. Destes 3 provetes, 2 foram ensaiados, à mesma idade, ao módulo de elasticidade (ensaio não destrutivo): Para a resistência à abrasão, foram produzidos 3 espécimes cúbicos de 100 x 100 x 100 mm, posteriormente cortados, dando origem a 3 provetes de 71 mm x 71 mm x 50 mm.

## 4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1. Ensaio ao betão fresco

#### 4.1.1. Trabalhabilidade

Uma vez que a produção dos betões decorreu integralmente em laboratório, objetivou-se resultados contidos num intervalo mais apertado ( $125 \pm 10$  mm) do que o prescrito pela classe de consistência pretendida (S3 - 100 a 150 mm).

A informação contida na bibliografia relativa a esta matéria, permitiu desde logo compreender que a trabalhabilidade depende da percentagem de agregados substituídos, da dimensão das partículas e da sua geometria. Para controlar esta variável e respeitar a consistência estabelecida, optou-se por apenas afectar a relação A/C. As relações A/C, bem como os resultados do ensaio de abaixamento são apresentados no Quadro 7 e na Figura 1.

Quadro 7 - Abaixamento e relações A/C

	A/C	h (cm)
BRB	0,55	11,3
BB/M20	0,55	14,3
BB/M50	0,56	14,3
BRM	0,54	13,5
BRC	0,49	13,3
BC/M20	0,50	12,7
BC/M50	0,50	13,2
BRG	0,54	12,7
BG/M20	0,55	11,6
BG/M50	0,56	13,0

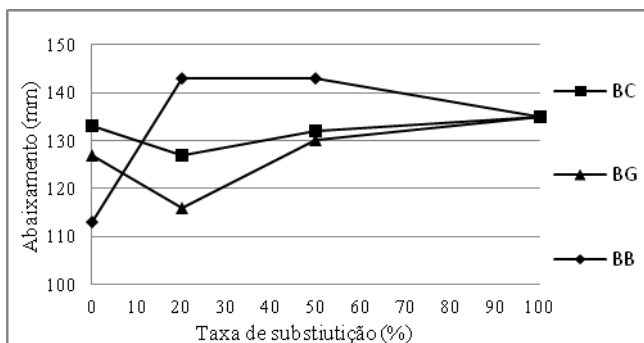


Figura 1- Resultados do ensaio de abaixamento

Observa-se que, com o aumento da taxa de substituição, a relação A/C tende a aumentar na família de betões BC; nas famílias de betões BB e BG a relação A/C mantém-se aproximadamente constante. A tendência lógica seria a relação A/C baixar com agregados caracterizados por absorções de água menores, como é o caso dos agregados de mármore e de calcário. De facto, observa-se que as relações A/C necessárias para garantir a trabalhabilidade pré-definida nos betões da família BC são mais baixas. No entanto, sendo os agregados de mármore os que apresentaram absorção de água mais baixa, a sua crescente incorporação devia resultar numa diminuição da relação A/C, o que não se verifica. Esta situação poderia ser explicada pela geometria das partículas de mármore, característica que não foi alvo de estudo nesta dissertação. No entanto, a inspeção macroscópica das partículas de mármore revelou serem alongadas e especialmente angulosas, semelhantes às partículas de granito. De um modo geral, a incorporação de agregados secundários de mármore resultou num ligeiro aumento da relação A/C.

Concluiu-se que a trabalhabilidade é afetada pelo aumento da taxa de substituição de agregados, podendo-se afirmar que os resultados obtidos estão de acordo com os restantes estudos. Belachia e Hebhouh (2011) concluíram que, de modo a manter a trabalhabilidade, é necessário aumentar a relação A/C à medida que aumenta a taxa de substituição de agregados. A mesma conclusão foi retirada por Hebhouh et al. (2011) e por Binici et al. (2007).

#### 4.1.2. Densidade do betão fresco

No Quadro 8, são apresentados os resultados obtidos para as massas volúmicas dos betões.

Quadro 8 - Massa volúmica do betão no estado fresco

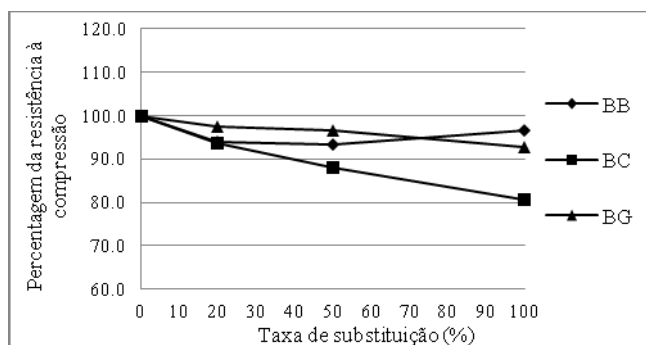
	Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )
BRB	2412,5
BB/M20	2389,5
BB/M50	2385,2
BRM	2387,6
BRC	2356,4
BC/M20	2381,7
BC/M50	2384,2
BRG	2361,6
BG/M20	2360,4
BG/M50	2381,1

O Quadro 8 permite confirmar a baixa influência que a incorporação de agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore tem na massa volúmica do betão no estado fresco. Atribui-se a razão desta observação ao facto de as massas volúmicas dos agregados primários finos serem próximas das dos agregados secundários.

## 4.2. Ensaio ao betão endurecido

### 4.2.1. Resistência à compressão

Para compreender a influência da percentagem de substituição de agregados na resistência à compressão do betão, aos 7 dias, procede-se à apresentação dos resultados experimentais na Figura 2. Os betões de referência (BRB, BRC e BRG), para esta propriedade, registam valores médios de 38,1, 45,6 e 39,6 MPa respectivamente. Este dado possibilita a determinação, pela referida figura, de qualquer outro valor.

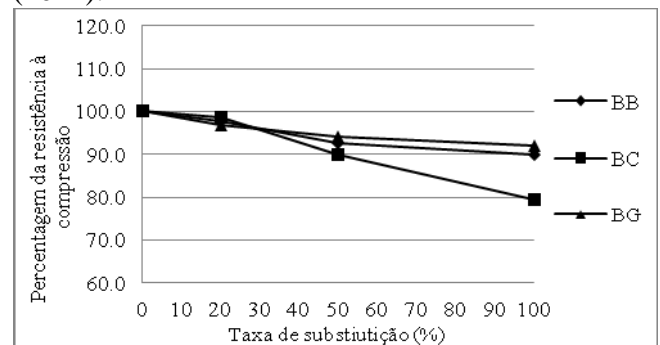


**Figura 2 - Perda relativa de resistência à compressão para o betão de referência (7 dias)**

Analisando a Figura 2, pode-se concluir que a incorporação de agregados secundários resulta numa diminuição da resistência à compressão de todas as famílias. A descida mais acentuada observou-se na família de betões BC, onde houve uma perda de resistência de 19% na taxa de substituição de 100%.

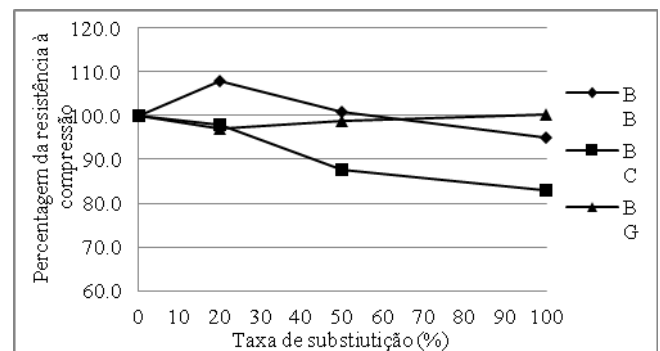
Para compreender a influência da percentagem de substituição de agregados na resistência à compressão do betão, aos 28 dias, procede-se à apresentação dos resultados experimentais na Figura 3. Os betões de referência (BRB, BRC e BRG), para esta propriedade, registam valores médios de 50,4, 56,9 e 49,2 MPa respectivamente. Este dado possibilita a determinação, pela referida figura, de qualquer outro valor.

A Figura 3 permite concluir que a resistência à compressão diminui com o aumento da taxa de substituição. Foi concluído que a relação A/C aumenta com a percentagem de substituição de agregados. Uma maior relação A/C implica a inclusão de mais água na amassadura o que vai ter um efeito negativo nas resistências. Deste modo, a principal razão para a redução na resistência à compressão é a relação A/C. Esta conclusão foi também apresentada por Belachia e Hebhouh (2011).



**Figura 3 - Perda relativa de resistência à compressão para o betão de referência (28 dias)**

Aos 56 dias os betões de referência (BRB, BRC e BRG), para esta propriedade, registam valores médios de 54,2, 62,0 e 51,3 MPa respectivamente. Este dado possibilita a determinação, através da Figura 4, de qualquer outro valor.

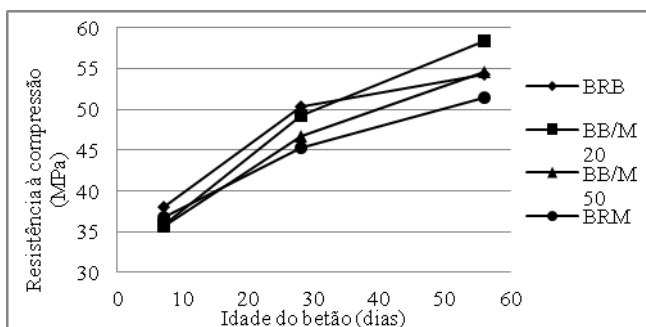


**Figura 4 - Perda relativa de resistência à compressão para o betão de referência (56 dias)**

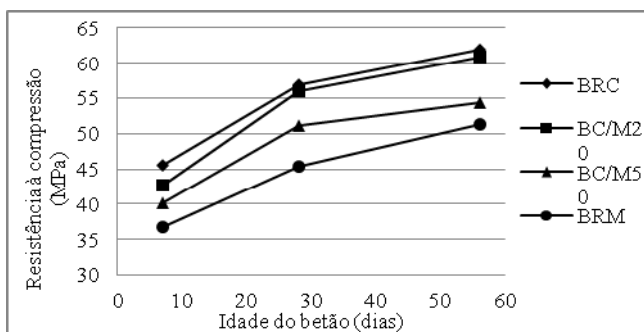
A Figura 4 permite concluir que a família de betões BC continua a seguir a tendência observada aos 7 e 28 dias de cura, observando-se um decréscimo de resistência de 18% para a taxa de substituição de agregados de 100%. Nas famílias BB e BG, registaram-se alterações no comportamento face à incorporação de agregados secundários. Na família BG, observou-se uma baixa influência da incorporação de agregados secundários na resistência à compressão, sendo a

resistência do betão de referência de granito (BRG) igual à do betão com 100% de agregados finos secundários (BRM).

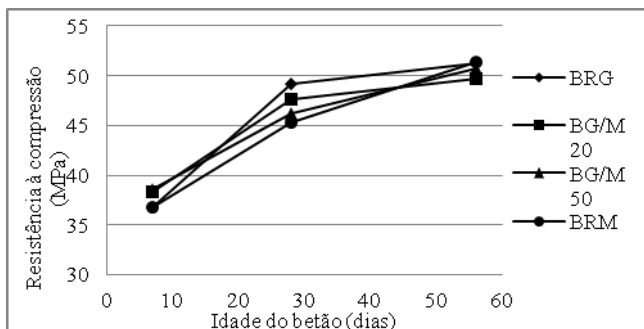
Seguidamente, apresenta-se a evolução da resistência à compressão de todas as misturas. A Figura 5 é referente à família de betões BB e as Figuras 6 e 7 à família BC e BG, respectivamente. A observação dessas figuras permite sustentar que a evolução da resistência à compressão de betões com agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore segue um comportamento idêntico à dos betões convencionais, ou seja, para idades jovens, o acréscimo de resistência é substancialmente maior do que para idades posteriores.



**Figura 5 - Evolução da resistência à compressão da família BB**



**Figura 6 - Evolução da resistência à compressão da família BC**

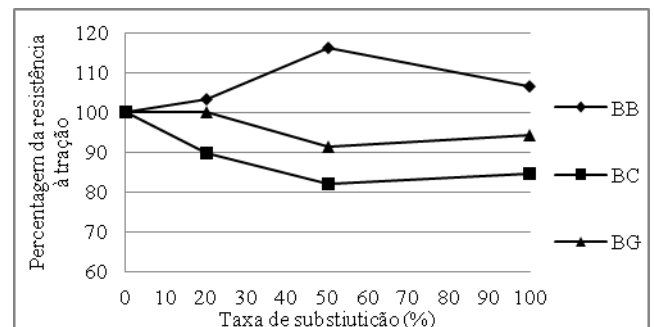


**Figura 7 - Evolução da resistência à compressão da família BG**

Analisando as Figuras 5, 6 e 7, pode-se concluir que, de um modo geral, a resistência à compressão diminui com o aumento da taxa de substituição de agregados primários finos por agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore. No entanto, as conclusões tiradas das Figuras 2, 3 e 4 permitem afirmar que o decréscimo de resistência é pouco significativo. A família de betões BC é a única que apresenta uma diminuição da resistência à compressão considerável. Esta tendência atribui-se a um dos parâmetros que mais influencia a resistência à compressão dos betões, a sua relação A/C.

#### 4.2.2. Resistência tração por compressão diametral

Para compreender a influência da percentagem de substituição na resistência à tração por compressão diametral, são apresentados os resultados deste ensaio na Figura 8. Para determinar resultados em valor absoluto, esta grandeza, para os betões de referência (BRB, BRC e BRG), toma os valores de 3.5, 4.4 e 3.9 MPa, respectivamente.



**Figura 8 - Perda relativa de resistência à tração para o**

Identicamente à tendência expressa na resistência à compressão aos 28 dias, observa-se nas famílias BC e BG uma redução de desempenho, para qualquer padrão de substituição, com o aumento da taxa de substituição de agregados. As razões que fundamentam este comportamento (o aumento da relação A/C com a taxa de substituição) encontram completo paralelismo nas que justificam a perda de resistência à compressão. No entanto, a família BB apresenta um aumento de resistência, contrariamente à tendência seguida pelas duas restantes famílias e aos resultados observados no ensaio de resistência à compressão aos 28 dias de cura. Esta tendência é explicada pelo facto de, no processo do ensaio, a carga ser aplicada segundo um plano, ou seja, a força aplicada pela peça de

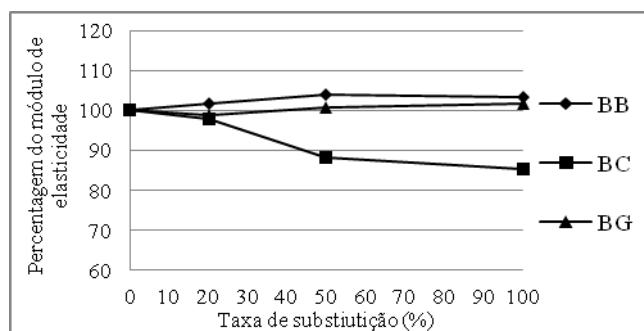
carga será distribuída por uma secção transversal do provete. Deste modo, devido à geometria lamelar das partículas de basalto, vão formar-se, na referida superfície, zonas mais fracas o que dá origem a uma rotura precoce, por tração, no caso do betão com agregados finos de basalto. Esta tendência pode ter sido ampliada pela menor força intermolecular entre a pasta cimentícia e os agregados de basalto (ligações de Van der Waals). Contrariamente, no ensaio de resistência à compressão a força é aplicada e distribuída numa superfície superior e, portanto, afetando um número estatisticamente superior de partículas. Para a resistência à compressão da ordem de grandeza das obtidas nesta dissertação, a superfície de rotura atravessa as partículas; como as partículas de basalto são mais resistentes, a resistência à compressão do betão é maior do que quando são substituídas por partículas de mármore.

Belachia e Hebhouh (2011), no seu estudo, concluíram que a resistência à tração baixa com a percentagem de substituição de agregados e aumenta com o decréscimo da relação A/C, conclusões também alcançadas no presente estudo

Aruntas et al. (2010) chegaram a conclusões semelhantes, isto é, a incorporação de agregados finos secundários resulta numa ligeira diminuição da resistência à tração.

#### 4.2.3. Módulo de elasticidade

A perda relativa do módulo de elasticidade de todas as composições, para os betões de referência, encontra-se na Figura 9. Para determinar o valor absoluto desta grandeza, os betões de referência (BRB, BRC e BRG), registaram 32.0, 38.8, and 32.5 GPa, respectivamente.



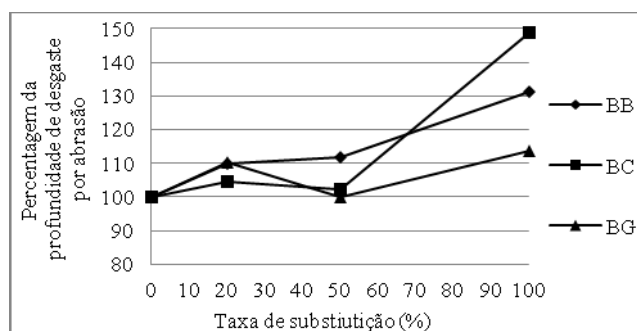
**Figura 9 - Redução do módulo de elasticidade para o betão de referência aos 28 dias**

A observação da Figura 9 mostra que não há alterações significativas nos valores do módulo de

elasticidade com o aumento da percentagem de substituição de agregados. As famílias BB e BG demonstram valores praticamente constantes em todas as taxas de substituição. A família BC é a única que regista uma variação (14.5% na taxa de substituição de 100%).

#### 4.2.4. Resistência à abrasão

Os resultados do ensaio de resistência à abrasão são apresentados na Figura 10. Nesta propriedade, os betões de referência (BRB, BRC e BRG) registaram uma profundidade de perda por abrasão de 5.1, 4.5 e 5.9 mm, respectivamente.



**Figura 10 - Profundidade de desgaste para o betão de referência aos 91 dias**

Segundo a Figura 10, a incorporação de agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore tem uma influência negativa na resistência à abrasão. Observou-se em todos os betões uma diminuição da resistência à abrasão, representada pela maior profundidade de desgaste. Para as taxas de substituição de 20 e 50%, os betões apresentaram perdas de resistência de 0.5 a 10%. Os betões incorporando apenas agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore apresentaram um mau comportamento ao desgaste, registando-se uma perda de 50% no caso mais gravoso. Este decréscimo é devido ao comportamento do mármore face ao desgaste relativamente aos restantes agregados principais, a sua incorporação no betão em substituição dos agregados principais resulta numa diminuição da resistência à abrasão.

No ensaio de resistência à abrasão, os provetes são submetidos a 4 séries de 88 rotações no disco metálico. Entre cada uma destas séries, foi registada a massa do provete de modo a ser comparada com a inicial. Deste modo, apresenta-se nas Figuras 11, 12 e 13 a perda de massa relativa à

massa inicial em função do número de rotações do disco para as várias famílias de betões.

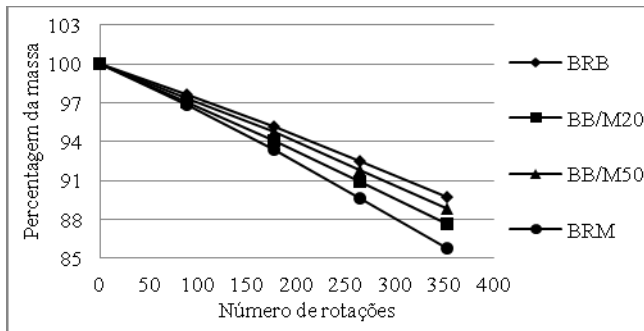


Figura 11 - Percentagem da massa da família BB aos 91 dias

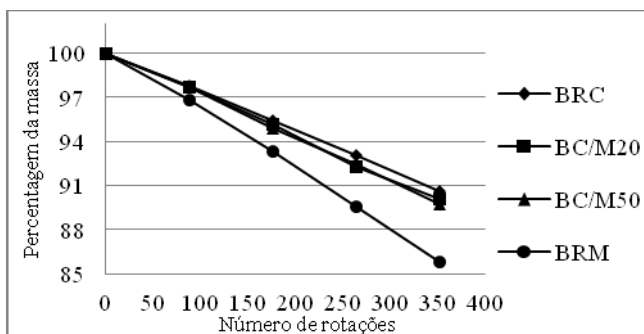


Figura 12 - Percentagem da massa da família BC aos 91 dias

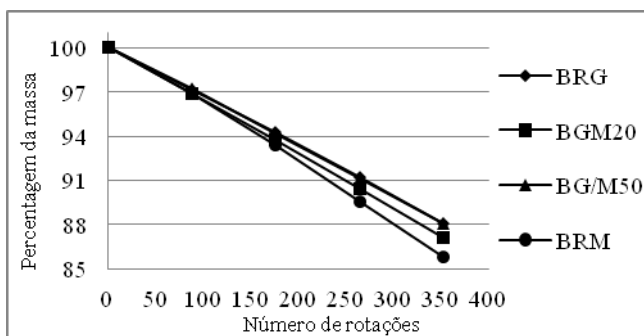


Figura 13 - Percentagem da massa da família BG aos 91 dias

A análise das Figuras 11, 12 e 13 vem confirmar a conclusão referida, isto é, a taxa de substituição de agregados prejudica a resistência à abrasão. Se se observar as figuras, facilmente se conclui que os betões que mais perdem massa com o número de ciclos são os com uma taxa de substituição de 100%, ou seja, o BRM.

As conclusões alcançadas neste estudo foram também atingidas por Binici et al. (2008) e por Martins (2012), ou seja, a incorporação de agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore tem uma influência negativa na resistência à abrasão.

## 5. CONCLUSÕES

Neste estudo, foi analisado o desempenho mecânico de betões estruturais com agregados finos provenientes do processamento de resíduos da indústria do mármore. Após a sua realização, é possível tirar as seguintes conclusões:

- o aumento da percentagem de agregados secundários afecta negativamente a trabalhabilidade; observou-se que a relação A/C tem tendência a aumentar com a taxa de incorporação de agregados secundários de mármore e que esta propriedade tem uma grande influência na resistência do betão no estado endurecido;

- a massa volúmica do betão no estado fresco não apresenta uma variação significativa com a inclusão de agregados finos secundários; no entanto, a variação observada respeita a ordem de grandeza das massas volúmicas dos agregados finos usados nas composições;

- na resistência à compressão, concluiu-se que: de um modo geral, há um decréscimo na resistência dos betões à medida que a percentagem de substituição de agregados finos primários por agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore aumenta; a diminuição de resistência mais acentuada foi observada na família de betões BC, devendo-se este resultado ao baixo valor da relação A/C do betão de referência de calcário (BRC) em comparação com o valor da relação para a taxa de substituição de agregados de 100% (BRM);

- no que respeita à resistência à tração por compressão diametral, observou-se uma ligeira descida na resistência com o aumento da percentagem de substituição de agregados nas famílias BC e BG; concluiu-se que a família BB apresenta uma tendência contrária às restantes, resultados que se atribuem principalmente à geometria das partículas de areia de basalto e à sua pior ligação intermolecular com a pasta de cimento;

- os resultados obtidos para o módulo de elasticidade demonstram que não há uma variação significativa com a percentagem de substituição para as famílias BB e BG; a família BC apresentou uma descida significativa, principalmente devido à sua baixa relação A/C;

- a partir dos resultados da resistência à abrasão, concluiu-se que: a resistência à abrasão diminui com a incorporação de agregados finos produzidos



a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore; a maior perda de resistência registrada foi de 50%, para o caso da taxa de substituição de 100% na família BC; a principal razão para a diminuição da resistência à abrasão é a diferença da resistência ao desgaste dos agregados primários para os agregados secundários.

De um modo geral, a incorporação de agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore no betão apresentou resultados satisfatórios. Observou-se um decréscimo ligeiro nas propriedades mecânicas do betão, nomeadamente para as taxas de substituição mais elevadas. Os resultados obtidos neste estudo, de um modo geral, encontraram paralelismo com os obtidos pelos investigadores estudados, o que vem reforçar as conclusões por eles retiradas. Conclui-se que a incorporação de agregados finos produzidos a partir de resíduos provenientes da indústria do mármore não compromete as características mecânicas e que portanto podem ser usados como agregados finos em betões estruturais. Contudo, de modo a obter perdas de resistência de, no máximo 17%, aconselha-se a usar percentagens de substituição até 50%.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos técnicos do Laboratório de Construção e Resistência de Materiais do IST, Sr. Leonel Silva, Sr. Fernando Costa, Sr. Fernando Alves e Sr. João Lopes, aos colegas investigadores Filipe Gameiro e Miguel Bravo, pela importante colaboração e disponibilidade durante o trabalho experimental. Agradecem ainda ao ICIST (Instituto de Engenharia de Estruturas, território e Construção), ao IST, à Universidade Técnica de Lisboa e à FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia).

## 7. REFERÊNCIAS

ARUNTAS, H.Y., GURU, M., DAYI, M., TEKIN, I. (2010) - Utilization of waste marble dust as an additive in cement production. *Materials and Design*, Volume 31, Issue 8, pp. 4039-4042.

BAKEN, A.K., GAUTNEB, H., SVEISTRUP, MYHR, K., (2000) - Crushed rocks and mine tailings applied as K fertilizers on grassland. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, Volume 56, Issue 1, pp. 53-57.

BELACHIA, M., HEBHOUB, H. (2011) - Use of the marble wastes in the hydraulic concrete. 6<sup>th</sup> International Advanced Technologies Symposium, Elazig, Turkey.

BINICI, H., KAPLAN, H., YILMAZ, S. (2007) - Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete. *Scientific Research and Essay*, Volume 2, Issue 9, pp. 372-379.

COSTA, C., PINELO, A. e RODRIGUES, J.D. (1991) - Caracterização das escombrelas das explorações de mármore da região de Estremoz, Borba e Vila Viçosa. Relatório 246/91 - NPR/GERO, LNEC.

HEBHOUB H., AOUN H., BELACHIA M., HOUARI H., GHORBEL E. (2011) - Use of waste marble aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 25, Issue 3, pp. 1167-1171.

MARTINS, P. (2012) - Desempenho mecânico de betões com incorporação de agregados grossos de resíduos da indústria do mármore. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

LADEIRA, F.L. (1977) - Mármore. *Bol. Minas, D.G.M.S.G.*, Vol. 14, nº4, pp. 195-199

RIBEIRO, T. (2011) - Valorização de escombrelas da indústria extrativa de mármore no Alentejo. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geológica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa.

SOUZA, L. R., RIBEIRO, R.C.C., CARRISO, R.C.C., SILVA, L.P., PACHECO, E.B.A.V. e VISCONTE, L.L.Y. (2009) - Aplicação de resíduos de mármore na indústria polimérica. *Série Tecnologia Ambiental*, Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro.

VAN STRAATEN, P., AGROGEOLOGY (2007) - The use of rocks for crops. University of Guelph.