

HAC2018 | V Congresso Ibero-americano sobre Betão Auto-compactável e Betões Especiais

Valência, 5 e 6 de Março de 2018

Betão auto-compactável com incorporação de resíduo de mármore

A. Destefani ⁽¹⁾, S. Nunes ⁽²⁾ e J. Sousa-Coutinho ⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Construção Civil, Instituto Federal Fluminense, Rio de Janeiro, Brasil.

⁽²⁾ Departamento de Engenharia Civil, CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5484>

RESUMO

O setor da construção civil é responsável por um grande consumo de matérias-primas e pela intensa geração de resíduos, e vem trabalhando na criação de procedimentos e produtos, buscando cada vez mais a sustentabilidade. O betão auto-compactável (BAC) permite a produção de um material mais “verde”, por exemplo, através do reaproveitamento de resíduos industriais. No presente trabalho desenvolveu-se um programa experimental visando a otimização de composições de BAC com incorporação do resíduo do beneficiamento de mármore, da região do Alentejo em Portugal, conhecida como Zona do Mármore. O programa experimental foi realizado segundo um plano fatorial ao nível do betão, fixando a composição da pasta, para otimizar o esqueleto sólido formado pelos agregados. Os resultados obtidos permitiram concluir que é possível substituir cimento por pó de mármore sem afetar significativamente as propriedades de autocompactabilidade e assim conseguir composições de BAC de mais baixa resistência e mais eco-eficientes, adequadas a uma grande variedade de aplicações de betão estrutural.

PALAVRAS-CHAVE: betão auto-compactável, pó de mármore, sustentabilidade.

1.- INTRODUÇÃO

O betão auto-compactável (BAC) necessita na sua composição de materiais que sejam capazes de garantir elevada fluidez e coesão moderada. Para garantir a elevada fluidez é indispensável o uso de um adjuvante superplastificante. Para alcançar a viscosidade necessária, que garanta a resistência à segregação, pode recorrer-se ao uso de adjuvantes modificadores de viscosidade e/ou adições minerais. As adições minerais juntamente com o cimento, formando os chamados finos do betão, quando usados em proporções adequadas, são capazes de proporcionar a viscosidade e a coesão necessária. A incorporação de materiais finos, para além do cimento, podem ajudar a melhorar as propriedades reológicas do BAC, através da melhoria do empacotamento das partículas, melhorando também algumas propriedades no estado endurecido [1].

Hoje em dia, a reutilização de resíduos de construção ou outros resíduos industriais é um dos objetivos mais importantes para a indústria da construção civil [2]. Os métodos utilizados para reciclar e reutilizar resíduos industriais devem ser investigados a fim de se passar a consumir os recursos naturais de forma mais eficaz. Para além disso, a conversão de materiais reutilizados ou resíduos em matérias-primas, proporciona uma economia de energia significativa através da redução do número de processos industriais na produção dos materiais e fortalece a competitividade do fabricante no mercado [3]. Nos últimos anos, no LABEST/CONSTRUCT, têm sido realizados vários estudos no âmbito da substituição parcial de cimento por resíduos de diversas indústrias [4].

A União Europeia é um dos principais contribuintes para a produção total mundial de rochas ornamentais, com mais de 30% do volume total. Essa produção provém sobretudo de França, Alemanha, Grécia, Itália, Portugal e Espanha, representando cerca de 90% da produção total da UE. A indústria das pedras naturais pode ser dividida em dois subsectores: o da extração e o da transformação. Estes têm como matéria-prima vários tipos de rochas que englobam as pedras calcárias (calcários e mármore), as siliciosas (granitos e rochas afins), as lousas ou ardósias e os xistos, estes últimos em menor quantidade e praticamente sem peso económico [5]. Em Portugal, a região mais importante de exploração de rochas ornamentais (exploração em relação ao número de pedreiras e volume de matérias-primas extraídas) é chamada de Zona do Mármore e que representa, a nível nacional, 40% da produção de rochas ornamentais calcárias e 99% dos mármore portugueses. A Zona do Mármore está localizada no Alentejo Central e abrange os concelhos de Alandroal, Borba, Estremoz e Vila Viçosa, distritos de Évora [6].

Em pedreiras de mármore, as rochas são inicialmente cortadas em grandes blocos que, posteriormente, são movidos para as unidades de processamento. Nessas unidades, os blocos com 15-20 toneladas são cortados no tamanho de azulejos decorativos e depois polidos. Durante o processo de corte, o pó de mármore e água misturam-se e transformam-se em resíduo de lama de mármore. Durante o processo de corte 20-30% do bloco de mármore é transformado em pó. Estes tipos de resíduos sólidos devem ser inativados adequadamente para não poluírem o meio ambiente. O método de inativação mais adequado, hoje em dia, é a reciclagem [7]. A composição química das lamas de mármore permitem classificá-las como resíduos inertes de acordo com a Diretiva Europeia 2003/33/CE devido à sua composição ser basicamente de partículas minerais (calcita, dolomita, vestígios de componentes de quartzo, micas, feldspatos, e minerais argilosos) com quantidades mínimas de flocculantes e restos de resinas. Estas lamas têm características semelhantes aos fileres usados por outros setores industriais, como é o caso do setor da construção civil. Assim, a reutilização de resíduos de lama de mármore em BAC pode proporcionar uma oportunidade de obter ganhos ambientais e económicos [8].

2.- PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1.- Materiais

Os betões investigados neste estudo foram produzidos com cimento Portland CEM I 42.5R, que cumpre os requisitos da norma NP EN 197-1:2012, pó de mármore (resíduo da

indústria extrativa do mármore), duas areias naturais siliciosas (areias fina e média), agregado grosso (brita calcária) (1-12,5 mm), água e superplastificante à base de policarboxilatos (massa específica de 1,05 g/cm³ e teor de sólidos de 26%). A massa volúmica da areia fina, areia média e agregado grosso é de 2,66, 2,66 e 2,63 g/cm³, respectivamente. O pó de mármore foi fornecido pelo Centro Tecnológico da Pedra Natural de Portugal (CEVALOR) e não sofreu qualquer tipo de tratamento, tendo sido realizada apenas a secagem e desagregação das partículas. As propriedades químicas e físicas do cimento Portland e pó de mármore estão apresentados no Quadro 1. A distribuição granulométrica dos materiais finos (cimento Portland e pó de mármore) e dos agregados são apresentados na Fig.1.

Quadro 1. Análise química e física do cimento e pó de mármore

<i>Análise química</i>	<i>CEM 42,5R</i>	<i>Pó de mármore</i>
SiO ₂	20,43	1,51
Al ₂ O ₃	4,58	0,53
Fe ₂ O ₃	3,34	0,17
CaO	62,58	53,93
MgO	1,94	0,65
SO ₃	3,22	<0,10
Na ₂ O ₃	0,23	<0,20
K ₂ O	0,84	0,10
CI	0,08	<0,02
Perda ao fogo (%)	2,09	43,12
Fcm, argamassa (MPa)		
7 dias	46,7	
28 dias	58,3	
Massa volúmica (kg/m ³)	3080	2700

Observa-se no Quadro 1 que a composição química do pó de mármore tem como constituinte principal o óxido de cálcio (CaO) e pequena concentração de óxido de magnésio (MgO), o que é característico de rochas carbonatadas. O cimento Portland e o pó de mármore apresentam uma distribuição granulométrica muito semelhante (Figura 1).

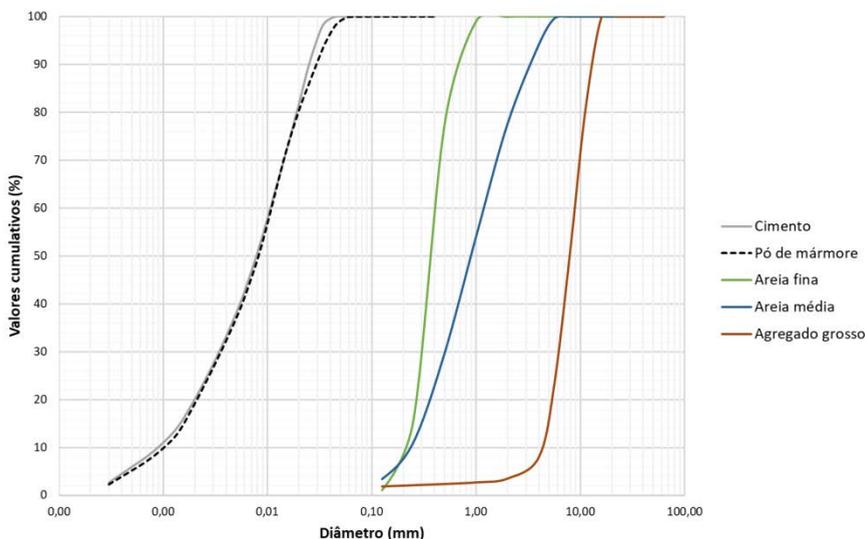


Figura 1. Distribuição granulométrica dos materiais

2.2.- Desenvolvimento das misturas

A composição do betão, em termos de volume, por metro cúbico, é dada pela seguinte equação

$$V_s + V_g + V_p + V_w + V_a = 1,0 \text{ m}^3 \quad (1)$$

onde V_s é o volume de areia, V_g o volume de agregado grosso, V_p o volume de finos, V_w é o volume de água e V_a o volume de ar. No presente trabalho estabeleceu-se um programa experimental considerando como variáveis independentes os parâmetros da mistura identificados como relevantes nos estudos iniciais de Okamura et al. [9].

Assim, numa primeira fase do trabalho desenvolveu-se um estudo ao nível da argamassa, segundo um plano fatorial [10], para estudar o efeito da: razão volumétrica água/finos (V_w/V_p); razão água/cimento, em massa (w/c); razão superplastificante/total de finos, em massa (Sp/p); e razão volumétrica areia/argamassa (V_s/V_m). A partir dos modelos de regressão obtidos e utilizando técnicas de otimização numérica, foi possível determinar a gama de parâmetros da mistura onde a deformabilidade e a viscosidade coexistem de uma forma equilibrada, assegurando a autocompactabilidade das argamassas. Concluiu-se que com a incorporação de pó de mármore é possível encontrar uma grande variedade de soluções ótimas para BAC, numa gama alargada de resistências. De entre estas seleccionaram-se 3 soluções (A, B e C) que serviram de base para o estudo a realizar ao nível do betão. Tal como se pode observar no Quadro 2, estas três composições apresentam o mesmo conteúdo em agregado ($V_s/V_m = 0,487$), um comportamento muito semelhante no estado fresco, mas diferentes resultados de resistência à compressão e resistividade, avaliadas aos 28 dias ($f_{cm,28d}$ e $Resist_{28d}$, respectivamente). Observa-se também que à

medida que w/c aumenta a relação pó de marmore sobre o total de finos (cimento + pó de mármore) aumenta, ou seja, pode substituir-se cimento por pó de marmore sem afetar significativamente as propriedades de autocompactabilidade.

Quadro 2. Valores dos parâmetros da mistura e resultados dos ensaios da argamassa [10]

Composição	A	B	C
<i>Parâmetros mistura:</i>			
V_w/V_p	0,876	0,840	0,814
w/c	0,35	0,40	0,45
S_p/p	1,23%	1,23%	1,21%
V_s/V_m	0,487	0,487	0,487
$M/(c+M)$ (%)	17%	29%	38%
<i>Resultado ensaios (previsto/medido)</i>			
Desp (mm)	259/263	260/261	260/260
Tfunil (s)	9,4/10,1	9,9/11,0	10,0/12,0
Resist,28d (Ohm.m)	52,4/52,8	48,4/48,8	43,6/49,7
fcm,28d (MPa)	75,3/72,2	68,9/63,0	62.4/59,0

A composição do BAC pode ser obtida fixando a composição da pasta, determinada a partir de uma das argamassas otimizadas, e substituindo a areia normalizada pelos agregados reais. No entanto, é necessário realizar alguns ensaios ao nível do betão para ajustar o conteúdo em agregados e a proporção entre eles. O estudo ao nível do betão foi também conduzido segundo um plano factorial aumentado, considerando como variáveis apenas as referentes ao esqueleto sólido formado pelos agregados, nomeadamente, a razão volumétrica areia/argamassa (V_s/V_m) e a razão entre o volume de agregado grosso/ volume máximo de agregado grosso que é possível incluir em 1 m³, no estado compactado, ($V_g/V_{g,lim}$). Como neste caso se utilizou uma mistura de duas areias como agregado fino, a relação entre areia fina/areia grossa foi definida previamente, de modo a reduzir o número de experiências ao nível do betão. Verificou-se experimentalmente que a mistura de areias que conduz à máxima densidade de empacotamento consiste em: 20% areia fina+80% areia média, tendo sido esta a relação adotada no presente estudo. Assim, para o estudo ao nível do betão adotou-se um plano factorial completo 2², aumentado com 4 misturas axiais e 4 misturas centrais, tal como indicado no Quadro 3. A composição da pasta manteve-se fixa, sendo definida com base nos parâmetros da argamassa otimizada B (ver Quadro 2) e o conteúdo em ar foi fixado em 2%.

Quadro 3. Plano experimental e resultados dos ensaios do estudo ao nível do betão

Ref.	Variáveis independentes		Resultados dos ensaios					
	Vs/Vm	Vg/Vglim	Desp (mm)	T500 (s)	Tfunil (s)	DespJ (mm)	T500J (s)	PJ (mm)
F1	0,440	0,515	709,5	1,63	7,84	661,0	2,88	14,5
F2	0,440	0,585	658,0	2,54	9,38	618,0	3,03	20,0
F3	0,510	0,515	575,5	2,81	10,16	524,0	5,4	29,2
F4	0,510	0,585	494,0	5,1	23,97	429,5	*	45,8
CC1	0,475	0,501	663,5	1,97	9,38	635,0	2,65	19,0
CC2	0,475	0,599	554,0	3,31	14,16	480,0	7,97	36,0
CC3	0,426	0,550	709,5	1,59	8,34	685,5	2,28	16,5
CC4	0,524	0,550	515,5	4,5	12,94	450,5	*	29,5
C1	0,475	0,550	672,0	2,5	11,35	613,5	3,66	26,0
C2	0,475	0,550	633,5	2,16	8,43	610,0	2,75	24,0
C3	0,475	0,550	628,5	2,06	10,37	573,0	4,03	23,5
C4	0,475	0,550	640,0	2,03	9,53	596,0	4,31	20,5

(*) não foi alcançado o diâmetro de 500 mm

Dado que a composição da pasta se manteve fixa, e que se pretendia otimizar o esqueleto sólido formado pelos agregados de forma a assegurar a autocompactabilidade, nesta fase caracterizaram-se apenas as propriedades no estado fresco através dos ensaios de espalhamento, escoamento no funil V e espalhamento no anel J, realizados segundo as normas EN 12350-8:2010, EN 12350-9: 2010 e EN 12350-12: 10, respetivamente. No Quadro 3 apresentam-se os resultados do diâmetro de espalhamento sem anel-J (Desp) e com anel-J (DespJ); do tempo que o betão demora a escoar até ao diâmetro de 500mm sem anel-J (T500) e com anel J (T500J); do tempo de escoamento no funil V (Tfunil) e da capacidade de passagem no anel J (PJ). O anel-J usado nestes ensaios dispõe de 16 varões (o mais exigente), sendo que da análise dos resultados obtidos para PJ verifica-se que nenhuma das misturas satisfaz o critério da norma EN 206-9:2010 para a classe PJ2, ou seja, $PJ \leq 10\text{mm}$. Assim, não será possível usar os resultados deste ensaio para distinguir as misturas estudadas e, por isso, foram selecionadas apenas as variáveis Desp, T500 e Tfunil para o ajuste de modelos numéricos.

O ajuste de modelos numéricos foi realizado através de uma análise de regressão multilinear e análise de variância (ANOVA); à qual se seguiu a validação dos modelos através da análise dos resíduos procurando tendências, evidências de autocorrelação ou “outliers”. Uma descrição mais detalhada destes procedimentos pode ser encontrada em [11]. Os modelos obtidos são apresentados no Quadro 4, onde se pode observar que Vs/Vm foi a variável com maior influência nas propriedades do estado fresco. Com recurso aos modelos numéricos foi possível determinar a região ótima para o BAC da classe SF2+VS2/VF2, ou seja, que satisfazem: $650\text{ mm} < \text{Desp} \leq 750\text{ mm}$; $9\text{ s} \leq \text{Tfunil} \leq 25\text{ s}$ e T500

≥ 2 s (ver Figura 4). De entre estas escolheu-se para composição final aquela que maximiza o conteúdo total em agregados (V_s+V_g), e que corresponde a $V_g/V_{glim}=0,525$ e $V_s/V_m=0,423$. Esta composição corresponde à composição BAC-B apresentada no Quadro 5.

Mantendo inalterado o esqueleto sólido formado pelos agregados, é possível alterar a composição da pasta e manter as propriedades do betão no estado fresco desde que a nova pasta apresente propriedades reológicas semelhantes à inicial, ou de outro modo, que conduza a argamassas com comportamento semelhante no estado fresco. Esta hipótese foi testada substituindo os parâmetros que definem a pasta da composição B pelos das composições A e C (ver Quadros 2 e 5), dando origem às composições BAC-A e BAC-C.

Quadro 4. Modelos numéricos ajustados (valores codificados das variáveis independentes)

<i>Variável de resposta:</i>	<i>Desp (mm)</i>	<i>T500(s)</i>	<i>(T_{funil})^{-2.19} (s)</i>
Termos do modelo			
independente	643,500	2,188	$6,40 \times 10^{-3}$
V_g/V_{glim}	-35,982	0,637	$-1,89 \times 10^{-3}$
V_s/V_m	-71,545	0,982	$-2,45 \times 10^{-3}$
$(V_s/V_m) \times (V_g/V_{glim})$	NS	0,345	NS
$(V_g/V_{glim})^2$	-17,719	0,271	NS
$(V_s/V_m)^2$	-15,844	0,473	NS
Parcela do erro,			
desvio padrão	11,708	0,198	$1,26 \times 10^{-3}$
R^2 / R^2_{ajus}	0,973/0,956	0,968/0,941	0,814/0,773

2.3.- Caracterização das misturas

A influência das características da pasta nas propriedades das três composições de BAC propostas foi avaliada através do ensaio de espalhamento, no estado fresco; e de ensaios de resistividade (Wenner method), resistência à compressão (NP EN 12390-3-2011), módulo de elasticidade (DIN 1048-1991 parte 5), resistência à penetração de cloretos (LNEC E 463-2004) e carbonatação (LNEC E 391-1993), no estado endurecido. A partir dos resultados no estado fresco pode verificar-se que as composições BAC-B e BAC-C satisfazem os critérios das classes SF2+VS2, tal como esperado. A composição BAC-A, apesar de não satisfazer os critérios das SF2+VS2, apresenta uma trabalhabilidade próxima destas classes. Os resultados da resistência à compressão aos 28 dias, avaliada em cilindros, reflete a influência da razão w/c nesta propriedade. Com base nestes resultados e na EN 1992-1-1:2010, estes betões poderão ser classificados com C40 ou C45, sendo por isso adequados para a uma grande variedade de aplicações da engenharia civil. Tal como esperado, os resultados da resistividade aumentam com a diminuição da w/c, o que traduz a presença de uma matriz mais compacta. De acordo com a classificação proposta por RILEM star-230-PSC [12] todos os betões apresentam uma resistência à penetração de

Betão auto-compactável com incorporação do resíduo de mármore

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

cloretos normal. Tal como seria de esperar a profundidade de carbonatação aumenta com o aumento da razão w/c.

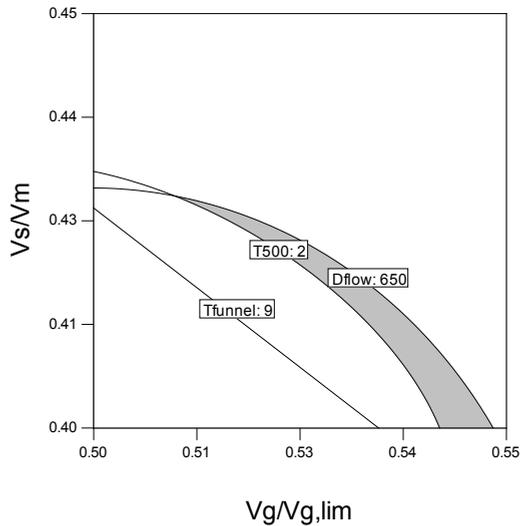


Figura 4. Região otimizada para o BAC

Quadro 5. Composições finais dos BACs

	BAC-A	BAC-B	BAC-C
Parâmetros da mistura			
w/c	0,350	0,400	0,450
Vw/Vp	0,877	0,841	0,814
Sp/p	1,23%	1,23%	1,21%
Vs/Vm		0,423	
s1/s		0,200	
Vg/Vglim		0,525	
Va		0,020	
Materiais constituintes (Kg/m³)			
Cimento	510,29	436,55	381,22
Pó de marmore	102,82	178,20	234,99
Água	177,74	173,75	170,74
Superplastificante	7,541	7,561	7,482
Areia fina		148,89	
Areia média		595,56	
Brita calcária		835,75	

Quadro 6 – Resultados dos ensaios dos BACs

<i>Resultados dos ensaios</i>	BAC-A	BAC-B	BAC-C
Desp (mm)	644 [SF1]	664 [SF2]	676 [SF2]
T500 (s)	1,66 [VS1]	2,04 [VS2]	1,94 [VS2]
Resistividade*, 28 d ($\Omega.m$)	135,0	116,7	104,2
Módulo elasticidade, 28 d (GPa)	42,1	43,2	43,4
Resistência compressão, 28 d (MPa)	54,0	50,7	49,9
Coef. difusão cloretos, 28 d ($\times 10^{-12} m^2 s^{-1}$)	8,70	10,36	11,96
Carbonatação, 181 d de exposição (mm)	4,6	6,4	7,0
(*) Wenner method			

5.- CONCLUSÕES

Um programa experimental baseado num plano fatorial é bastante útil para avaliar os efeitos dos parâmetros da composição e das suas interações sobre as propriedades da argamassa e/ou betão. Partindo de uma composição da pasta otimizada (com um estudo ao nível da argamassa), a composição final do BAC foi estudada para definir o conteúdo e composição dos agregados, envolvendo apenas um número reduzido de experiências. Para o conjunto de materiais usados a variável Vs/Vm foi a que mais influenciou as propriedades no estado fresco. A composição final de BAC obtida, otimizada para maximizar o conteúdo total em agregados, cumpriu todas as exigências no estado fresco correspondente às classes SF2+VS2, podendo ser classificada como C40. Avaliou-se ainda efeito do aumento/redução da razão w/c nas propriedades mecânicas e de durabilidade, mantendo a trabalhabilidade.

O uso de pó de mármore, um resíduo da indústria da pedra ornamental da zona do Alentejo, em Portugal, pode ser uma alternativa tecnológica viável, como adição mineral, na produção de BAC, atendendo às condições de trabalhabilidade e resistências mecânicas habitualmente exigidas em estruturas de betão armado.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo Projeto POCI-01-0145-FEDER-007457 – CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções – financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P. Os autores agradecem ainda o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Instituto Federal Fluminense (IFF) e do Centro Tecnológico da Pedra Natural de Portugal (CEVALOR).

REFERÊNCIAS

- [1] Tangtermsirikul S, Khayat KH. Fresh concrete. In: Skarendah A, Petersson O, editors. SCC, State-of-the-Art- Report of RILEM technical committee 174-SCC, RILEM report 23, Cachan Cedex; 2000. p. 17–22.

- [2] Uygunoglu T, Topçu I, Çelik A. Use of waste marble and recycled aggregates in self-compacting concrete for environmental sustainability. *Journal of Cleaner Product.* 2014;84:691-700.
- [3] Ismail, S., Ramli, M., 2013. Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications. *Constr. Build. Mater.* 44, 464 – 476.
- [4] Matos A. M, Nunes S, Coutinho J. S. Resíduos industriais em BAC. In: IV Congresso Ibero-americano sobre Betão auto-compactável, Porto, Portugal; 2015. p. 245–255.
- [5] Comissão Europeia. Comunicação da Comissão - Promoção do desenvolvimento sustentável na indústria extractiva não energética da UE. 52000DC0265 2000.
- [6] AIDICO. AITEMIN, CEVALOR and IMM CARRARA. Guideline of possible application of slurries in industries demanding micronized materials and valorization of slurries. LIFE10 ENV/ES/000480, 2012. 58p. Life+: Recyslurry.
- [7] Alyamaç, K. E.; Ince, R. A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. *Construction and Building Materials*, v 23, p. 1201-2010, 2009.
- [8] Mashaly. A.O., El-Kaliouby. B.A., Shalaby. B.N., El-Gohary. A.M., Rashwan. M.A. . 2016. Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks. *J. Clean. Prod.* 112. 731e741. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.023>.
- [9] Okamura, H, Ozawa K, Ouchi M. - Self-compacting concrete, *Structural Concrete*, 2000, v.1, n1, 3-17 pp.
- [10] Destefani, A. Z., Nunes, S., Coutinho, J. S. Argamassa auto-compactável com pó de mármore. In: Encontro Nacional Betão Estrutural, Coimbra, Portugal; 2016.
- [11] Nunes, S., Matos, A. M., Duarte, T., Figueiras, H., Sousa-Coutinho, J., 2013. Mixture design of self-compacting glass mortar. *Cem. Concr. Compos.* 43, 1–11. doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.05.009.
- [12] Beushausen, H., Fernandez, L. L., editors. Performance-Based Specifications and Control of Concrete Durability, State-of-the-Art- Report of RILEM technical committee 230-PSC, RILEM report 18, DOI 10.1007/978-94-017-7309-6.