

Critérios para definição da composição de betões leves autocompactáveis com agregados de argila expandida

Miguel C. S. Nepomuceno^(1,2), Luiz A. P. Oliveira^(2,3) e Sandrine F. Pereira

⁽¹⁾ Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, Universidade da Beira Interior, Portugal.

⁽²⁾ C-MADE - *Centre of Materials and Building Technologies*, Portugal.

⁽³⁾ Universidade Ceuma, UNICEUMA, Brasil.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5352>

RESUMO

Este artigo resume um estudo experimental que teve como objetivo definir parâmetros para a composição de betões leves autocompactáveis (BAL), incorporando agregados grossos de argila expandida e agregados finos de areia natural. Partindo da metodologia proposta por Nepomuceno *et al.* para os betões autocompactáveis de densidade normal (BAC), investigaram-se as alterações necessárias para produzir os BAL. Avaliou-se a curva granulométrica de referência dos agregados grossos leves e as propriedades do escoamento das argamassas adequadas à produção dos BAL. Avaliou-se a segregação estática e investigou-se a relação entre os parâmetros da mistura, a trabalhabilidade, a resistência à compressão e a massa volúmica seca. Concluiu-se que a absorção dos agregados leves constitui um aspeto relevante e que a curva de referência dos agregados grossos, bem como as propriedades reológicas das argamassas propostas por Nepomuceno *et al.* para os BAC, são adequadas à obtenção de BAL. Concluiu-se que a composição terá de resultar do equilíbrio entre a resistência à compressão e a massa volúmica seca pretendidas, uma vez que a resistência à compressão depende da razão água/cimento e do volume de agregados leves e este último afeta a massa volúmica seca.

PALAVRAS-CHAVE: Estudo da composição, Betão autocompactável, Betão leve, Agregados de argila expandida.

1.- INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a intensa investigação na área dos materiais para aplicação estrutural tem conduzido ao desenvolvimento de betões com características especiais, para aplicações também elas especiais. É o caso dos betões autocompactáveis leves, que conjugam a vantagem da autocompactabilidade com a vantagem resultante da redução da densidade. A redução da densidade dos betões resulta normalmente da incorporação de agregados leves, que podem ter diferentes proveniências e propriedades, introduzindo alguma complexidade adicional na previsibilidade do comportamento do betão no estado fresco e endurecido [1].

Existem ainda poucos estudos sobre modelos matemáticos para estimar a resistência à compressão de betões autocompactáveis leves, pelo que se efetuou uma pesquisa incluindo também os betões leves vibrados. Nessa pesquisa [1,2,3,4,5,6], identificaram-se alguns dos parâmetros considerados como suscetíveis de afetar a resistência à compressão de betões contendo agregados leves, os quais incluem: a densidade das partículas, a resistência ao esmagamento do agregado leve, o índice de forma do agregado leve, o volume de agregados leves na mistura, a resistência à compressão da matriz argamassa e a razão W/C.

Tendo como objetivo definir parâmetros para a composição do BAL, entendeu-se oportuno investigar as alterações necessárias para adequar a metodologia já existente para o BAC, proposta por Nepomuceno *et al.* [7,8,9,10]. Avaliou-se a curva granulométrica de referência dos agregados grossos leves e as propriedades do escoamento da fase argamassa adequadas à produção dos BAL. Avaliou-se a segregação estática e investigou-se a relação entre os parâmetros da mistura, a trabalhabilidade, a resistência à compressão e a massa volúmica seca. Propriedades como a densidade das partículas, resistência ao esmagamento e índice de forma do agregado foram consideradas constantes, uma vez que apenas se usou um tipo de agregado leve, pelo que relativamente à influência dessas variáveis nada se indagou.

2.- PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desenvolveu-se em cinco fases: a caracterização dos materiais, a definição da curva de referência dos agregados grossos leves, a análise da reologia da fase argamassa dos betões, o estudo da fase argamassa dos betões e o estudo dos betões.

2.1.- Caracterização dos materiais

Para este estudo foram selecionados os seguintes materiais: cimento Portland CEM I 42,5R (C), com massa volúmica de 3101 kg/m^3 ; filler calcário (FC) com aproximadamente a mesma finura do cimento e massa volúmica de 2720 kg/m^3 ; superplastificante (SP) à base de carboxilatos modificados com massa volúmica de 1050 kg/m^3 ; água da rede pública; areia natural rolada fina (Areia 0/2), com massa volúmica de 2559 kg/m^3 e módulo de finura de 1,938; areia natural rolada do rio de grão médio (Areia 0/4), com massa volúmica de 2586 kg/m^3 e módulo de finura de 2,961; agregado grosso britado de granito (Brita 3/6) com massa volúmica de 2710 kg/m^3 e módulo de finura de 5,311; agregado grosso britado de granito (Brita 6/15) com massa volúmica de 2700 kg/m^3 , módulo de finura de 6,692 e máxima dimensão de 19,1 mm; agregado grosso leve (Leca S) com massa volúmica de 930 kg/m^3 e módulo de finura de 5,085 e agregado grosso leve (Leca 4/12) com massa volúmica de 1193 kg/m^3 , módulo de finura de 6,356 e máxima dimensão de 12,7 mm. A análise granulométrica dos agregados é apresentada na Fig. 1.

Os agregados naturais foram usados pré-saturados e antes de cada amassadura efetuaram-se medições do teor em água superficial para correção das misturas. No caso dos agregados leves determinou-se a absorção de água após 30 e 60 minutos de imersão, expressa em percentagem da massa do agregado leve no estado natural (condições de armazenamento). Este estudo teve por objetivo analisar a compensação da dosagem de água nas amassaduras, uma vez que se optou por usar os agregados leves nas condições de armazenamento, em vez de pré-saturados. Os resultados obtidos são ilustrados na Tabela 1. Estudos sobre a

absorção total dos agregados leves permitiram verificar que, nas condições em que estes se encontravam armazenados, já continham alguma água absorvida. Nesta investigação optou-se por efetuar as correções das amassaduras considerando a absorção de água adicional dos agregados leves obtidas após 30 minutos de imersão.

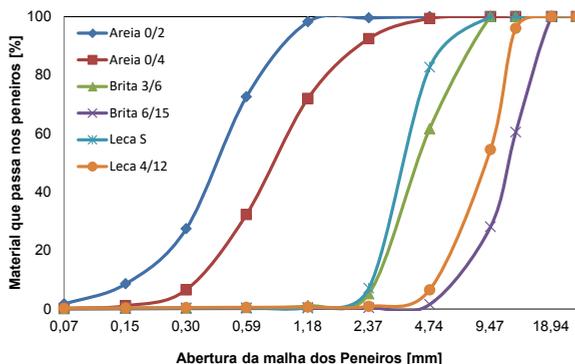


Figura 1. Curva granulométrica dos agregados

Tabela 1. Absorção de água do agregado leve

Agregado	Condição do agregado leve no estado natural	A% ⁽¹⁾	
		30 min	60 min
Leca S	No laboratório, em saco de plástico, conforme fornecido	0,48	0,55
Leca 4/12	No exterior, tempo húmido, abrigado da chuva	1,75	2,80

(1) Absorção de água após 30 e 60 minutos de imersão, em % da massa do agregado leve no estado natural

2.2.- Definição da curva de referência dos agregados grossos leves

Para os agregados finos e grossos naturais utilizaram-se as curvas granulométricas de referência propostas por Nepomuceno *et al.* [7,9,10]. Assim, determinaram-se as razões volumétricas destes agregados que melhor se ajustavam às respetivas curvas de referência. Para os agregados finos naturais obtiveram-se as percentagens em volume absoluto de 50% de Areia 0/2 e 50% de Areia 0/4. Para os agregados grossos naturais obtiveram-se as percentagens em volume absoluto de 60% de Brita 3/6 e 40% Brita 6/15.

Relativamente aos agregados leves, foi utilizado o método da baridade para determinar as proporções em volume absoluto entre a Leca S e a Leca 4/12. Considerou-se que a melhor associação entre os dois agregados leves seria aquela conducente à máxima compactidade, ou seja, a um mínimo de vazios. Foram avaliadas 6 misturas diferentes, fazendo variar as proporções em volume absoluto entre os dois agregados e, para cada uma dessas misturas, foi avaliada a baridade, a compactidade e a máxima dimensão da mistura.

2.3.- Análise da reologia da fase argamassa dos betões

Para avaliar se as propriedades reológicas da fase argamassa propostas por Nepomuceno *et al.* [7,9,10] para os BAC se adequavam à produção dos BAL, efetuaram-se estudos prévios em argamassas e betões com agregados naturais e leves. As propriedades reológicas podem

ser avaliadas indiretamente pelos ensaios de espalhamento e de fluidez [11]. Para o efeito, foi produzida uma argamassa para betões autocompactáveis com V_p/V_s de 0,80 (relação em volume absoluto entre os materiais finos e os agregados finos) e percentagem de substituição do cimento por filer calcário de 60%, em volume absoluto. Em laboratório foram ajustadas as dosagens de água e de superplastificante, tendo-se obtido um valor de V_w/V_p de 0,70 (relação em volume absoluto entre a água e os materiais finos) e um valor de $S_p/p\%$ de 0,62 (relação em percentagem entre as massas de SP e de materiais finos). Os procedimentos adotados no cálculo, na mistura, no acerto das propriedades reológicas e nos ensaios no estado fresco e endurecido podem ser consultados na referência [7].

Com a argamassa estudada produziu-se um BAC com razão V_m/V_g de 2,28 (razão entre os volumes absolutos de argamassa e de agregados grossos). Esse betão foi designado de BAC-S1.1. Posteriormente produziu-se o BAL-S1.1, de composição idêntica ao BAC-S1.1, diferindo apenas no facto do volume absoluto de agregados grossos naturais ter sido substituído por igual volume de agregados grossos leves. Produziu-se ainda o BAL-S1.2 idêntico ao anterior, diferindo apenas no facto deste último ter sido produzido com a correção da dosagem de água em função da absorção dos agregados leves. Sendo o BAL-S1.1 produzido sem correção, ocorreu uma redução de água efetiva e conseqüentemente a redução da razão W/C. Com este estudo pretendeu-se avaliar o efeito da absorção de água nas propriedades reológicas dos betões de agregados leves. Os procedimentos adotados no cálculo, na mistura e nos ensaios no estado fresco e endurecido podem ser consultados no programa experimental descrito na referência [9]. A caracterização no estado fresco e endurecido foi realizada de acordo com os ensaios previstos na NP EN 206-9:2010 [12].

2.4.- Estudo da fase argamassa dos betões

Verificado na fase precedente que as propriedades reológicas das argamassas propostas por Nepomuceno *et al.* [7] para os BAC se adequavam à produção dos BAL, iniciou-se um estudo mais amplo da fase argamassa. Com este estudo pretendia-se produzir um conjunto de argamassas com as mesmas propriedades reológicas, mas que combinassem diferentes parâmetros da mistura, conducentes a diferentes resistências, de modo a possibilitar a avaliação da sua interação com os agregados grossos leves aquando dos estudos em betões. Para o efeito, produziram-se nove argamassas, combinando valores de V_p/V_s de 0,80 e 0,70 com diferentes percentagens de substituição do ligante por adição, resultando em razões W/C entre os 0,29 e os 0,60 (em massa). Todas as argamassas apresentaram as mesmas propriedades de escoamento, traduzidas num valor de G_m entre 5,3 e 5,9 (Dm no mini slump-flow entre 251 e 263 mm) e num valor de R_m entre 1,14 e 1,30 (tempo no mini funil V entre 7,69 e 8,77 s). Os procedimentos de cálculo, mistura, acerto das propriedades reológicas, ensaios no estado fresco e endurecido podem ser consultados na referência [7].

2.5.- Estudo dos betões

O estudo dos betões incluiu a análise de 10 misturas, combinando argamassas selecionadas da fase anterior com valores de V_m/V_g de 2,28 e 2,60. As argamassas foram selecionadas por forma a abranger toda a gama de resistências analisada e os valores de V_m/V_g foram definidos a partir dos limites deste parâmetro analisados por Nepomuceno *et al.* [9,10]. Os procedimentos de amassadura foram os mesmos adotados por Nepomuceno *et al.* [9]. Para

cada amassadura efetuaram-se os ensaios no estado fresco (espalhamento, fluidez e capacidade de passagem na caixa L) e procedeu-se à moldagem de 5 provetes cúbicos com 150 mm de aresta e de um provete cilíndrico de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, sem qualquer tipo de vibração ou compactação. Após a moldagem, os provetes foram mantidos na câmara de cura à temperatura de 20 ± 2 °C e humidade relativa de $90 \pm 5\%$. Após 24 h de cura, o provete cilíndrico de cada betão foi cortado longitudinalmente e analisou-se a uniformidade da distribuição dos agregados leves em toda a secção. Aos 7 dias de idade efetuaram-se os ensaios de compressão de 2 dos provetes cúbicos e aos 28 dias ensaiaram-se à compressão os restantes 3 provetes. Aos 28 dias de idade foi ainda medida a massa volúmica do betão seco em estufa até massa constante.

3.- APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1.- Definição da curva de referência dos agregados grossos leves

No estudo pelo método da baridade, a máxima compactidade foi obtida associando 30% de Leca S e 70% de Leca 4/12, em volume absoluto. A Fig. 2 compara a curva de referência de Nepomuceno *et al.* [9] para os agregados grossos naturais, com a curva de referência dos agregados leves (curva real) determinada pelo método da baridade. As duas curvas não apresentam diferenças significativas, pelo que se assumiu que a curva de referência para os agregados grossos naturais pode ser aplicada aos agregados grossos leves.

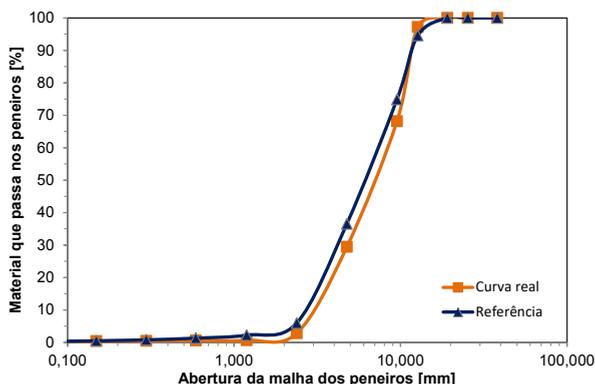


Figura 2. Curva granulométrica real e de referência dos agregados grossos leves

3.2.- Análise da reologia da fase argamassa dos betões

A avaliação da adequabilidade das propriedades reológicas da fase argamassa foi efetuada pela avaliação das propriedades reológicas dos betões com ela produzidos. Na Tabela 2 apresentam-se os parâmetros relevantes da composição dos betões, enquanto na Tabela 3 se apresentam as propriedades obtidas no estado fresco e endurecido. A comparação entre os resultados obtidos no estado fresco para as misturas BAC-S1.1 e BAL-S1.2, ilustrados na Tabela 3, evidencia que a substituição do agregado grosso natural pelo mesmo volume de agregado grosso leve não produziu alterações significativas nas propriedades no estado fresco, contabilizando a absorção do agregado leve adequada. Observou-se, no entanto, que

Critérios para definição da composição de betões leves autocompactáveis com agregados...

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

os valores do diâmetro de espalhamento e de H2/H1 na caixa L reduziram ligeiramente com a introdução de agregados leves, o que se justifica pela menor massa volúmica do betão de agregados leves. Em termos de velocidade de escoamento no funil V não ocorreram alterações significativas. Tudo indica que as misturas com agregados leves poderão necessitar de um ligeiro acréscimo de superplastificante face às misturas com agregados naturais para se obter igual capacidade de deformação, sem alterar a fluidez.

Tabela 2. Parâmetros relevantes da composição dos betões

Betão	V_p [m ³]	V_s [m ³ /m ³]	V_p/V_s	V_m [m ³ /m ³]	V_g [m ³ /m ³]	V_m/V_g	V_s/V_m	V_w [m ³ /m ³]	V_w/V_p	$Sp/p\%$
BAC-S1.1	0,227	0,284	0,80	0,674	0,296	2,275	0,42	0,159	0,700	0,62
BAL-S1.1	0,227	0,284	0,80	0,674	0,296	2,275	0,42	0,159	0,700	0,62
BAL-S1.2	0,227	0,284	0,80	0,674	0,296	2,275	0,42	0,159	0,700	0,62

Tabela 3. Ensaio no estado fresco e endurecido

Betão	Propriedades reológicas					Autocompactabilidade		Resistência à compressão		
	Espalhamento		Fluidez			Caixa L		$f_{cm,28}$	S_d	C_v
	T50 [s]	Dm [mm]	Gc	t [s]	Rc [s ⁻¹]	T40 [s]	H2/H1	[MPa]	[MPa]	[%]
BAC-S1.1	---	705	11,43	14,30	0,70	3,49	0,84	53,1	0,3	0,7
BAL-S1.1	---	648	9,50	26,28	0,38	7,45	0,72	36,2	3,0	8,3
BAL-S1.2	---	650	9,56	14,38	0,70	3,61	0,79	35,3	2,9	8,3

A mistura BAL-S1.2 foi produzida replicando a mistura BAL-S1.1, mas com a correção da absorção de água dos agregados leves. A ausência de correção da absorção no BAL-S1.1 levou a uma dosagem efetiva de água inferior à do BAL-S1.2. Em consequência seria de esperar simultaneamente uma maior viscosidade e uma menor capacidade de deformação. A maior viscosidade reflete-se numa redução da velocidade de escoamento no funil V, com obtenção de tempos de escoamento maiores. Por outro lado, uma menor capacidade de deformação reflete-se na redução do diâmetro de espalhamento. Um aumento da dosagem de superplastificante poderia ajudar a repor a capacidade de deformação, mas o seu efeito sobre a velocidade de deformação seria pouco significativo. Desta análise concluiu-se que as propriedades reológicas das argamassas propostas por Nepomuceno *et al.* para os BAC são adequadas aos BAL apenas quando se introduz a devida correção da dosagem efetiva de água em função da absorção dos agregados leves.

3.3.- Estudo da fase argamassa dos betões

Na Tabela 4 apresentam-se os parâmetros relevantes das argamassas e os resultados da análise no estado fresco e endurecido. Para o valor de V_p/V_s de 0,80 foram produzidas seis argamassas, enquanto para V_p/V_s de 0,70 foram produzidas apenas três argamassas. As argamassas têm em comum valores de G_m entre 5,3 e 5,9 e de R_m entre 1,14 e 1,30 s⁻¹, correspondentes aos intervalos propostos por Nepomuceno *et al.* [7]. Os resultados mostram uma gama de resistências entre os 43 e 80 MPa. Com o aumento da percentagem de substituição do cimento pela adição (fad.), em volume absoluto, verifica-se um aumento da razão W/C e consequente redução da resistência à compressão. O estudo confirma que existe uma relação entre percentagem de substituição do cimento pela adição (fad.) e a razão W/C para cada valor de V_p/V_s .

Tabela 4. Parâmetros relevantes das argamassas

Argamassa	Família de Finos	fad.	W/C	Composição das misturas			Reologia		Resistência $f_{m,28}$
				Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%	Gm	Rm	
A1	40C1+60FC	0,60	0,565	0,80	0,70	0,62	6,56	1,22	48,0
A2	50C1+50FC	0,50	0,458	0,80	0,71	0,64	5,58	1,20	55,3
A3	60C1+40FC	0,40	0,409	0,80	0,76	0,66	5,60	1,26	64,2
A4	70C1+30FC	0,30	0,355	0,80	0,77	0,80	5,76	1,22	69,0
A5	80C1+20FC	0,20	0,323	0,80	0,80	0,89	5,30	1,24	74,1
A6	100C1	0,00	0,281	0,80	0,87	1,00	5,76	1,20	79,6
A7	40C1+60FC	0,60	0,597	0,70	0,74	0,62	5,66	1,29	43,1
A8	60C1+40FC	0,40	0,425	0,70	0,79	0,74	5,45	1,22	65,4
A9	100C1	0,00	0,290	0,70	0,90	1,13	5,92	1,36	74,2

3.4.- Estudo dos betões

Na Tabela 5 apresentam-se as dosagens efetivas dos betões produzidos. O BAL-S1.1 foi produzido com a argamassa A1, o BAL-S2.1 com a argamassa A2, e assim sucessivamente. Na altura da amassadura foram efetuadas as correções necessárias para atender aos valores da absorção de água e do teor de água superficial dos agregados. Apenas no BAL-S1.1 não foi contabilizada a absorção de água do agregado leve. Na Tabela 6 são apresentadas as propriedades no estado fresco e na Tabela 7 as propriedades no estado endurecido. Com exceção da mistura BAL-S1.1, os betões satisfazem os parâmetros reológicos definidos. No estado fresco não se detetou segregação, exsudação ou qualquer tipo de bloqueio e a análise da segregação estática, efetuada pela observação da secção longitudinal dos provetes, indica uma distribuição uniforme dos agregados leves (Fig. 3). Confirma-se assim que as propriedades reológicas das argamassas são adequadas, o que permite o recurso a um leque alargado de correlações no estudo de argamassas já estudadas por Nepomuceno *et al.* [7].

A autocompactabilidade foi avaliada utilizando o ensaio da caixa L, admitindo-se satisfatório quando H2/H1 é igual ou superior a 0,80. Verifica-se na Tabela 7 que, à exceção do BAL-S1.1, onde não foi contabilizada a absorção dos agregados, todos os outros apresentam a autocompactabilidade desejada. A massa volúmica variou entre 1800 e 2000 kg/m³, pelo que estes betões podem ser classificados como betões autocompactáveis leves estruturais de classe D2,0 segundo a NP EN 206-1 [13].

Tabela 5. Dosagens efetivas das misturas produzidas

Identificação do betão	Parâmetros de Composição							
	C [kg/m ³]	FC [kg/m ³]	W [l/m ³]	Sp [l/m ³]	Areia 0/2 [kg/m ³]	Areia 0/4 [kg/m ³]	Leca S [kg/m ³]	Leca 4/12 [kg/m ³]
BAL-S1.1	281,6	370,6	155,6	5,8	363	367	83,0	250,3
BAL-S1.2	281,6	370,6	159,0	5,1	363	367	82,6	247,3
BAL-S2.1	350,7	307,8	160,7	4,7	362	366	82,6	247,3
BAL-S3.1	413,8	242,1	169,1	5,5	356	360	82,6	247,3
BAL-S4.1	480,6	180,7	170,5	5,9	354	358	82,6	247,3
BAL-S5.1	543,2	119,2	175,6	7,1	350	354	82,6	247,3
BAL-S6.1	663,2	0	186,1	7,9	342	346	82,6	247,3
BAL-S7.1	272,7	358,9	162,7	4,6	402	406	75,2	225,0
BAL-S8.1	402,3	235,3	170,9	5,4	395	399	75,2	225,0
BAL-S9.1	646,0	0	187,5	7,0	381	385	75,2	225,0

Tabela 6. Resultados obtidos no estado fresco

Identificação		Espalhamento		Fluidez		Caixa L
Betão	Família de finos	Dm [mm]	Gc	t [s]	Rc [s ⁻¹]	H2/H1
BAL-S1.1	40C1+60FC	648	9,50	26,28	0,38	0,72
BAL-S1.2	40C1+60FC	650	9,56	14,38	0,70	0,79
BAL-S2.1	50C1+50FC	664	10,01	12,88	0,78	0,80
BAL-S3.1	60C1+40FC	733	12,43	11,54	0,87	0,93
BAL-S4.1	70C1+30FC	639	9,19	11,87	0,84	0,79
BAL-S5.1	80C1+20FC	679	10,51	12,06	0,83	0,89
BAL-S6.1	100C1	683	10,65	10,24	0,98	0,88
BAL-S7.1	40C1+60FC	679	10,51	13,47	0,74	0,91
BAL-S8.1	60C1+40FC	706	11,46	10,52	0,95	0,94
BAL-S9.1	100C1	687	10,80	11,12	0,90	0,88

Tabela 7. Resultados obtidos no estado endurecido

Identificação		Parâmetros		Resistência	Massa volúmica
Betão	Família de finos	W/C	Vm/Vg	f _{cm,28} [MPa]	δ _{seca} [kg/m ³]
BAL-S1.1	40C1+60FC	0,553	2,275	36,2	1745
BAL-S1.2	40C1+60FC	0,565	2,275	35,3	1698
BAL-S2.1	50C1+50FC	0,458	2,275	41,8	1743
BAL-S3.1	60C1+40FC	0,409	2,275	48,0	1743
BAL-S4.1	70C1+30FC	0,355	2,275	48,2	1797
BAL-S5.1	80C1+20FC	0,323	2,275	47,9	1761
BAL-S6.1	100C1	0,281	2,275	51,1	1715
BAL-S7.1	40C1+60FC	0,597	2,600	34,9	1755
BAL-S8.1	60C1+40FC	0,425	2,600	43,7	1779
BAL-S9.1	100C1	0,290	2,600	56,4	1834

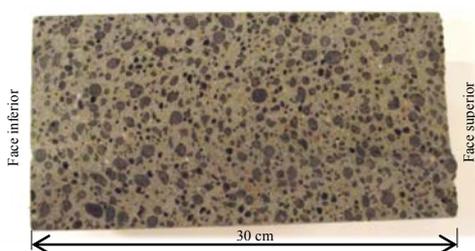


Figura 3. Secção de um provete cilíndrico de betão autocompactável leve

A Fig. 4 mostra a relação entre a resistência à compressão dos BAL e a razão W/C, enquanto a Fig. 5 compara a resistência à compressão das argamassas, dos BAL e dos BAC para diferentes razões W/C, em massa. Quanto maior a resistência à compressão dos BAL, maior a diferença face à resistência da fase argamassa. Uma fase argamassa de 80 MPa produz um BAC com cerca de 86 MPa. A mesma argamassa produz um BAL com cerca de 56 MPa e massa volúmica seca de 1830 kg/m³, usando Vm/Vg de 2,60. Com a mesma argamassa é ainda possível produzir BAL com cerca de 51 MPa e massa volúmica seca de 1715 kg/m³, usando Vm/Vg de 2,28. Resistências mais baixas, da ordem de 40 MPa, poderão oferecer melhores vantagens custo/benefício.

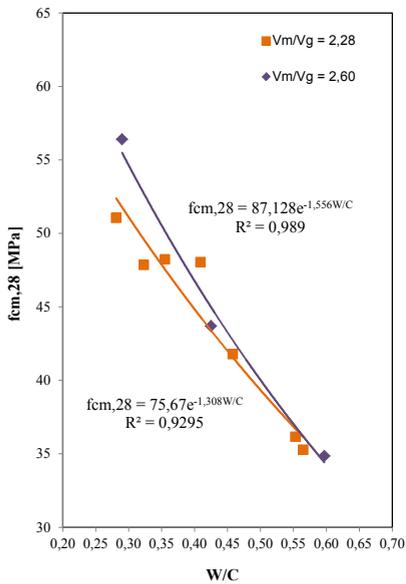


Figura 4. Relação entre $f_{cm,28}$ e a razão W/C

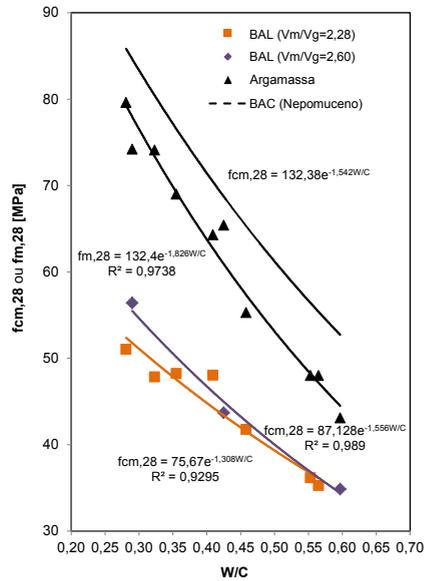


Figura 5. Resistência em argamassas e betões

4.- CONCLUSÕES

Com base no estudo realizado, foi possível concluir o seguinte:

- A absorção de água dos agregados leves assume um papel relevante nos BAL;
- A resistência à compressão dos BAL aos 28 dias de idade depende da razão W/C e do volume de agregados grossos leves na mistura. Em geral a resistência aumenta com a redução da razão W/C e com o aumento de Vm/Vg ;
- Para a mesma razão W/C , os BAL apresentam resistências à compressão inferiores àquelas obtidas nos BAC. Para razões W/C entre 0,29 e 0,61, em massa, obtiveram-se betões autocompactáveis leves com resistências entre 35 e os 57 MPa, enquanto nos BAC essa resistência situou-se entre os 53 e 87 MPa;
- Nos BAL obtiveram-se bons resultados em termos de trabalhabilidade para os seguintes intervalos: diâmetro de espalhamento entre 630 e 750 mm, tempo de escoamento no funil V entre 10 e 15 s e $H2/H1$ na caixa L superior a 0,80;
- A massa volúmica do BAL é influenciada pelo volume de agregados grossos leves. A massa volúmica seca variou entre 1691 e 1793 kg/m^3 , classificando-se assim como betão autocompactável leve estrutural, de acordo com EN 206-1:2010;
- A análise da segregação estática, efetuada através de imagens de secções longitudinais de provetes cilíndricos com diâmetro de 150 mm e 300 mm de altura, revelou uma distribuição homogênea do agregado leve;
- Com as correlações adequadas, a metodologia de Nepomuceno *et al.* para o estudo do BAC aplica-se ao BAL com agregados leves de argila expandida. Verificou-se que a curva de referência dos agregados grossos e as propriedades reológicas das argamassas, propostas por Nepomuceno *et al.* para o BAC, são adequadas à produção do BAL.

REFERÊNCIAS

- [1] J.A. Bogas, A. Gomes, Compressive behaviour and failure modes of structural lightweight aggregate concrete - Characterization and strength prediction, *Materials and Design* 46 (2013) 832-841.
- [2] Y.J. Kim, Y.W. Choi, M. Lachemi, Characteristics of self-consolidating concrete using two types of lightweight coarse agg., *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 11-16.
- [3] I.B. Top u, T. Uygunoglu, Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 1286-95.
- [4] H.Z. Cui, T.Y. Lo, S.A. Memon, F. Xing, X. Shi, Analytical model for compressive strength, elastic modulus and peak strain of structural lightweight aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 36 (2012) 1036-1043.
- [5] M.C.S. Nepomuceno, L.F.A. Bernardo, H.A.S. Pinto, Bet o estrutural de agregados leves de resistência normal e alta: dos estudos laboratoriais   produ o no local- caso de estudo, 4^o Cong. Nac. Constru o, Coimbra, 18-20 Dez. 2012.
- [6] J.A. Bogas, A. Gomes, M.F.C. Pereira, Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate, *Constr Build Mater* 35 (2012) 1013-22.
- [7] M.C.S. Nepomuceno, L.A. Pereira-de-Oliveira, S.M.R. Lopes, Methodology for mix design of the mortar phase of SCC using different mineral additions in binary blends of powders. *Constr. Build. Mater.* 26 (2012); 317-326.
- [8] M.C.S. Nepomuceno, L.A. Pereira-de-Oliveira, Parameters for self-compacting concrete mortar phase, Fifth ACI/CANMET intern. conf. on high-performance concrete struct. materials, Brazil, 2008, ACI-SP-253-21, May 2008, p. 323-340.
- [9] M.C.S. Nepomuceno, L.A. Pereira-de-Oliveira, S.M.R. Lopes, Methodology for the mix design of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. *Constr. Build. Mater.* 64 (2014) 82-94.
- [10] M.C.S. Nepomuceno, L.A. Pereira-de-Oliveira, S.M.R. Lopes, R.M.C. Franco, Maximum coarse aggregate's volume fraction in self-compacting concrete for different flow restrictions. *Constr. Build. Mater.* 113 (2016) 851-856.
- [11] L.A. Pereira-de-Oliveira, M.C.S. Nepomuceno, J.C.M. Carvalho, Rheology of self-compacting concrete mortar phase, 2nd International Conference on Civil Engineering - Towards a Better Environment, CE 2013 and the 5th International Conference on the Concrete Future, CF 2013, Covilh , Portugal; May 2013.
- [12] NP EN 206-9:2010. Regras adicionais p/ betão autocompactável, IPQ, Portugal.
- [13] NP EN 206-1:2007. Betão. Parte 1: Especifica o, desempenho, produ o e conformidade, IPQ, Portugal.