

## Otimização de betões auto-compactáveis para diferentes restrições ao escoamento

M. C. S. Nepomuceno, L. A. Pereira-de-Oliveira, R. M. C. Franco  
Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, Centre of Materials and Building  
Technologies, Universidade da Beira Interior, Portugal.

### RESUMO

O presente artigo descreve um estudo experimental que teve como objetivo otimizar a metodologia para composição de betões auto-compactáveis (BAC) proposta por Nepomuceno *et al.*, tendo em vista a sua aplicação a elementos de betão armado com restrições conhecidas, em termos do espaçamento livre entre varões. O programa experimental incluiu a adequação do ensaio da caixa L, introduzindo diferentes níveis de restrições, R1 (34 mm), R2 (64 mm), R3 (94 mm) e R4 (sem restrições). Foram produzidos quatro BACs com diferentes volumes de agregados grossos, mas com a mesma resistência média à compressão ( $55 \pm 2$  MPa) e as mesmas propriedades de escoamento, avaliadas pelo ensaio de espalhamento e de fluidez no funil V. Cada uma das quatro misturas foi submetida ao ensaio da caixa L para as quatro restrições diferentes. A partir dos resultados obtidos desenvolveu-se um modelo de cálculo que permite quantificar a dosagem máxima de agregados grossos que é possível incorporar face a restrições identificadas nas peças a betonar em termos de espaçamento livre entre varões. Os resultados mostraram que para estruturas com taxas de armaduras menos exigentes é possível aumentar o volume de agregados grossos da mistura e continuar a verificar o critério de auto-compactabilidade no ensaio da caixa L para a restrição correspondente, com  $H2/H1$  igual ou superior a 0,80.

**PALAVRAS CHAVE:** Betão auto-compactável, Metodologia, Otimização.

### 1.- INTRODUÇÃO

A tentativa de otimização das misturas de betão auto-compactável, objetivando a redução das dosagens de pasta e a consequente redução de custos na produção está subjacente em muitos trabalhos de investigação, desenvolvidos desde o surgimento do método geral proposto em 1993 por Okamura *et al.* [1]. Na Europa, uma das primeiras tentativas de otimização das misturas surgiu com o método do CBI proposto por Peterson *et al.* [2, 3] e Van Bui *et al.* [4], seguida por outras propostas nas quais se inclui a do LCPC desenvolvida por Sedran e Larrard [5], entre outras. Mais recentemente, Nepomuceno *et al.* [6] apresentaram uma metodologia para o estudo do betão auto-compactável. Esta metodologia, à semelhança de outras, permitiu otimizar a composição dos BACs, estabelecendo relações entre os parâmetros da mistura, a reologia (avaliada indiretamente pelos ensaios de espalhamento e fluidez), a auto-compactabilidade avaliada na caixa L e a resistência à compressão.

## Otimização de betões auto-compactáveis para diferentes restrições ao escoamento

Na metodologia proposta por Nepomuceno *et al.* [6] a auto-compactabilidade é estabelecida para um nível de restrição na passagem pelas armaduras muito elevado, mediante um afastamento entre armaduras de 34 mm na caixa L. É indiscutível que um betão que seja auto-compactável nestas condições, sê-lo-á certamente para restrições menos exigentes. No entanto, numa tentativa de otimização das misturas, dir-se-ia que o nível de auto-compactabilidade deveria ser adequado especificamente para a estrutura em análise. Nesta perspetiva, considera-se existir ainda margem para uma otimização desta metodologia tendo em vista o estudo da composição do betão para aplicações específicas onde as restrições ao escoamento sejam conhecidas.

O desenvolvimento do BAC para aplicações específicas não é um conceito novo. Este princípio está aliás patente nas recomendações da *Japan Society of Civil Engineers* (JSCE) de 1998, descritas por Nawa *et al.* [7] e Domone [1], ao estabelecer requisitos de auto-compactabilidade a obter no ensaio da caixa adequados a diferentes níveis de restrições nas armaduras e diferentes taxas de armaduras. A este respeito podem ainda ser identificadas outras referências, nomeadamente no método do CBI, que estabelece o volume máximo de agregados grossos das misturas tendo em consideração a máxima dimensão do agregado, a distância entre varões e o diâmetro desses varões através do “critério de bloqueio” Petersson *et al.* [2, 3] e ainda o volume mínimo de pasta através do “critério da fase líquida” Van Bui *et al.* [4]. A otimização dos BACs, nos termos definidos no presente artigo, tem por objetivo incrementar o volume máximo de agregados grossos da mistura em situações de menor restrição ao escoamento, viabilizando desse modo a redução do volume de argamassa desses betões e, em consequência, a redução dos volumes dos finos e do adjuvante.

## 2.- PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental incluiu a adequação do ensaio da caixa L para diferentes restrições, R1 (34 mm), R2 (64 mm), R3 (94 mm) e R4 (sem restrições). Seguiu-se a produção de 4 BACs com diferentes volumes de agregados grossos, a mesma resistência média à compressão ( $55 \pm 2$  MPa) e as mesmas propriedades de escoamento (espalhamento no cone e fluidez no funil V). Cada uma das quatro misturas foi submetida ao ensaio da caixa L para as quatro restrições diferentes.

### 2.1.- Materiais

Para a produção dos BACs foram selecionados os seguintes materiais tendo em vista o nível de resistência pretendido: um cimento portland (CEM I 42,5R) com massa volúmica de  $3140 \text{ kg/m}^3$  e superfície específica (Blaine) de  $384,8 \text{ m}^2/\text{kg}$ ; uma adição de filler calcário com massa volúmica de  $2720 \text{ kg/m}^3$  e superfície específica de  $508,8 \text{ m}^2/\text{kg}$  (medida no analisador de partículas laser Coulter LS200); um superplastificante à base de carboxilatos modificados com massa volúmica de  $1050 \text{ kg/m}^3$ ; uma areia natural rolada fina (Areia 0/2), com massa volúmica de  $2640 \text{ kg/m}^3$  e módulo de finura de 1,960; uma areia natural rolada do rio de grão médio (Areia 0/4), com massa volúmica de  $2610 \text{ kg/m}^3$  e módulo de finura de 2,821; um agregado grosso britado de granito (Brita 3/6) com massa volúmica de  $2710 \text{ kg/m}^3$  e módulo de finura de 5,311 e ainda um agregado grosso britado de granito (Brita 6/15) com massa volúmica de  $2700 \text{ kg/m}^3$ , módulo de finura de 6,385 e máxima dimensão de 19,1 mm.

Os agregados finos foram combinados na proporção em volume absoluto de 35% de Areia 0/2 e 65% de Areia 0/4, resultando numa mistura com um módulo de finura de 2,520. Os agregados grossos foram combinados na proporção em volume absoluto de 55% de Brita 3/6 e 45% de Brita 6/15, resultando numa mistura com um módulo de finura de 5,794. As proporções dos agregados finos e dos agregados grossos foram estimadas de forma a obter distribuições granulométricas próximas daquelas propostas por Nepomuceno *et al.* [6] e mantiveram-se fixas em todo o estudo.

## 2.2.- Estudo da fase argamassa dos BACs

Os parâmetros necessários ao cálculo da argamassa foram definidos a partir da metodologia proposta por Nepomuceno *et al.* [8], que considera a definição da mistura de materiais finos (proporção entre cimento e adição), o parâmetro  $V_p/V_s$  (relação em volume absoluto entre os materiais finos e os agregados finos), a razão  $V_w/V_p$  (relação em volume absoluto entre a água e os materiais finos) e a razão  $Sp/p\%$  (relação em percentagem entre as dosagens em massa de superplastificante e de materiais finos). Assim, considerando o tipo de cimento usado (CEM I 42,5R) e a resistência média pretendida para os betões (55 MPa) foi estimada a razão  $W/C$  (em massa) em 0,57. De seguida fixou-se o parâmetro  $V_p/V_s$  em 0,80 e tendo por base a razão  $W/C$  e o tipo de cimento e de adição usados, estimou-se a percentagem de substituição do cimento pela adição em 60%. Os parâmetros  $V_w/V_p$  e  $Sp/p\%$  foram obtidos experimentalmente através do processo descrito por Nepomuceno *et al.* [8], tendo-se obtido os valores de  $V_w/V_p = 0,70$  e  $Sp/p\% = 0,38$ . Em consequência do acerto experimental, a razão  $W/C$  desceu ligeiramente face à prevista inicialmente de 0,57 para 0,56. A composição da argamassa obtida e os parâmetros relevantes são apresentados no Quadro 1.

A resistência média à compressão da argamassa, medida em 6 provetes cúbicos de 40 mm de aresta aos 28 dias de idade foi de 50,47 MPa, apresentando um desvio padrão de 1,28 MPa. Face aos valores obtidos e recorrendo à correlação entre a resistência da fase argamassa e do betão com ela produzido, apresentada por Nepomuceno *et al.* [8], esta argamassa deverá conduzir à obtenção de betões com resistência média à compressão de 55,40 MPa, mesmo que a razão  $V_m/V_g$  (razão entre os volumes absolutos de argamassa e de agregados grossos) varie de 2,00 a 2,60.

**Quadro 1. Dosagem e parâmetros relevantes da argamassa**

<i>Dosagem 1 m<sup>3</sup> de argamassa:</i>		<i>Parâmetros relevantes da argamassa:</i>	
Cimento [kg]	424,3	Materiais finos*	40% Cimento, 60% Adição
Fíler calcário [kg]	551,3	$V_p/V_s$	$0,338/0,422 = 0,80$
Areia 0/2 [kg]	390,1	$W/C$	$236,5/424,3 = 0,56$
Areia 0/4 [kg]	716,3	$V_w/V_p$	$0,236/0,338 = 0,70$
Água [l]	236,5	$Sp/p\%$	$3,707/975,6 \times 100 = 0,38$
Superplastificante [l]	3,53		

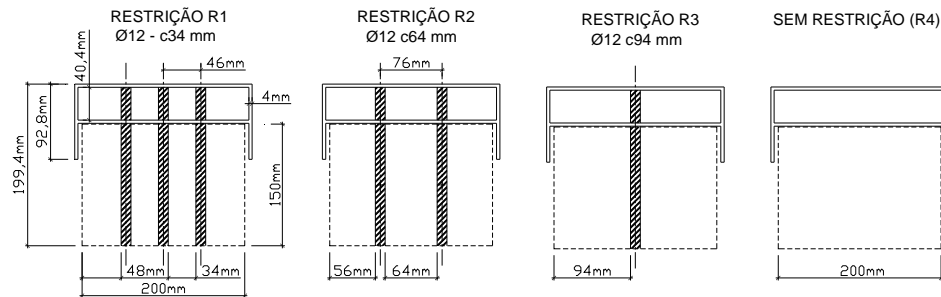
\* *Proporções em volume absoluto*

## 2.3.- Produção e ensaio dos betões auto-compactáveis

Para se avaliar a influência na auto-compactabilidade dos betões medida na caixa L, quando se faz variar a restrição entre armaduras, foram produzidos 4 betões diferentes em termos da proporção entre os volumes absolutos de argamassa e de agregados grossos ( $V_m/V_g$ ), nomeadamente: 2,10; 2,20; 2,30 e 2,40. Cada um destes betões foi

## Otimização de betões auto-compactáveis para diferentes restrições ao escoamento

testado na caixa L para quatro restrições diferentes, traduzidas por diferentes espaçamentos livres entre varões, que se designaram de R1 (34 mm), R2 (64 mm), R3 (94 mm) e R4 (sem restrições). As dimensões da caixa L são as mesmas usadas por Nepomuceno *et al.* [6] e os pormenores das restrições são ilustrados na Fig. 1.



**Figura 1. Restrições da caixa L**

As dosagens dos quatro betões produzidos são apresentadas no Quadro 2, juntamente com os parâmetros relevantes das misturas.

**Quadro 2. Composições e parâmetros relevantes das misturas**

<i>Dosagem para 1 m<sup>3</sup> de betão:</i>	<i>BAC 1</i>	<i>BAC 2</i>	<i>BAC 3</i>	<i>BAC 4</i>
Cimento [kg]	290,49	286,83	282,93	278,78
Filer calcário [kg]	377,46	372,69	367,63	362,24
Areia 0/2 [kg]	267,13	263,76	260,18	256,36
Areia 0/4 [kg]	490,47	484,27	477,69	470,69
Brita 3/6 [kg]	425,23	438,12	451,81	466,38
Brita 6/15 [kg]	346,63	357,14	368,30	380,18
Água [litros]	161,9	159,85	157,68	155,37
Superplastificante [litros]	2,42	2,39	2,35	2,32
<i>Parâmetros relevantes:</i>				
Materiais finos*	40% Cimento, 60% Adição			
W/C; Vp/Vs; Vw/Vp; Sp/p%	0,56; 0,80; 0,70; 0,38			
Vm/Vg	2,400	2,300	2,200	2,100
Vm [m <sup>3</sup> ]	0,685	0,676	0,667	0,657
Vg [m <sup>3</sup> ]	0,285	0,294	0,303	0,313
Vv [m <sup>3</sup> ]	0,030	0,030	0,030	0,030
MN = Vp/Vs x Vm/Vg	1,92	1,84	1,76	1,68

\* *Proporções em volume absoluto*

Cada um dos betões foi testado na caixa L para cada uma das restrições, perfazendo um total de 16 ensaios. De cada vez que se testou um betão na caixa L, foi previamente medido o diâmetro de espalhamento (Dm), enquanto o tempo de escoamento no funil V apenas foi medido uma vez para cada tipo de betão produzido. As dimensões do cone de espalhamento e do funil V foram as mesmas usadas na metodologia proposta por Nepomuceno *et al.* [6]. Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 3. No Quadro 4 são apresentados os resultados da massa volúmica e do ensaio à compressão aos 28 dias,

tendo por base uma amostra de 3 provetes cúbicos de 150 mm de aresta para cada tipo de betão. A resistência média à compressão dos 4 tipos de betões produzidos foi de 55,64 MPa, tal como se previra nos ensaios da fase argamassa e os resultados individuais situam-se no intervalo previsto de 55±2 MPa.

**Quadro 3. Resultados dos ensaios dos betões no estado fresco**

Betão	MN	Espalhamento		Fluidez		Caixa L				
		Dm [mm]	Gc	t [s]	Rc [s <sup>-1</sup> ]	H2/H1				
						R1	R2	R3	R4	
BAC 1	1,92	656	9,74	12,66	0,79	0,78			0,90	0,83
		665	10,04							
		667	10,11							
		609	8,26							
BAC 2	1,84	705	11,43	13,70	0,73	0,80			0,91	0,88
		677	10,46							
		695	11,08							
		705	11,43							
BAC 3	1,76	637	9,13	11,25	0,89	0,77			0,83	0,80
		665	10,06							
		660	9,89							
		616	8,47							
BAC 4	1,68	697	11,13	13,16	0,76	0,71			0,77	0,92
		613	8,39							
		608	8,23							
		623	8,70							

**Quadro 4. Resultados dos ensaios dos betões no estado endurecido**

Betão	MN	Massa volúmica	Resistência à compressão		
		Média [kg/m <sup>3</sup> ]	Média [MPa]	Sd [MPa]	Cv [%]
BAC 1	1,92	2347	57,01	1,42	2,5
BAC 2	1,84	2313	53,33	0,77	1,5
BAC 3	1,76	2343	56,24	1,60	2,8
BAC 4	1,68	2335	55,96	0,78	1,4

### 3.- ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

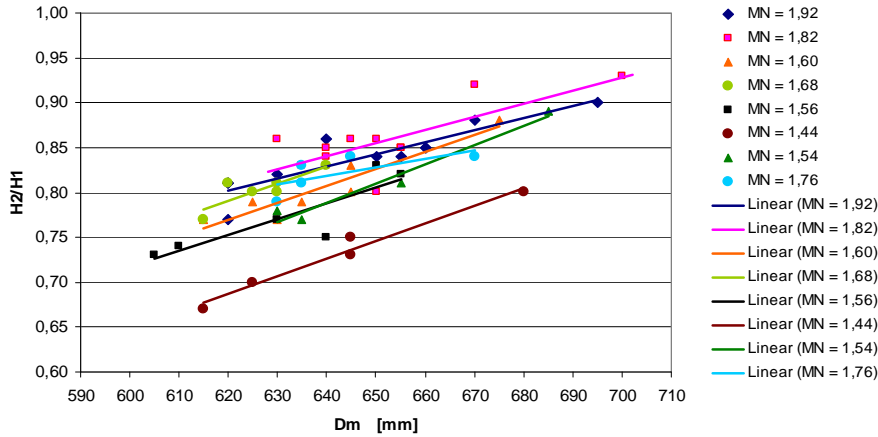
A análise e discussão dos resultados incluem a avaliação do desempenho das misturas no estado fresco, a adequação do modelo proposto por Nepomuceno *et al.* [6] e ainda a avaliação da metodologia proposta.

#### 3.1.- Desempenho dos betões no estado fresco

Para o estudo realizado, seria desejável que todos os betões apresentassem o mesmo diâmetro de espalhamento (Dm), uma vez que este afeta o resultado medido na caixa L. Nesta medida, foi necessário investigar a forma como se poderia minimizar esse efeito. A resposta foi encontrada com recurso à análise efetuada por Nepomuceno [9], que

## Otimização de betões auto-compactáveis para diferentes restrições ao escoamento

relacionou o parâmetro H2/H1 na caixa L com o diâmetro de espalhamento (Dm) para cada valor de MN ( $MN = Vp/Vs \times Vm/Vg$ ) como se ilustra na Fig. 2.



**Figura 2. Relação entre H2/H1 e Dm em função de MN [9]**

A Figura 2 mostra que a inclinação das várias retas que relacionam Dm e H2/H1 é similar, o que pode indicar que a inclinação da reta pode traduzir essa relação de modo satisfatório. Isso significa que uma vez conhecido um ponto no gráfico, ou seja, um par de valores de Dm e de H2/H1 obtidos experimentalmente, é possível construir a equação da reta que passa por esse ponto e, desta forma, estimar H2/H1 para outros valores de Dm. No presente estudo optou-se por determinar a inclinação média das retas da Fig. (2), que corresponde a 0,001675. Assim, a equação da reta será dada pela Eq. (1) que a seguir se apresenta, onde “c” é uma constante, que assumirá valores diferentes para cada par de valores de Dm e H2/H1 obtidos experimentalmente.

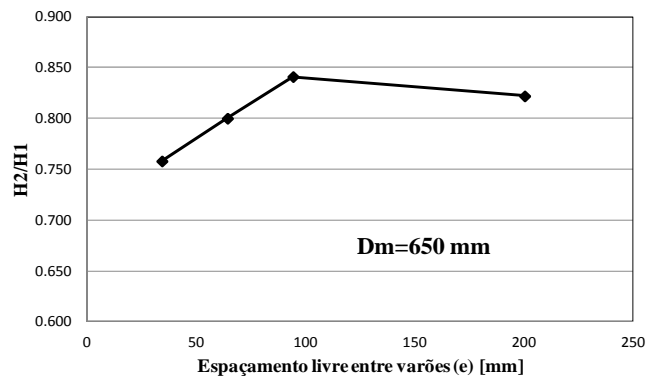
$$\left(\frac{H2}{H1}\right)_{R1} = 0,001675 \times Dm + c \quad (1)$$

O Quadro 5 apresenta os resultados de H2/H1 estimados através das respectivas equações das retas para um diâmetro de 650 mm de espalhamento e para os diversos valores de MN e respectivas restrições. Por definição, o parâmetro MN representa o produto de Vp/Vs por Vm/Vg. Uma vez que Vp/Vs foi assumido como constante (0,80), a valores maiores de MN corresponderão valores maiores de Vm/Vg e, em consequência, menores volumes absolutos de agregados grossos.

Os resultados obtidos (Quadro 5) podem ser considerados ainda escassos para uma conclusão mais acertada relativamente ao efeito que a variação do parâmetro MN produz na relação entre os valores de H2/H1 e o espaçamento livre entre varões. Nesta medida, optou-se por efetuar uma análise em termos médios, independentemente do valor de MN. Os resultados obtidos são apresentados na Fig. 3, que mostra uma tendência linear de aumento do valor de H2/H1 com o aumento do espaçamento livre entre varões. Não obstante, evidencia-se uma redução do valor de H2/H1 quando são retiradas as restrições. Este padrão de comportamento foi comum em todas as misturas.

**Quadro 5. Valores corrigidos de H2/H1 para Dm de 650 mm**

Restrição	Dm	H2/H1	MN	c	H2/H1 (Dm=650 mm)	
R1 (34 mm)	664,5	0,784	1,92	-0,3288	0,760	Valor médio 0,758
	677,0	0,804	1,84	-0,3296	0,759	
	665,0	0,767	1,76	-0,3466	0,742	
	613,0	0,708	1,68	-0,3190	0,770	
R2 (64 mm)	608,5	0,770	1,92	-0,2490	0,839	Valor médio 0,800
	705,0	0,853	1,84	-0,3280	0,761	
	615,5	0,780	1,76	-0,2507	0,838	
	623,0	0,714	1,68	-0,3290	0,760	
R3 (94 mm)	666,5	0,900	1,92	-0,2161	0,872	Valor médio 0,841
	695,0	0,913	1,84	-0,2508	0,838	
	660,0	0,827	1,76	-0,2787	0,810	
	607,5	0,772	1,68	-0,2451	0,843	
R4 (200 mm)	655,5	0,833	1,92	-0,2647	0,824	Valor médio 0,822
	705,0	0,882	1,84	-0,2989	0,790	
	636,5	0,804	1,76	-0,2618	0,827	
	696,5	0,923	1,68	-0,2433	0,845	



**Figura 3. Valores de H2/H1 em função da restrição na caixa L**

A ligeira redução observada no valor de H2/H1 a partir da restrição R3 (94 mm) é pouco significativa. Ainda assim, optou-se por assumir que o valor de H2/H1 a adotar para a restrição R3 deverá corresponder ao valor mais baixo obtido para as duas restrições R3 e R4, ou seja, o valor de H2/H1 correspondente à restrição R3 assume o valor de H2/H1 correspondente à restrição R4 (mais conservador). Com base nesta premissa calcularam-se os fatores de conversão que se apresentam no Quadro 6, ou seja, fatores que permitam converter o valor de H2/H1 obtido numa determinada restrição para o valor correspondente de outra restrição.

**Quadro 6. Fatores de conversão para as diferentes restrições**

Fator de Conversão	Equações
FC1 = 1,000	$(H2/H1)_{R1} = FC1 \times (H2/H1)_{R1}$
FC2 = 0,951	$(H2/H1)_{R1} = FC2 \times (H2/H1)_{R2}$
FC3 = 0,923	$(H2/H1)_{R1} = FC3 \times (H2/H1)_{R3}$

## Otimização de betões auto-compactáveis para diferentes restrições ao escoamento

### 3.2.- Adequação da metodologia proposta por Nepomuceno *et al.*

Nepomuceno *et al.* [6] propuseram um modelo matemático para estimar o parâmetro H2/H1 medido na caixa L para a restrição R1 (34 mm), em função dos parâmetros MN e Dm. O referido modelo é traduzido analiticamente pela Eq. (2), onde as constantes a, b e c assumem os seguintes valores: a= 2,189; b= -0,0997 e c= -673,283.

$$\left(\frac{H2}{H1}\right)_{R1} = a + b \times \frac{MN}{\ln(MN)} + \frac{c}{Dm} \quad (2)$$

A Equação 2 pode ser escrita em ordem a MN. No entanto, tratando-se de uma equação de solução indeterminada, recorreu-se ao auxílio de *software* para expressar MN em função de Dm e de H2/H1 com base nos valores que deram origem à Eq. (2), tendo-se obtido a Eq. (3), que apresenta o mesmo coeficiente de correlação da Eq. (2) ( $r^2= 0,90$ ) e onde as constantes a, b, c, d, e, f e g assumem os seguintes valores: a=1,2214; b=-1,3605, c=1,3099; d=-0,001758; e=-1,0184; f=1,0855 e g=-0,001524.

$$MN = \frac{a + b \times \left(\frac{H2}{H1}\right)_{R1} + c \times \left(\frac{H2}{H1}\right)_{R1}^2 + d \times (Dm)}{1 + e \times \left(\frac{H2}{H1}\right)_{R1} + f \times \left(\frac{H2}{H1}\right)_{R1}^2 + g \times (Dm)} \quad (3)$$

Sendo MN o produto de Vp/Vs por Vm/Vg, a Equação 3 pode ser escrita em ordem a Vm/Vg da seguinte forma (Eq. 4):

$$\left(\frac{Vm}{Vg}\right)_{R1} = \frac{1}{\left(\frac{Vp}{Vs}\right)} \times \frac{a + b \times \left(\frac{H2}{H1}\right)_{R1} + c \times \left(\frac{H2}{H1}\right)_{R1}^2 + d \times (Dm)}{1 + e \times \left(\frac{H2}{H1}\right)_{R1} + f \times \left(\frac{H2}{H1}\right)_{R1}^2 + g \times (Dm)} \quad (4)$$

Assumindo que os fatores de conversão apresentados no Quadro 6 traduzem convenientemente o efeito das diferentes restrições sobre os valores de H2/H1, na ausência de bloqueio nas armaduras e de segregação dinâmica do betão, a Eq. (4) pode ser escrita para os níveis de restrição R2 e R3, respetivamente, pelas Eqs (5) e (6), onde as constantes a, b, c, d, e, f e g assumem os mesmos valores da Eq. (3).

$$\left(\frac{Vm}{Vg}\right)_{R2} = \frac{1}{\left(\frac{Vp}{Vs}\right)} \times \frac{a + b \times FC_2 \times \left(\frac{H2}{H1}\right)_{R2} + c \times \left(FC_2 \times \left(\frac{H2}{H1}\right)_{R2}\right)^2 + d \times (Dm)}{1 + e \times FC_2 \times \left(\frac{H2}{H1}\right)_{R2} + f \times \left(FC_2 \times \left(\frac{H2}{H1}\right)_{R2}\right)^2 + g \times (Dm)} \quad (5)$$

$$\left(\frac{Vm}{Vg}\right)_{R3} = \frac{1}{\left(\frac{Vp}{Vs}\right)} \times \frac{a + b \times FC_3 \times \left(\frac{H2}{H1}\right)_{R3} + c \times \left(FC_3 \times \left(\frac{H2}{H1}\right)_{R3}\right)^2 + d \times (Dm)}{1 + e \times FC_3 \times \left(\frac{H2}{H1}\right)_{R3} + f \times \left(FC_3 \times \left(\frac{H2}{H1}\right)_{R3}\right)^2 + g \times (Dm)} \quad (6)$$

No Quadro 7 resume-se a metodologia proposta, fixando intervalos conservadores para as restrições R1 (34 a 63 mm), R2 (64 a 93 mm) e R3 ( $\geq 93$  mm).



**Quadro 7. Requisitos funcionais de auto-compactabilidade**

Parâmetros de cálculo		Nível de auto-compactabilidade		
		R1	R2	R3
Condições estruturais	Espaçamento livre, em mm	34 a 63	64 a 93	≥ 93
	D <sub>máx</sub> do agregado, em mm	19,1	19,1	19,1
Betão fresco	Funil V: t em segundos	10 a 20	10 a 20	10 a 20
	Espalhamento: Dm em mm	600 a 700	600 a 700	600 a 700
	Ensaio na caixa L: H2/H1	≥ 0,80 Obst. R1	≥ 0,80 Obst. R2	≥ 0,80 Obst. R3

### 3.3.- Avaliação da metodologia proposta

No Quadro 8 apresentam-se os resultados da aplicação da metodologia proposta no estudo de um betão para as três restrições (R1, R2 e R3). Os betões apresentam em comum os mesmos materiais, a mesma resistência e a mesma trabalhabilidade.

**Quadro 8. Dosagens e parâmetros relevantes das misturas**

Dosagens para 1 m <sup>3</sup>	Restrição R1	Restrição R2	Restrição R3
Brita 3/6 [kg]	441	486	503
Brita 6/15 [kg]	359	396	410
Areia 0/2 [kg]	263	251	247
Areia 0/4 [kg]	483	461	453
CEM I/42,5R [kg]	286	273	268
Fíler calcário [kg]	372	355	349
Água [litros]	159,4	152,2	149,6
Superplastificante [litros]	2,38	2,27	2,23
Parâmetros relevantes:			
V <sub>m</sub> [m <sup>3</sup> ]	0,674	0,644	0,633
V <sub>g</sub> [m <sup>3</sup> ]	0,296	0,326	0,337

No Quadro 9 apresentam-se os requisitos de auto-compactabilidade da JSCE [7]. Ao comparar tais requisitos com aqueles propostos no presente estudo observa-se que as principais diferenças residem nas condições estruturais e na forma de obtenção dos agregados grossos. A JSCE estabelece intervalos de volume de agregados grossos para cada nível de auto-compactabilidade enquanto no presente trabalho esse valor é estimado em função do nível de restrição, de Dm e do parâmetro H2/H1 pretendido.

**Quadro 9. Requisitos de auto-compactabilidade da JSCE [7]**

Nível de Auto-compactabilidade		1	2	3
Condições estruturais	Espaçamento livre, em mm	35 a 60	60 a 200	≥ 200
	Dens. de armadura, em kg/m <sup>3</sup>	≥ 350	100 a 350	≤ 100
Ensaio na caixa: H em mm		≥ 300	≥ 300	≥ 300
		Obst. R1	Obst. R2	Obst. R3
Espalhamento: Dm em mm		600 - 700	600 - 700	500 - 650
Resistência segregação	Funil V: t em segundos	9 a 20	7 a 13	4 a 11
	Espalhamento: T50 s	5 a 20	3 a 15	3 a 15
Volume de agregado grosso: V <sub>g</sub> em m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>		0,28 - 0,30	0,30 - 0,33	0,32 - 0,35

## Otimização de betões auto-compactáveis para diferentes restrições ao escoamento

Não obstante as diferenças nas formas de ensaio da auto-compactabilidade (caixa ou caixa L) verifica-se que os volumes de agregados grossos apresentados no Quadro 8 para as diferentes restrições, R1 ( $V_g=0,296 \text{ m}^3$ ), R2 ( $V_g=0,326 \text{ m}^3$ ) e R3 ( $V_g=0,337 \text{ m}^3$ ), obtidos pelas equações desenvolvidas no presente estudo, se enquadram nos intervalos propostos pela JSCE (Quadro 9) para os três níveis de restrições, respetivamente, R1 (0,28 a  $0,30 \text{ m}^3$ ), R2 (0,30 a  $0,33 \text{ m}^3$ ) e R3 (0,32 a  $0,35 \text{ m}^3$ ).

### 4.- CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostraram que para estruturas com taxas de armaduras menos exigentes é possível aumentar o volume de agregados grossos na mistura de betões auto-compactáveis e continuar a verificar o critério de auto-compactabilidade no ensaio da caixa L para a restrição correspondente, com  $H_2/H_1$  igual ou superior a 0,8. A um aumento do volume de agregados grossos corresponde uma redução do volume de argamassa e, em consequência, uma redução dos volumes dos materiais finos e do adjuvante, que constituem os componentes mais dispendiosos de uma mistura.

### REFERENCIAS

- [1] DOMONE, P. - Mix Design of Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC, RILEM Publications, 2000, p. 49-65.
- [2] PETERSSON, O.; BILLBERG, P.; BUI, V. K. - A model for Self-Compacting Concrete. Proceedings of RILEM International Conference on Production Methods and Workability of Fresh Concrete, E&FN Spon; London, 1996, p. 484-492.
- [3] PETERSSON, O.; BILLBERG, P. - Investigation on Blocking of SCC with Different maximum Aggregate Size and Use of Viscosity Agent Instead of Filler. 1st International RILEM Symposium on SCC, Sweden, 1999, p. 333-344.
- [4] BUI, V. K.; MONTGOMERY, D. - Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum past volume. 1<sup>st</sup> International RILEM Symposium on SCC, Sweden, 1999, p. 373-384
- [5] SEDRAN, T.; LARRARD, F. - Optimization of SCC Thanks to Packing Model. 1st International RILEM Symposium on SCC, Sweden, 1999, p. 321-332.
- [6] NEPOMUCENO, M.C.S.; OLIVEIRA, L.A.P.; LOPES, S.M.R. - Parâmetros para a composição de betões auto-compactáveis. bac2010, Portugal, 2010, p. 27-28.
- [7] NAWA, T.; IZUMI, T.; EDAMATSU, Y. - State-of-the-art Report on Materials and Design of SCC. International Workshop on SCC, 1998, p. 160-190.
- [8] NEPOMUCENO, M.C.S.; OLIVEIRA, L.A.P.; LOPES, S.M.R. - Methodology for mix design of the mortar phase of SCC using different mineral additions in binary blends of powders. Construction and Building Materials, 26, 2012, p. 317-326.
- [9] NEPOMUCENO, M.C.S. - Metodologia para a composição de betões auto-compactáveis. Tese de Doutoramento, Universidade da Beira interior, Portugal, 2005.