

Optimização de argamassas destinadas ao BAC com diferentes tipos de cimento

Sandra Nunes¹ João Pereira² Catarina Coelho³ António Mesquita⁴

Paula Milheiro Oliveira⁵ Joana Sousa Coutinho⁶ Joaquim A. Figueiras⁷

RESUMO

Além de existir uma variedade grande de materiais que é possível combinar para obter um betão auto-compactável (BAC), nomeadamente cimento, adições, superplastificante, agente de viscosidade e agregados, a interacção entre eles na mistura é, muitas vezes, difícil de prevêr. Daí que seja necessário dispôr de ferramentas e desenvolver metodologias cientificamente mais fundamentadas tais como a utilização de técnicas estatísticas/numéricas para modelar as propriedades do material.

O objectivo do presente estudo consistiu em otimizar a composição de argamassas destinadas ao betão auto-compactável, incluindo diferentes tipos de cimento. Para tal foi desenvolvido um programa experimental segundo um plano factorial aumentado, fez-se uma análise estatística dos dados recolhidos e ajustaram-se modelos numéricos para descrever as propriedades relevantes das misturas, nos estados fresco e endurecido. A partir dos modelos numéricos ajustados, a composição da argamassa foi otimizada de modo a exibir propriedades adequadas para a auto-compactabilidade. A gama de valores dos parâmetros da argamassa onde é possível encontrar um balanço entre deformabilidade e viscosidade adequado ao BAC foi definida e é apresentada sob a forma de diagramas de interacção para seis tipos de cimento distintos. Neste trabalho evidencia-se a utilidade destes diagramas de interacção para o controle de qualidade do BAC, para a concepção de betões dimensionados à medida dos critérios de desempenho e para a selecção dos materiais constituintes. Este artigo realça também a importância das variações no cimento, decorrentes do próprio processo produtivo, para a robustez das composições de BAC.

PALAVRAS-CHAVE

Betão auto-compactável; cimentos; plano factorial; optimização

¹ LABEST/FEUP, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, 4200-465 Porto, Portugal. snunes@fe.up.pt

² CIMPOR Indústria de Cimentos, S.A. Av. Severiano Falcão, 8 2685-378 Prior Velho. JPereira@cimpopor.pt

³ CIMPOR Indústria de Cimentos, S.A. Av. Severiano Falcão, 8 2685-378 Prior Velho. ccoelho@cimpopor.pt

⁴ CIMPOR Indústria de Cimentos, S.A. Av. Severiano Falcão, 8 2685-378 Prior Velho. amesquita@cimpopor.pt

⁵ CEC/FEUP, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, 4200-465 Porto, Portugal. poliv@fe.up.pt

⁶ LABEST/FEUP, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, 4200-465 Porto, Portugal. jcouti@fe.up.pt

⁷ LABEST/FEUP, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, 4200-465 Porto, Portugal. jafig@fe.up.pt

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o LABEST/FEUP tem vindo a desenvolver uma linha de investigação dedicada à tecnologia do betão auto-compactável (BAC), cuja principal característica assenta na eliminação da necessidade de vibração. Apesar das inúmeras vantagens que decorrem da utilização do BAC, a auto-compactabilidade não se alcança através de uma receita simples, fácil de se reproduzir de uma central de produção para outra. Com a variedade grande de materiais que é possível combinar para obter um betão auto-compactável (BAC), nomeadamente cimento, adições, superplastificante, agente de viscosidade e agregados, a interacção entre eles na mistura é, muitas vezes, difícil de prevêr e com relativa frequência surgem problemas originados por incompatibilidades cimento-superplastificante.

A maioria das abordagens no dimensionamento das composições do BAC adoptam um procedimento por tentativa-erro com a realização de diversas amassaduras até se alcançar um balanço adequado entre deformabilidade, fluidez, estabilidade e propriedades mecânicas. O procedimento mais comum consiste em, para cada amassadura, introduzir uma variação apenas num dos parâmetros e estudar a sua influência nas propriedades do material. No entanto, este procedimento não permite determinar a influência relativa dos diferentes parâmetros da mistura nem das suas interacções nas propriedades do material. Uma abordagem mais correcta, quando estão envolvidos vários parâmetros, consiste em conduzir as experiências segundo um Plano Factorial [1]. Num plano factorial são introduzidas variações nos diversos parâmetros, simultaneamente, e não apenas em um de cada vez, o que permite avaliar eventuais efeitos de interacção entre os parâmetros da mistura. As experiências são planeadas com o objectivo de recolher informação de boa qualidade que, posteriormente, pode ser analisada recorrendo a métodos estatísticos, e daí extrair conclusões válidas e objectivas, envolvendo um número mínimo de experiências [1].

A reologia das pastas de cimento e, por sua vez, das argamassas e betões pode ser influenciada por diversos factores, nomeadamente: a quantidade e o tipo de superplastificante; a composição química do cimento (em particular, o conteúdo em C_3A e a quantidade de sulfatos solúveis disponível durante o período de trabalhabilidade do betão); a superfície específica do cimento; a presença de adições ou outro tipo de adjuvantes; aspectos tecnológicos como a intensidade e o procedimento de mistura e aspectos ambientais como a temperatura [2]. O presente estudo centra-se na importância do cimento e da interacção cimento-adição-superplastificante para se alcançarem as propriedades da auto-compactabilidade. Dado que existe algum consenso relativamente às propriedades que a argamassa deve exibir, no estado fresco, para se adequar a um BAC, levou-se a cabo um estudo com o objectivo de otimizar a composição de argamassas destinadas ao BAC, incluindo diferentes tipos de cimento. Posteriormente, a partir de composições optimizadas, avaliaram-se as alterações nas propriedades da argamassa devido a variações nas características dos cimentos que decorrem do próprio processo produtivo. Finalmente, num estudo ao nível do betão avaliou-se a influência das características da pasta na composição final do BAC.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Caracterização dos materiais

As argamassas estudadas incorporaram areia normalizada, fíler calcário (Micro 100, Comital), superplastificante (V3000, Sika) e diferentes tipos de cimento (CEM II/A-L 42.5R; CEM I 52.5R; CEM I 42.5 R; CEM II/B-L 32.5 N; CEM IV B(V) 32.5 N e CEM II/B-L (BR) 32.5R). A caracterização química e física dos diferentes cimentos e do fíler calcário utilizados é apresentada no Quadro 1. A dimensão média das partículas do fíler calcário é 4.5 μm . A areia normalizada é uma areia natural rolada (0.08mm - 2 mm) com uma massa volúmica de 2572 kg/m^3 e um coeficiente de absorção de 0.68%. O superplastificante V3000 é constituído por carboxilatos modificados e apresenta um peso específico de 1.05 e 18.5% de conteúdo em sólidos.

Quadro 1. Caracterização química e física dos cimentos e filer calcário utilizados (cedida pelos fornecedores)

Material:	A	B	C	D	E	F	G
SiO ₂ (%)	18.71	18.76	17.41	14.35	30.95	17.63	--
Al ₂ O ₃ (%)	5.47	5.31	5.03	4.2	12.9	2.24	<0.4
Fe ₂ O ₃ (%)	3.05	3.23	2.98	2.54	4.85	0.39	0.04
CaO (%)	63.96	63.19	62.26	58.87	41.6	64.88	--
MgO (%)	1.8	1.71	1.7	1.36	1.78	0.59	--
SO ₃ (%)	3.25	3.04	2.84	3.27	1.41	2.94	--
NaO ₂ eq. (%)	0.78	0.86	0.75	0.62	1.25	--	--
CaO livre (%)	2.67	1.38	1.15	1.24	1.43	1.88	--
Perda ao fogo (%)	1.92	2.72	5.82	12.74	2.58	10.71	43.10
CaCO ₃ (%)	--	--	--	--	--	--	99.0
Densidade (g/cm ³)	3.13	3.16	3.11	3.02	2.81	2.95	2.70
Blaine (cm ² /g)	3830	3270	3710	4230	3830	4620	5150
retidos 45µm (%)	2.8	13	13.4	16.3	4.0	1.7	--
fc (MPa)							
2 dias	38.9	31.4	29.3	21.2	17.5	22.9	--
7 dias	54.3	46.9	43.6	32.1	28.3	35.5	--
28 dias	62.7	56.4	52.2	38.3	39.7	44.7	--
Ensaio Vicat							
Inicio presa (min.)	135	145	150	125	145	130	--
Fim de presa (min.)	175	195	195	225	280	195	--

A: CEM I 52.5R; **B:** CEM I 42.5R; **C:** CEM II/A-L 42.5 R; **D:** CEM II/B-L 32.5 N
E: CEM IV B(V) 32.5 N; **F:** CEM II/B-L (BR) 32.5R; **G:** filer calcário (Micro 100,Comital)

2.2 Plano factorial aumentado (CCD), variáveis independentes e de resposta

Para descrever as propriedades da argamassa adoptou-se um plano factorial 2^4 correspondente a $k=4$ factores e 2 níveis em cada factor. Os quatro parâmetros seleccionados para definir a composição da argamassa e estabelecer os modelos foram: a razão volumétrica água/finos (V_w/V_p); a razão filer/cimento, em massa, (w_f/w_c); a razão superplastificante/ total de finos, em massa (S_p/p) e a relação entre o volume de areia e o volume de argamassa (V_s/V_m). A escolha destes parâmetros baseou-se no método desenvolvido por Okamura et al. [3]. O plano factorial 2^4 foi aumentado com 4 pontos centrais e pontos axiais a uma distância $\alpha = 2.0$ do centro, resultando no designado “Central Composite Design” (CCD), correspondendo a um total de 28 experiências. Os dados recolhidos com as experiências previstas num CCD permitem estabelecer um número de equações independentes suficiente para determinar todos os coeficientes presentes num modelo de segunda ordem [1].

Para cada uma das experiências previstas no plano foram realizados os ensaios de espalhamento e de fluidez (funil-V) da argamassa de acordo com os procedimentos descritos em [3]. Após estes ensaios foram moldados 3 cubos (7cm de aresta) de cada mistura. Os provetes foram desmoldados com 1 dia de idade e colocados numa câmara húmida (Temperatura = 20 °C e HR =95-98%) onde foram mantidos até à idade de ensaio. Estes provetes serviram para avaliar a tensão de rotura à compressão simples aos 28 dias de idade da argamassa. Com este conjunto de ensaios foram recolhidos dados para as seguintes variáveis de resposta: diâmetro de espalhamento (Desp); tempo necessário para escoar a argamassa no funil V (T_{funil}) e resistência à compressão aos 28 dias (fc_{28dias}).

2.3 Modelos ajustados

A análise estatística dos dados recolhidos no âmbito deste programa experimental foi efectuada recorrendo a um software comercial específico (“Design-Expert 7”) [4]. Tal como foi referido anteriormente, com os dados recolhidos a partir de um CCD é possível ajustar um modelo quadrático a cada variável de resposta. Os coeficientes no modelo foram estimados através de uma análise de regressão multilinear. Os modelos obtidos para cada variável de resposta, nas argamassas que incluem

CEM I 42,5R, bem como os respectivos coeficientes de correlação e a parcela do erro são apresentados no Quadro 2. Os valores do desvio padrão dos resíduos relativos aos modelos do Desp, Tfunil (sem transformação) e fc,28 foram 3.07, 0.27 e 1.73, respectivamente. Estes valores estão relativamente próximos dos desvios obtidos nos pontos centrais, correspondentes ao erro experimental (ver Quadro 3), o que é indicativo de um bom ajuste. Mais detalhes sobre a análise efectuada são fornecidos em [5]. Os modelos ajustados para descrever Desp, Tfunil e fc,28 dias variaram com o tipo de cimento, no entanto, a qualidade dos ajustes foi semelhante à dos modelos aqui apresentados para o CEM I 42,5 R.

Quadro 2. Modelos ajustados (variáveis independentes normalizadas), CEM I 42.5R

propriedade	Desp (mm)	[Tfunil (s)] ^{0.5}	fc,28 dias (MPa)
termo independente	282.67	0.504	70.862
Vw/Vp	11.16	0.093	-0.243
w/c	28.03	0.078	-3.543
Sp/p	18.51	0.022	1.014
Vs/Vm	-11.82	-0.045	0.054
(Vw/Vp)×(w/c)	1.92	0.015	1.796
(Vw/Vp)×(Sp/p)	-1.92	SS	SS
(Vw/Vp)×(Vs/Vm)	SS	-0.006	SS
(w/c)×(Vs/Vm)	2.11	SS	SS
(w/c) ²	-6.16	-0.009	SS
(Sp/p) ²	-2.41	SS	1.187
(Vs/Vm) ²	SS	SS	0.689
parcela do erro, ε (*)			
média	0	0	0
desvio padrão	3.072	0.011	1.734
R ² / R ² _{ajustado}	0.993/0.989	0.992/0.989	0.839/0.783

SS: variável sem significado para o modelo; (*) os resíduos seguem uma lei normal e não foi detectada auto-correlação nos resíduos

Quadro 3. Descrição estatística dos resultados obtidos nos pontos centrais, CEM I 42.5 R

n=4 pontos centrais	Desp (mm)	Tfunil (s.)	fc,28 dias (MPa)
mínimo	278	3.7	68.1
máximo	283	4.1	72.7
média	280	4.0	70.9
desvio padrão	2.6	0.2	1.97
coeficiente de variação	0.9%	4.9%	2.8%

2.4 Optimização das misturas

Com a metodologia descrita anteriormente obtiveram-se modelos numéricos que permitem descrever o diâmetro de espalhamento e o tempo de escoamento pelo funil em função das quatro variáveis independentes w/c, Vw/Vp, Sp/p e Vs/Vm. As argamassas óptimas do ponto de vista da auto-compactabilidade devem apresentar um diâmetro de espalhamento próximo de 260 mm associado a um tempo de escoamento no funil próximo de 10 s. Desta forma, para cada par de valores (Vs/Vm; w/c) procurou-se a solução que satisfaz o sistema de equações seguinte

$$\left\{ \begin{array}{l} desp(w/c; Vw/Vp; Sp/p; Vs/Vm) = 260 \\ tfunil(w/c; Vw/Vp; Sp/p; Vs/Vm) = 10 \\ Vs/Vm = c_1 \\ w/c = c_2 \end{array} \right. \quad (1)$$

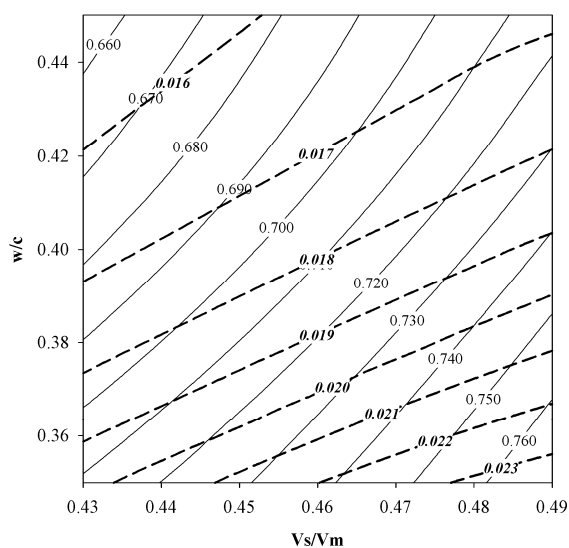
com c_1 a variar entre 0.4 e 0.5, por intervalos de 0.01, e c_2 a variar entre 0.3 e 0.5, por intervalos de 0.01. Neste estudo não foi imposta nenhuma condição relativamente à resistência aos 28 dias.

3. RESULTADOS OBTIDOS

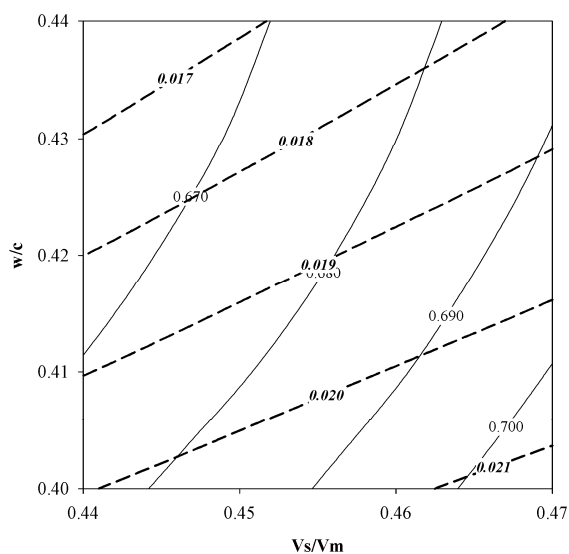
As soluções optimizadas encontradas para cada tipo de cimento estão representadas na Figura 1 através de diagramas de interacção com isocurvas. Adicionalmente, foi possível obter uma estimativa da resistência à compressão de cada uma das soluções encontradas tal como exemplificado na Figura 2 para o caso do CEM I 42,5 R.

Com este estudo comprovou-se que não existe uma solução única para a composição da argamassa adequada a um BAC. Em geral, para cada V_s/V_m , variando entre 0.40 e 0.50, encontraram-se diversas soluções para diferentes valores da razão água/cimento, a que correspondem diferentes níveis da resistência à compressão aos 28 dias. A região correspondente ao conjunto de soluções óptimas variou significativamente com o tipo de cimento. Em geral, os cimentos compostos conduziram a um número mais alargado de soluções, para o tipo de adição mineral e superplastificante adoptados. Os casos com menor número de soluções (como foi o caso do CEM I 52.5 R) estão associados a dosagens de superplastificante mais elevadas o que aponta para a necessidade de utilizar um superplastificante com um efeito de dispersão mais forte. Pode ainda acontecer que durante o processo de optimização não seja encontrada nenhuma solução, o que revela uma situação de total incompatibilidade cimento-superplastificante. O CEM II /B-L 32.5 R (BR) destaca-se dos restantes cimentos pelos baixos valores da dosagem de superplastificante e pelo maior espaçamento entre as respectivas isocurvas (ver Figura 1). Isto deve-se essencialmente às diferenças na composição química, nomeadamente, menores conteúdos em Al_2O_3 e Fe_2O_3 e álcalis (Quadro 1) que terão superado o efeito negativo na fluidez de uma maior superfície específica.

Dado que estas argamassas incluem areia normalizada podem ser utilizadas como referência para o controle de qualidade, nomeadamente das variações no cimento, adições ou superplastificante decorrentes de diferentes remessas. Por outro lado, a partir destas composições optimizadas é possível seleccionar a composição da pasta e ao nível do betão optimizar apenas o esqueleto sólido (formado pelos agregados) para a pasta seleccionada, reduzindo assim o número de ensaios necessários ao nível do betão.

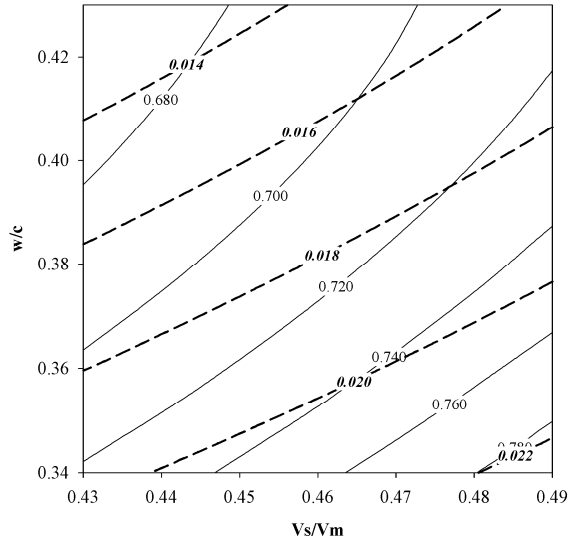


(a) CEM I 42.5 R

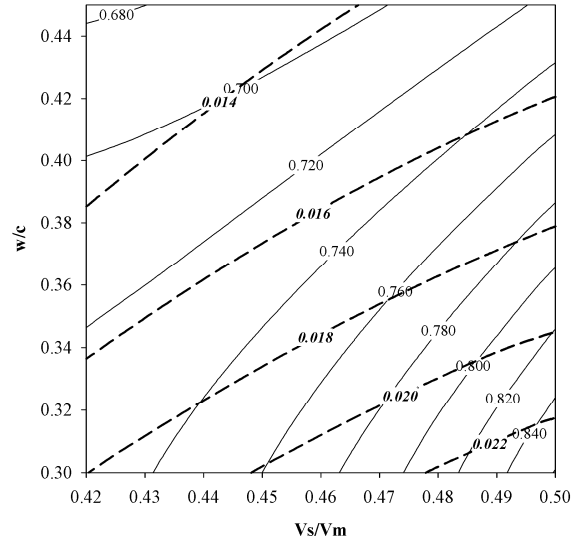


(b) CEM I 52.5 R

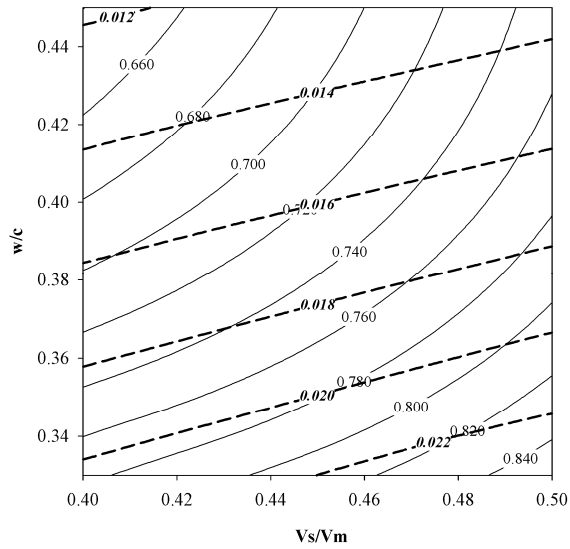
Optimização de argamassas destinadas ao BAC com diferentes tipos de cimento



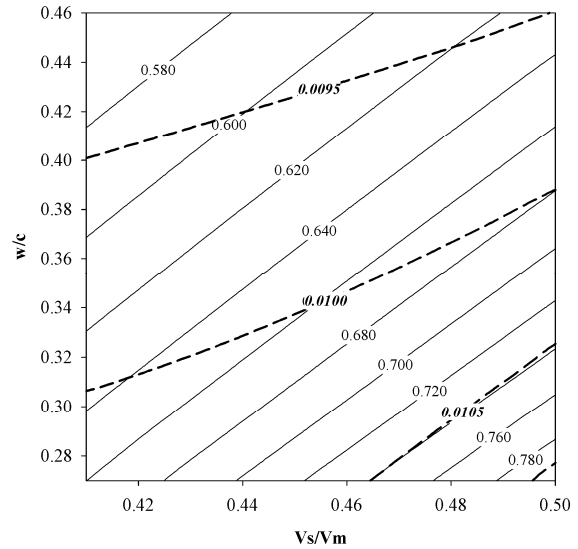
(c) CEM II/A-L 42.5 R



(d) CEM II/B-L 32.5 N



(e) CEM IV B(V) 32.5 N



(f) CEM II /B-L 32.5 R (BR)

Figura 1. Gama de valores dos parâmetros da composição para argamassas otimizadas incorporando diferentes tipos de cimento. Sp/p and Vw/Vp estão representados com linha a tracejado e linha a cheio, respectivamente.

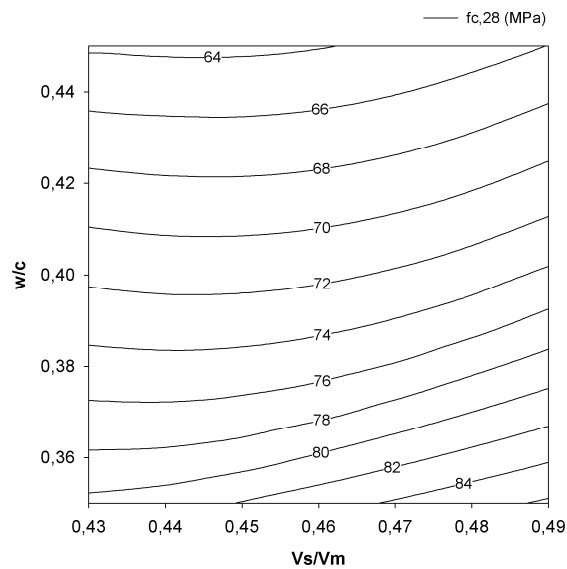


Figura 2. Valores estimados da resistência à compressão aos 28 dias das composições optimizadas incorporando CEM I 42,5 R

3.1 Controlo de qualidade (efeito de variações no cimento)

O sucesso na produção do BAC com características constantes exige uma central de produção com capacidade para controlar e manter os factores de produção. Depois da selecção inicial dos materiais constituintes, caso se altere a origem, o fornecedor ou o tipo de materiais utilizados, é provável que as propriedades do BAC se alterem significativamente, sendo necessário proceder a ajustes na composição. Estudos recentes [6] mostraram que as próprias variações que ocorrem para um dado cimento, ao longo da produção, têm uma influência grande na trabalhabilidade e nas reacções das primeiras idades, em especial nos betões de elevada trabalhabilidade incluindo superplastificantes.

No presente trabalho, partindo de composições de argamassa optimizadas para os quatro tipos de cimento mais utilizados em Portugal, nomeadamente CEM II/A-L 42.5R, CEM I 52.5R, CEM I 42.5 R e CEM II/B-L 32.5 N desenvolveu-se um estudo destinado a avaliar as alterações nas propriedades das argamassas optimizadas induzidas pelas variações nas características dos cimentos, que decorrem do próprio processo produtivo. No total foram analisadas 8 entregas dos cimentos atrás mencionados com colheitas espaçadas no tempo (cerca de 1 mês), provenientes sempre da mesma fábrica. Os resultados obtidos (ver Figura 3) demonstraram que as alterações nas características dos cimentos, decorrentes da própria produção, podem introduzir alterações significativas nas propriedades das argamassas destinadas ao betão auto-compactável. A variação dos resultados Desp e Tfunil associada ao erro experimental é da ordem de 1% e 5%, respectivamente (ver Quadro 3). A situação mais crítica ocorreu com o CEM II/B-L 32.5 N para o qual a composição foi optimizada para a 1ª entrega, mas da 1ª para a 2ª entrega houve um aumento excessivo do diâmetro de espalhamento da argamassa acompanhado de uma redução do tempo de escoamento no funil da argamassa. Como não foi tomada nenhuma medida correctiva e as características do cimento mantiveram-se relativamente estáveis daí em diante, os resultados dos ensaios da argamassa caíram fora do intervalo de aceitação até à 8ª entrega. Isto demonstra a importância da existência de um plano de controlo de qualidade adequado que permita um ajuste da composição, quando necessário, assegurando assim a robustez da produção com o BAC. Os restantes cimentos estudados apresentaram uma variação mais aleatória sem desvios demasiado excessivos relativamente ao intervalo de aceitação considerado.

De entre as diversas características físicas/químicas do cimento identificou-se uma variação nos conteúdos em SO_3 e $(Na_2O)_{eq}$ que possivelmente esteve na origem das variações de fluidez observadas com as argamassas que incluíram o CEM II/B-L 32.5 N (ver Figura 4). Isto demonstra que a informação do controlo de qualidade dos cimentos fornecida pelos produtores de cimento pode ser insuficiente para explicar as variações observadas nos betões que incluem adjuvantes. De notar que os ensaios normalizados previstos para a caracterização dos cimentos não prevêm a inclusão do adjuvante, logo os respectivos resultados dificilmente permitirão prever variações na trabalhabilidade/resistência dos betões modernos que incluem adjuvantes com uma capacidade de redução de água cada vez maior.

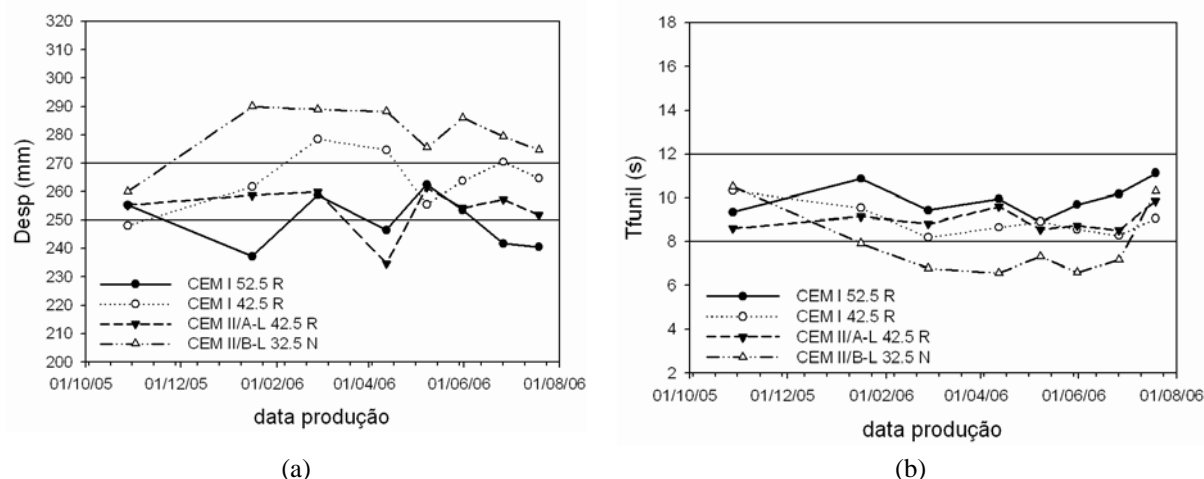


Figura 3. Variação das propriedades da argamassa com diferentes de cimento: (a) diâmetro de espalhamento (Desp); (b) tempo de escoamento no funil (Tfunil)

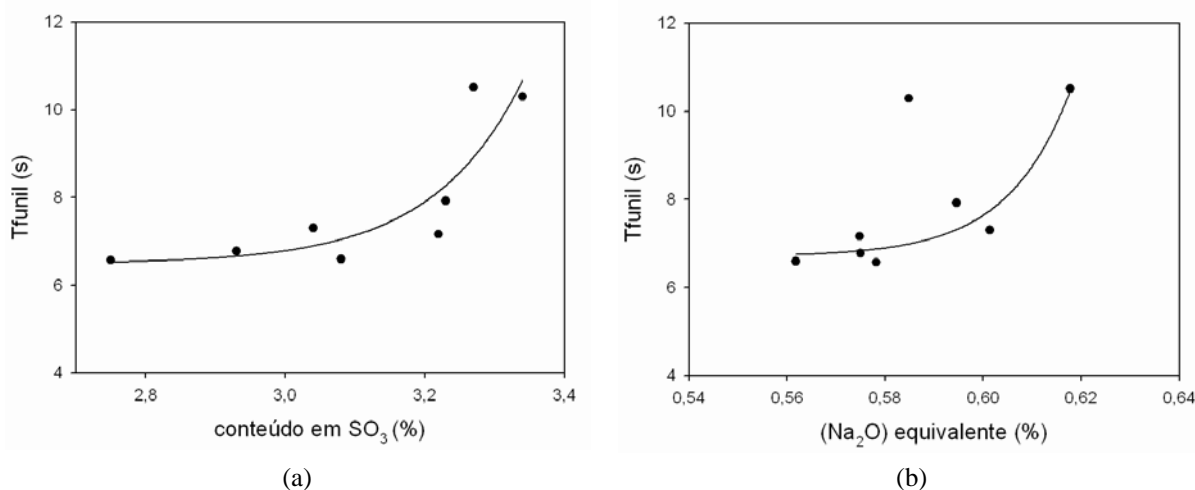


Figura 4. Efeito da composição do cimento no tempo de escoamento no funil das argamassas que contêm CEM II/B-L 32.5 N: (a) conteúdo em SO_3 e (b) conteúdo em $(Na_2O)_{equivalente}$

3.2 Optimização da composição ao nível do betão

Com o intuito de avaliar a influência das propriedades da pasta na composição final de um BAC, foram desenvolvidos dois programas experimentais ao nível do betão incorporando uma pasta mais fluída (Pasta A) e uma pasta menos fluída (Pasta B). As pastas A e B foram retiradas do conjunto de argamassas optimizadas com CEM II/A-L 42,5 R (Figura 1(c)). A Pasta A corresponde a uma argamassa com $V_s/V_m=0.50$ e caracteriza-se por: $w/c=0.45$; $V_w/V_p=0.713$; $Sp/p=1.58\%$. A Pasta B corresponde a uma argamassa com $V_s/V_m=0.45$ e caracteriza-se por: $w/c=0.37$; $V_w/V_p=0.719$; $Sp/p=1.83\%$. Ao nível do betão desenvolveu-se um programa experimental baseado num CCD, semelhante ao aqui descrito para os estudos ao nível da argamassa. Fixando a composição da pasta, ao nível do betão é necessário ajustar apenas os valores dos parâmetros da mistura relacionados com o esqueleto sólido, nomeadamente, o conteúdo em agregado grosso ($V_g/V_{g,lim}$), o conteúdo em agregado fino na argamassa (V_s/V_m) e a relação (em massa) entre as duas areias que constituem o agregado fino ($s1/s$), logo reduz-se significativamente o número de ensaios que é necessário realizar ao nível do betão.

A Figura 5 representa a gama de valores de $V_g/V_{g,lim}$ e V_s/V_m (fixando $s_1/s=0.50$) onde se podem encontrar composições de BAC pertencentes às classes SF2, VF2 e PL2, de acordo com a Draft pr EN 206-9:2007 [7], e incorporando as pastas A e B. De notar que dependendo do tipo de aplicação poderá ser necessário especificar adicionalmente uma classe de resistência à segregação SR_i [7]. Na Figura 5 Dflow, Tfunnel e H2/H1 referem-se ao diâmetro final de espalhamento do betão, ao tempo de escoamento do betão no funil-V e à relação entre as alturas do betão na parte final e na coluna da caixa-L, respectivamente. Da análise destas figuras pode concluir-se que a pasta mais fluida conduz a composições de BAC mais ricas em agregado fino e menor conteúdo em agregado grosso, enquanto que a pasta menos fluida (B) permite incorporar maiores conteúdos em agregado grosso associados a menores conteúdos de agregado fino na argamassa. De notar que as áreas indicadas na Figura 5 são válidas para o conjunto de agregados utilizados: 2 areias naturais roladas e 1 brita calcária (dimensão máxima de 16 mm). Caso se utilizem agregados menos favoráveis, por exemplo, areias britadas, um agregado grosso de maiores dimensões, é provável que a mancha de soluções seja menor ou pode mesmo acontecer que não existam soluções, principalmente com as pastas mais fluidas.

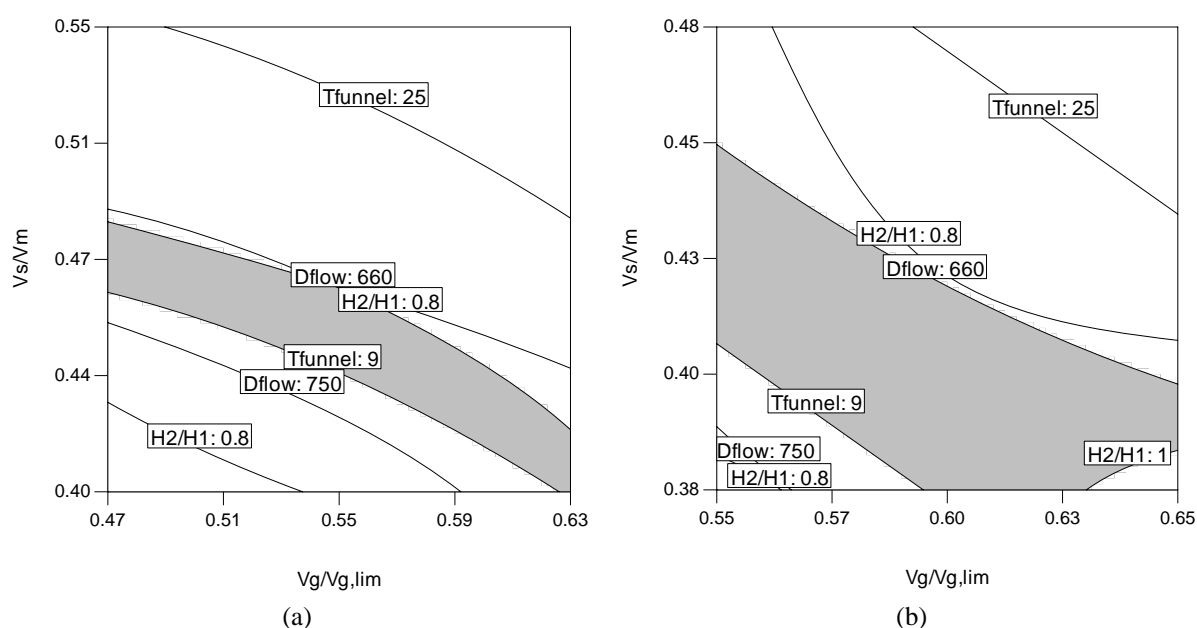


Figura 5. Gama dos parâmetros da mistura onde é possível encontrar um BAC (SF2+VF2+PL2) incorporando: (a) a pasta A e (b) a pasta B, e mantendo $s_1/s=0.50$ e $Var=0.022$

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No âmbito deste trabalho foram desenvolvidas ferramentas e metodologias cientificamente mais fundamentadas capazes de caracterizar as diversas misturas de materiais de matriz cimentícia, prever e resolver as incompatibilidades que surgirem. As experiências (ao nível da pasta, argamassa e betão) foram planeadas com o apoio de ferramentas estatísticas (planos factoriais), o que permitiu a modelação numérica das propriedades relevantes do material, nos estados fresco e endurecido, e a optimização das composições.

As propriedades da pasta e as características do esqueleto sólido formado pelos agregados têm que ser consideradas em conjunto para prever o comportamento do betão (ou argamassas). Com este estudo comprovou-se que não existe uma solução única para a composição da argamassa adequada a um BAC. Em geral, para cada V_s/V_m , variando entre 0.40 e 0.50, encontraram-se diversas soluções para diferentes valores da razão água/cimento, a que correspondem diferentes níveis da resistência à compressão aos 28 dias. Esta investigação abre o caminho para o fabrico de betões “dimensionados à medida” das exigências de desempenho, tanto no estado fresco

como no estado endurecido, o que se traduz num melhor uso dos recursos existentes e, consequentemente, numa poupança no consumo de materiais.

O estudo levado a cabo para as diferentes entregas dos tipos de cimento mais consumidos em Portugal permitiu demonstrar a influência das alterações nos cimentos, decorrentes do processo produtivo, na trabalhabilidade do BAC e a importância de um controle de qualidade adequado para assegurar a robustez da produção com BAC. Por outro lado, demonstrou-se que a informação do controlo de qualidade dos cimentos pode ser insuficiente para explicar as variações observadas nos betões que incluem superplastificantes.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado no âmbito do projecto POCTI/ECM/61649/2004 financiado pela FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito do Programa Operacional Ciência e Inovação 2010 (POCI) participado pelo FEDER e por Fundos Nacionais. Este trabalho de investigação foi apoiado também pela FCT através da Bolsa de Doutoramento SFRH/BD/25552/2005. Os autores agradecem ainda a colaboração das empresas CIMPOR Indústrias de Cimento, SA; a CIMPOR_TEC, SA; COMITAL e SIKA.

REFERÊNCIAS

- [1] MONTGOMERY, D.C. - Design and analysis of experiments. 5th ed. New York: John Wiley & Sons, 2001, 684 p. ISBN 0-471-31649-0
- [2] SAKAI, E.; YAMADA, Y.; OHTA, A. - Molecular structure and dispersion-adsorption mechanisms of comb-type superplasticizers used in Japan. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003, p.16-25.
- [3] OKAMURA, H.; OZAWA, K.; OUCHI, M. – Self-compacting concrete. *Structural Concrete*, 2000, p. 3-17.
- [4] STATE-EASE CORPORATION. Design-Expert software, version 6 user's guide; 2000.
- [5] NUNES, S. [et al.] - Interaction diagrams to assess SCC mortars for different cement types. *Construction and Building Materials*. In Press, Corrected Proof (available on-line).
- [6] Wallevik, O. H.; KUBENS, S.; MULLER, F. - Influence of cement-admixture interaction on the stability of production properties of SCC. SCHUTTER, G.; BOEL, V. ed. - *Self-Compacting Concrete: proceedings of the 5th International RILEM symposium*. Ghent, RILEM, (2007), p. 211-216.
- [7] Draft prEN 206-9. 2007, Concrete - Additional Rules for Self-compacting Concrete (SCC). Brussels : CEN. 28 p.