

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/275545828>

Aplicabilidade de Métodos de Estudo da Composição de Betão Auto-Compactável (BAC)

Conference Paper · December 2007

CITATIONS

2

READS

47

3 authors, including:



Jorge de Brito

University of Lisbon

1,261 PUBLICATIONS 9,321 CITATIONS

SEE PROFILE



Pedro Raposeiro da Silva

Instituto Politécnico de Lisboa

43 PUBLICATIONS 186 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



MAEC - Portuguese Method for Buildings Condition Assessment [View project](#)



BARPINP - Concrete with recycled aggregates generated from precast elements [View project](#)

APLICABILIDADE DE MÉTODOS DE ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL (BAC)

Pedro M. Silva

Encarregado de trabalhos - ISEL
Lisboa

silvapm@dec.isel.ipl.pt

Jorge C. de Brito

Professor Associado Agregado - IST
Lisboa

jb@civil.ist.utl.pt

João B. Costa

Professor Adjunto - ISEL
Lisboa

jbarrento@dec.isel.ipl.pt

Resumo

O presente artigo tem como objectivo apresentar os resultados obtidos na campanha experimental para o estudo de verificação da aplicabilidade técnica de dois métodos de cálculo de composição de betão auto-compactável - BAC - propostos por investigadores nacionais em trabalhos anteriores.

Com o referido estudo, pretendeu-se, através dos métodos em análise, identificar o método que permite de um modo mais simples, sem necessidade de recorrer a um grande número de amassaduras experimentais, obter as características requeridas aos BAC, tanto no estado fresco como no endurecido.

Da análise de resultados efectuada, é possível a comparação entre os métodos estudados e a verificação da sua aplicabilidade, bem como identificar quais os factores que condicionam o processo de cálculo de amassaduras de BAC.

Palavras-chave: betão auto-compactável, métodos de estudo de composição.

1 Introdução

Para atingir os valores prescritos de resistência e a durabilidade exigida, o betão colocado em obra depende, entre outros factores, de uma compactação eficiente. Por outras palavras, independentemente de todas as precauções, tanto na escolha dos materiais como na produção e transporte do betão, a compactação insuficiente tem como principal consequência uma redução muito importante no desempenho desse mesmo betão.

A evolução do sector da construção, com todos os problemas relacionados com o aumento da mão-de-obra não especializada, tem tido como consequência, no caso específico da compactação do betão, que esta seja realizada por vibradores operados por trabalhadores sem qualquer formação específica. Sendo esta uma tarefa de difícil supervisão, são habitualmente necessários trabalhos posteriores de reparação difíceis de executar e normalmente dispendiosos.

Aparece assim a necessidade de desenvolvimento de um novo processo que possa dar resposta a todos os problemas expostos. Essa resposta foi dada com o desenvolvimento no Japão, na década de 80 do século XX, do BAC, o betão auto-compactável. Pode assim definir-se BAC como sendo um betão que, pelo seu próprio peso e com a energia cinética resultante da aplicação, seja capaz de fluir sem segregar, preenchendo todos os espaços, independentemente da presença de armaduras e da geometria da cofragem que constituem obstáculos importantes.

Actualmente, esta nova tecnologia BAC tem vindo a desenvolver-se gradualmente em outros países para além do Japão, tais como Tailândia, Taiwan, Coreia, Canadá, Suécia, Holanda, entre muitos outros. Existem inclusivamente em Portugal alguns exemplos de aplicação deste novo material.

Não obstante, este novo material continua a ser encarado por muitos mais como um “betão especial” do que como um betão com potencialidades para uma utilização “corrente”. Para tal têm contribuído inúmeras razões, sendo no entanto de salientar a falta de métodos de composição expeditos de modo a obter as exigências requeridas. Por outras palavras, faltam métodos de composição adequados de forma a obter misturas com desempenhos diferentes (conforme o prescrito para cada situação) usando os materiais disponíveis localmente, independentemente de cada empresa ter o seu *know-how* próprio a partir da sua experiência e da capacidade dos seus técnicos. No que diz respeito aos métodos de composição de amassaduras, existem já várias propostas das mais simples às mais complexas. Têm-se desenvolvido, nomeadamente em Portugal, alguns trabalhos de investigação nessa área, sendo de destacar os de Ferreira [1] e Nepomuceno [2].

Os dois trabalhos propõem metodologias de cálculo de amassaduras tendo por base o método proposto por *Okamura et al* [3] e pela *JSCE* [4]. No caso do primeiro, recorre-se também ao método de *Faury*, através da proposta de uma curva de referência para BAC e da adequação dos parâmetros usados correntemente no método das curvas de referência. No segundo, introduzem-se novos parâmetros (relativamente ao método proposto por *Okamura et al* e pela *JSCE*) que melhor se adequam ao controlo da resistência à compressão do BAC.

No presente trabalho, foram realizadas amassaduras experimentais através dos dois métodos. O estudo incidiu na produção de betões em três resistências mecânicas “alvo” (40, 55 e 70 MPa) e avaliou concretamente a consistência e resistência mecânica. Os resultados obtidos foram comparados entre si.

2 Métodos em estudo

2.1 Método proposto por Ferreira

Ferreira, através do trabalho realizado no âmbito da sua dissertação de mestrado, propõe uma nova metodologia de cálculo para o BAC tendo por base, tanto os critérios apresentados por *Okamura et al* e pela *JSCE* como o método de *Faury*. Essa proposta é concretizada através de uma curva de referência para o BAC e da adequação dos parâmetros usados correntemente no método da curva de referência de *Faury*.

Nessa metodologia, é de salientar a proposta para a expressão de obtenção da quantidade de ligante baseada na equação de *Feret*. Conforme comprova o estudo realizado pelo autor, pode constatar-se que a equação de *Feret* na sua forma original não se adapta correctamente ao BAC, tendo o referido autor realizado um ajuste do tipo $f_{c,j}=k_{i,j}\gamma^n$ e chegado à conclusão de que o valor de n que melhor se adequa ao BAC é igual a 3.

Assim, a expressão para a quantificação do ligante fica semelhante à de *Feret*, mas sujeita ao referido ajuste [1]:

$$f_{c,j}=k_{i,j}\gamma^3 \quad (1)$$

em que:

- $f_{c,j}$ - valor da tensão de rotura à compressão (MPa) do betão j dias após amassadura;
 $k_{i,j}$ - parâmetro determinado em função das características do ligante e da idade;
 γ - compacidade da pasta ligante enquanto fresca.

É ainda de referir as alterações introduzidas para o traçado da curva de referência do BAC. Considerando a parte sólida do volume de betão dividida em três grandes porções (*1ª agregado grosso - fracção entre $D_{máx}$ e 4.76 mm; 2ª agregado médio e fino - fracção entre 4.76 e 0.074 mm; 3ª fracção abaixo dos 0.074 mm - constituída essencialmente por cimento e adições*) e tomando por base os critérios apresentados por *Okamura et al* e pela *JSCE* referentes ao BAC, em que se refere como aceitável considerar o volume da porção correspondente ao agregado grosso (fracção entre $D_{máx}$ e 4.76 mm) com 50% da totalidade dos agregados e dependendo este volume da quantidade de grossos que se pretende na mistura, é assim possível reformular a equação da curva de referência de *Faury* e adaptá-la a estes novos pontos. Assim sendo, o 1º ponto mantém-se e corresponde ao $D_{máx}$; o ponto de inflexão da curva (2º ponto), que no caso da curva de *Faury* é em $D_{máx} / 2$, passa, no caso dos BAC, para o ponto $D = 4.76$ mm; o último ponto pretende corresponder à separação entre a fracção do agregado (fino e médio) e a porção constituída essencialmente por cimento e adições. Conhecendo as abcissas, é possível a determinação das coordenadas dos pontos da curva de referência para o BAC que correspondem a:

$$p'(4.76) = 50 + G \quad (2)$$

$$p'(0.074) = P_{c+s} + F \quad (3)$$

em que:

- G - parâmetro dependente da máxima dimensão do agregado (proposto por Ferreira no seu trabalho);
 F - função da quantidade de pó (cimento mais adições) presentes na mistura (proposto por Ferreira no seu trabalho);
 p_{c+s} - percentagem em volume absoluto de cimento e eventualmente adições, em relação à totalidade de material sólido.

2.2 Método proposto por Nepomuceno

Essa nova metodologia tendo por base os métodos japoneses, nomeadamente o método *Okamura et al* e o da *JSCE*, introduz novos parâmetros (relativamente aos métodos de referência) que se adequam melhor ao controlo da resistência à compressão.

Na prática, esta nova metodologia assenta por exemplo em considerar como variáveis alguns dos parâmetros até então considerados como constantes, na introdução de um novo parâmetro designado “número de mistura”, e na consideração de um intervalo de valores para os parâmetros reológicos em vez de trabalhar com um único par de valores, entre outros.

Na sua proposta, Nepomuceno divide o estudo de composição de BAC em quatro etapas principais: 1º definição dos dados essenciais de base; 2º opções de base relativamente aos materiais; 3º estudo em argamassas; 4º estudo em betões.

Os dados essenciais de base e as opções relativamente aos materiais são todos os elementos necessários para a definição das propriedades, tanto no estado fresco como endurecido, a que o BAC a produzir tem de dar resposta.

A separação do estudo em argamassas e betões simplifica o processo de estudo de composição. A definição com recurso a argamassas das quantidades de água, adjuvante e da percentagem de substituição de cimento por adições facilita o referido processo através da redução significativa do número de

amassaduras em betão. Fica desse modo reservado para a fase do estudo em betões apenas o cálculo da razão entre a quantidade de argamassa e de agregado grosso.

3 Campanha experimental

3.1 Materiais utilizados

Os materiais utilizados no presente trabalho foram seleccionados em função dos métodos de cálculo em análise e de acordo com o disponível no mercado na zona de Lisboa. Desse modo, foram utilizados dois tipos de cimento, o tipo II/B-L 32,5N e o tipo I-42,5R fornecidos pela fábrica da Cimpor de Alhandra; duas adições, cinzas volante da central termoeléctrica de Sines e fíler calcário da empresa Parapedra em Rio Maior; 2 britas de origem calcária, brita 1 e 2, e duas areias siliciosas, uma grossa e uma fina, tudo da zona de Pêro Pinheiro; e um adjuvante do tipo superplastificante / forte redutor de água de terceira geração para betão, da família dos carboxilatos modificados e de referência SIKA ViscoCrete - 3000.

3.2 Estudo prévio

3.2.1 Introdução

A aplicação de cada um dos métodos é feita com recurso a procedimentos distintos, tanto em termos da selecção dos vários constituintes como do cálculo das quantidades de amassadura. Desse modo e considerando que o principal objectivo do presente trabalho é a verificação da aplicabilidade dos métodos em estudo, houve a necessidade de tomar algumas opções relativamente à aplicação concreta dos referidos métodos. Nesse sentido, relativamente às adições utilizadas, optou-se pelo fíler calcário no método de Nepomuceno enquanto que no de Ferreira se utilizou cinzas volantes. No fabrico dos betões de resistência “alvo” 40 e 55 MPa, o método de Nepomuceno permitiu a utilização de cimento tipo IIB-L32.5N. Apesar de, no primeiro método em estudo, só se ter utilizado cimento do tipo I-42.5R, considerou-se que, sendo o principal objectivo o de comparar a aplicabilidade dos métodos, estas diferenças podem e devem estar patentes no processo de fabrico, podendo inclusivamente estar nessas mesmas diferenças o motivo pela melhor ou pior aplicabilidade e desempenho dos métodos. Apresenta-se seguidamente o modo como cada um dos métodos em análise dá resposta ao betão exigido, tanto no estado fresco (comportamento reológico) como no estado endurecido (resistência mecânica), bem como às diferenças entre ambos.

3.2.2 Quantidades de amassadura

Na *tabela 1*, estão apresentadas as quantidades de amassadura por resistência mecânica “alvo” calculadas pelos dois métodos em estudo.

A observação da referida tabela permite efectuar a análise que se segue:

Para as resistências mecânicas “alvo” de 40 e 55 MPa, as quantidades totais de ligante (cimento + adições) são claramente inferiores nas amassaduras do método de Ferreira devido ao facto de se ter utilizado o cimento I-42,5R enquanto que no método de Nepomuceno foi utilizado o II/B-L 32,5N. Como se pode observar, para a resistência de 70 MPa, os referidos valores são mais equilibrados nos dois métodos.

Tabela 1 – Comparação das quantidades de amassadura dos métodos em estudo.

Quadro da composição estudada (1m ³)	40 MPa		55 MPa		70 MPa	
	Ferreira volume [m ³]	Nepomuceno volume [m ³]	Ferreira volume [m ³]	Nepomuceno volume [m ³]	Ferreira volume [m ³]	Nepomuceno volume [m ³]
Cimento II/B-L 32,5N (C)	---	0,109	---	0,150	---	---
Cimento I-42,5R (C)	0,095	---	0,111	---	0,130	0,128
Cinzas volantes (CV)	0,055	---	0,070	---	0,080	---
fíler calcário (FC)	---	0,109	---	0,064	---	0,085
Adjuvante (adj)	0,006	0,010	0,007	0,008	0,009	0,008
Água (A)	0,195	0,148	0,194	0,160	0,193	0,160
Areia fina	0,157	0,093	0,108	0,092	0,080	0,091
Areia grossa	0,132	0,218	0,144	0,214	0,148	0,213
Brita 1	0,138	0,170	0,132	0,170	0,128	0,170
Brita 2	0,201	0,113	0,215	0,113	0,213	0,113
Ar	0,020	0,030	0,020	0,030	0,020	0,030
Massa total [kg]	2294,52	2349,03	2302,82	2345,10	2309,92	2351,49
Agregado total	0,629	0,594	0,598	0,588	0,569	0,588
Agregado fino	0,289	0,311	0,251	0,305	0,228	0,305
Agregado grosso	0,340	0,283	0,347	0,283	0,341	0,283
Material pulverulento	0,150	0,218	0,181	0,214	0,210	0,213
Pasta ligante	0,371	0,406	0,402	0,412	0,431	0,412
Argamassa	0,660	0,717	0,653	0,717	0,659	0,717
Parte sólida	0,779	0,812	0,779	0,802	0,779	0,801
Parte líquida	0,221	0,188	0,221	0,198	0,221	0,199

A diferente abordagem dos dois métodos reflecte-se claramente no tipo e na quantidade de adições utilizadas. Observa-se um valor de substituição constante de 30% no método de Ferreira e valores que variam desde 20 até 50% para o método de Nepomuceno.

Relativamente à necessidade de superplastificante, pode observar-se que os valores referentes ao primeiro método (de Ferreira) são sempre inferiores, enquanto que no caso da quantidade de água os mesmos são sempre superiores. Tal deve-se essencialmente ao facto de a quantidade de superplastificante neste método depender exclusivamente da variação na quantidade de ligante, enquanto que no de Nepomuceno esse valor depende de uma conjugação de vários parâmetros tais como as quantidades de materiais finos e de água bem como o tipo e a quantidade de adições. No caso do método de Nepomuceno, a utilização de fíler calcário conjugada com percentagens de substituição mais elevadas consegue quantidades de água significativamente inferiores sem no entanto comprometer o comportamento reológico do BAC.

Do exposto até ao momento, é possível observar as diferenças de abordagem em termos de quantidades de amassadura nos dois métodos com o aumento do valor da resistência mecânica “alvo”. O método de Ferreira interfere de um modo mais convencional em todas as quantidades, nomeadamente no volume de agregado, aumentando a quantidade de agregado grosso (com excepção para o “alvo” de 70 MPa) em detrimento do fino e ainda assim diminuindo a quantidade de agregado total. Aumenta também a quantidade de pasta ligante o que não se vai reflectir na quantidade de argamassa devido à diminuição do agregado fino. No método de Nepomuceno, modifica-se menos a quantidade total de agregado grosso (sempre em quantidades inferiores às do método anterior) e vai-se enriquecendo a argamassa com agregado fino e pasta ligante, de modo a obter as mesmas resistências mecânicas.

As variações na quantidade de argamassa, associadas ao modo de controlar a quantidades de agregado

na mistura, têm consequências em termos do comportamento do betão enquanto no estado fresco. Tal facto será demonstrado mais adiante aquando da apresentação dos quadros comparativos contendo os resultados dos ensaios de trabalhabilidade.

Através das quantidades de amassadura calculadas e das respectivas relações volumétricas, é, nesta fase, possível confrontar tais resultados com valores considerados de referência. Para tal, seleccionou-se um conjunto de valores recomendados por entidades ou autores considerados de referência em termos de BAC. Teve-se assim em conta as recomendações propostas tanto por *Okamura et al* [3] como pela *JSCE* [4]. Mais recentemente, e devido ao desenvolvimento no estudo dos BAC, surgiram algumas recomendações de organismos preocupados com a problemática, das quais se salientam as do comité técnico 174-SCC [5] da *RILEM* e as da *EPG SCC* [6] (*the European guidelines for SCC*). Optou-se por as ter igualmente em conta.

Apresentam-se na *tabela 2* os valores de referência bem como os valores obtidos em cada um dos métodos por resistência mecânica “alvo”.

Tabela 2 – Comparação com parâmetros de referência da composição.

Parâmetros da composição		RILEM	EPG SCC	JSCE	OKAMURA	40 MPa		55 MPa		70 MPa	
						RF	MN	RF	MN	RF	MN
agregado fino	[m ³ /m ³]	---	0,28 - 0,32	---	---	0,289	0,311	0,251	0,305	0,228	0,305
	[kg/m ³]	710 - 900	770 - 882	---	---	748,26	801,75	648,54	786,15	586,29	785,35
agregado grosso	[m ³ /m ³]	0,30 - 0,34	0,27 - 0,36	0,30 - 0,32	---	0,340	0,283	0,347	0,283	0,341	0,283
	[kg/m ³]	750 - 920	750 - 1000	---	---	914,62	761,33	934,77	761,33	919,33	761,33
material pulverulento	[m ³ /m ³]	---	---	0,160 - 0,190	---	0,150	0,218	0,181	0,214	0,210	0,213
	[kg/m ³]	450 - 600	380 - 600	---	---	430,19	627,70	517,74	629,17	602,28	635,78
dosagem de água	[m ³ /m ³]	0,150 - 0,200	0,150 - 0,210	0,155 - 0,175	---	0,195	0,148	0,194	0,160	0,193	0,160
pasta ligante	[m ³ /m ³]	0,340 - 0,400	0,300 - 0,380	---	---	0,371	0,406	0,402	0,412	0,431	0,412
razão em massa: água / material pulverulento		---	---	0,280 - 0,370	---	0,450	0,236	0,370	0,255	0,320	0,252
razão em volume: água / material pulverulento		0,80 - 1,20	0,85 - 1,10	---	0,90 - 1,00	1,30	0,68	1,07	0,75	0,92	0,75
razão em volume: agregado fino / argamassa		0,40 - 0,50	---	---	0,40	0,440	0,43	0,38	0,43	0,35	0,43
razão em volume: agregado grosso / agregado total		---	---	---	0,50	0,540	0,48	0,58	0,48	0,60	0,48

Ainda antes de comparar os valores de referência com os valores obtidos no presente trabalho, importa observar as diferenças em termos dos parâmetros considerados mais relevantes pelos diversos autores. Tal facto deve-se essencialmente ao método de cálculo das amassaduras de cada autor. É, no entanto, de salientar que, quando os parâmetros se apresentam comuns a dois ou mais autores, as diferenças entre eles não são significativas.

Da análise da *tabela 2*, é então possível concluir que existem alguns parâmetros fora dos intervalos recomendados como referência, nomeadamente:

- no caso do agregado fino, os valores do método de Ferreira para as resistências mais elevadas apresentam-se ligeiramente inferiores ao recomendado; em termos do agregado grosso, reflecte-se aqui uma das diferenças na abordagem dos dois métodos em estudo; enquanto que os valores de Ferreira se apresentam sempre ligeiramente acima do recomendado, os de Nepomuceno, apesar de menos distantes, apresentam-se sempre ligeiramente abaixo;
- no que diz respeito às quantidades de cimento e adições, reflecte-se o facto de no método de Nepomuceno se recorrer à argamassa como modo de atingir o comportamento reológico pretendido, ou

seja, os valores encontram-se sempre acima dos recomendados;
 – relativamente às relações volumétricas agregado fino / argamassa bem como agregado grosso / agregado total, os valores obtidos estão enquadrados com os de referência, podendo-se considerar as diferenças negligenciáveis.

De um modo geral, apesar das diferenças observadas poderem considerar-se reduzidas nos dois métodos, o de Nepomuceno enquadra-se um pouco melhor nos parâmetros recomendados.

3.3 Resultados no estado fresco

Todos os resultados anteriormente apresentados se reflectem neste subcapítulo. É nos resultados aqui comparados que residem as maiores diferenças, tanto entre um betão convencional e um BAC, como entre os BAC produzidos pelos dois métodos em estudo.

Apresentam-se seguidamente os quadros comparativos dos valores médios obtidos nos vários ensaios realizados bem como a análise dos mesmos. Importa no entanto ter presente, na análise destes resultados, as diferenças nas quantidades de amassadura dos dois métodos em estudo bem como o modo de abordagem específico de cada um deles.

3.3.1 Ensaio de espalhamento

Os resultados apresentados na *tabela 3* permitem essencialmente avaliar as velocidades de deformação e os diâmetros de espalhamento de um BAC. É possível observar que, tanto em termos de tempo de espalhamento (T_{50}) como de diâmetros, os resultados obtidos pelo método de Nepomuceno são em média superiores aos de Ferreira.

Tabela 3 – Valores médios obtidos no ensaio de espalhamento.

Resistência mecânica "alvo"	Ensaio de espalhamento			
	T_{50} [s]		$D_{médio}$ [mm]	
	RF	MN	RF	MN
40 MPa	3,41	3,94	675	698
55 MPa	3,53	6,19	642	673
70 MPa	3,19	4,64	644	668

Pode igualmente constatar-se que, em comparação com os valores de referência, os mesmos não apresentam desvios significativos e estão enquadrados nos "alvos" pretendidos, nomeadamente D_m entre 630 e 700 mm nas recomendações de Nepomuceno e entre 600 e 720 mm nas de Ferreira.

Relativamente aos valores obtidos por cada um dos autores nos seus trabalhos, Ferreira apresenta valores médios na ordem de 2 s para os tempos de escoamento e 650 mm de espalhamento. Comparativamente, Nepomuceno apresenta valores médios de 3,5 s para os tempos de escoamento enquanto que os valores médios dos diâmetros de espalhamento já variam mais, nomeadamente em função das percentagens de substituição (que afecta claramente a fluidez e a consistência da pasta), mantendo-se no entanto dentro dos valores "alvo".

É assim possível verificar que os resultados obtidos no presente estudo estão perfeitamente enquadrados com os dos respectivos autores.

No caso das amassaduras relativas ao método de Nepomuceno, é possível constatar (*figura 1*) uma boa distribuição do agregado grosso sendo ainda de notar a não ocorrência de exsudação nem de segregação. Pode-se ainda observar a presença de agregado grosso mesmo no limite de espalhamento.

No caso das amassaduras referentes ao método de Ferreira observa-se uma maior tendência para o agregado grosso ficar mais próximo do centro, enquanto que nos bordos do espalhamento se verifica uma leve tendência para a separação da argamassa do resto dos agregados.



Figura 1 – Ensaio de espalhamento - à esquerda Nepomuceno e à direita Ferreira.

3.3.2 Ensaio do funil-V

Os valores médios apresentados na *Tabela 4* permitem avaliar a capacidade do BAC de passar através de pequenas aberturas. Será também interessante analisar estes resultados em conjunto com os obtidos no ensaio de espalhamento.

Tabela 4 Valores médios obtidos no ensaio do funil-V.

Resistência mecânica "alvo"	Ensaio do "funil-V"	
	T [s]	
	RF	MN
40 MPa	9,26	13,87
55 MPa	11,39	13,59
70 MPa	9,91	14,10

Da observação da *tabela 4*, é possível constatar que os valores médios obtidos por ambos os métodos se enquadram nos valores de referência (tempos de escoamento entre 10 e 20 segundos). É no entanto de realçar que, no método de Ferreira, os valores estão muito próximos do limite inferior enquanto que, no método de Nepomuceno, os mesmos são ligeiramente superiores.

Os resultados obtidos nas amassaduras de Nepomuceno enquadram-se perfeitamente com os valores médios do seu estudo que variaram entre 11 e 16 s. Este ensaio não foi utilizado no estudo realizado por Ferreira, pelo que não é assim possível saber como é que o betão produzido nessa campanha se comportaria nesta situação.

Para os resultados obtidos neste ensaio, é de salientar a sua correlação com as quantidades, por exemplo, de argamassa de ambos os métodos. Mais uma vez, as quantidades superiores de argamassa e percentagem de substituição de cimento por adições reflectem-se claramente nos valores médios superiores deste ensaio obtidos pelo método de Nepomuceno.

É, no entanto, de referir que nas amassaduras do método de Ferreira, apesar da maior quantidade de agregado grosso, a mesma não foi suficiente para provocar bloqueio na passagem estreita do funil, e desse modo, condicionar os resultados obtidos.

Da observação visual do ensaio, foi possível verificar o não bloqueio de agregado grosso na passagem estreita, a presença de agregado grosso no topo do molde (antes da abertura da comporta) bem como a não ocorrência de exsudação. Pode ainda observar-se que, após a realização do ensaio, o betão continua a apresentar-se como uma massa uniformemente distribuída.

Pode concluir-se, da análise conjunta dos dois ensaios (espalhamento e funil-V), que, no caso do BAC produzido pelo método de Ferreira, este se apresenta com menos coesão, comportando-se mais como uma massa fluida do que como auto-compactável. O de Nepomuceno é bastante mais "pastoso" sem

no entanto perder a capacidade de se auto-compactar e preencher todos os espaços. Tal facto poderá também ser verificado pela análise dos próximos resultados (ensaio da caixa-L e da caixa).

3.3.3 Ensaio da caixa e da caixa-L

Os valores apresentados na *tabela 5* permitem verificar, de um modo simples, a capacidade de enchimento, a resistência ao bloqueio e a resistência à ocorrência de segregação. Permitem ainda, através da observação visual no final do ensaio, verificar a estabilidade da amostra.

Tabela 5 – Valores médios obtidos nos ensaios da caixa-L e da caixa.

Resistência mecânica "alvo"	"caixa-L"				"caixa"	
	T ₄₀ [°]		H ₂ /H ₁ [%]		H [mm]	
	RF	MN	RF	MN	RF	MN
40 MPa	3,98	4,04	82	86	327	327
55 MPa	4,08	3,80	81	83	329	333
70 MPa	2,68	3,52	82	85	329	336

É assim possível observar que os valores médios obtidos pelos dois métodos em estudo estão bastante equilibrados, notando-se apenas um ligeiro aumento de H₂/H₁ no método de Nepomuceno.

Para este ensaio (caixa-L), os valores de referência recomendados por ambos os autores apresentam uma ligeira diferença: no caso de Nepomuceno, H₂/H₁ > 80% e, no de Ferreira, H₂/H₁ > 60%. É possível observar que os resultados obtidos no presente estudo se enquadram em ambas as recomendações, apesar de se ter considerado o valor de 60% um pouco baixo para o tipo de trabalhabilidade necessária num BAC e se ter mantido como "alvo" o valor de 80% de Nepomuceno.

Em comparação com os valores obtidos pelos autores nos seus trabalhos, verifica-se que os resultados estão mais próximos dos de Nepomuceno (H₂/H₁ entre 80 e 90%) dado que os de Ferreira se apresentam mais próximos de 80% e em alguns casos até inferiores.

Ainda no que diz respeito ao ensaio da caixa-L, é de salientar que se nota menos o fenómeno de segregação quando comparado com os ensaios já analisados, apesar de se observar alguma tendência para o bloqueio na passagem dos obstáculos para as amassaduras de Ferreira. Torna-se assim mais difícil correlacionar estes resultados com os obtidos tanto no espalhamento como no funil.

É, no entanto, mais uma vez evidenciada com estes resultados a influência tanto da maior quantidade de agregado grosso, como da quantidade inferior de argamassa das amassaduras de Ferreira.

Nos resultados obtidos por Ferreira, comparativamente aos de Nepomuceno e apesar de atingirem ambos valores aceitáveis em termos de H₂/H₁, notam-se claramente duas diferenças devidas essencialmente ao referido no parágrafo anterior:

- a tendência para a ocorrência de bloqueio;
- valores de T₄₀ ligeiramente inferiores.

Por outras palavras, tal como referido no trabalho de Ferreira, a auto-compactibilidade com volumes absolutos de agregado grosso superiores a 0,30 m³/m³ só é possível com volumes absolutos de pó superiores a 0,19 m³/m³.

Relativamente aos resultados do ensaio da caixa, ambos os métodos atingiram os valores de referência (H > 322 mm), não se observando qualquer tipo de ocorrência de exsudação. Quanto ao fenómeno de segregação e apesar de nos ensaios já referidos ser possível alguma tendência para a sua ocorrência no método de Ferreira, não é no entanto observável qualquer efeito com a caixa. Tal deve-se essencialmente à forma do próprio equipamento que, se o fenómeno de segregação não for suficientemente evidente numa dada amostra de betão, neste ensaio se torna mais difícil de observar.

3.4 Resultados no estado endurecido

3.4.1 Ensaio de compressão

Apresentam-se na *tabela 6* os valores médios obtidos nos ensaios de resistência à compressão tanto aos 7 como aos 28 dias. É possível observar que a resistência mecânica aumenta com o tempo e com o “alvo” pretendido de acordo com o esperado.

Tabela 6 – Valores médios obtidos no ensaio de resistência mecânica à compressão.

Resistência mecânica "alvo"	Valores médios das resistências mecânicas obtidas							
	Média aos 7 dias [MPa]		Média aos 28 dias [MPa]				Coeficiente de endurecimento aos 7 dias	
	RF	MN	RF	S _{n RF}	MN	S _{n MN}	RF	MN
40 MPa	31,16	29,74	41,67	1,39	38,84	1,69	0,75	0,77
55 MPa	39,66	41,41	54,35	1,02	52,24	0,83	0,73	0,79
70 MPa	53,34	57,08	66,36	0,73	67,24	1,30	0,80	0,85

Comparando os valores obtidos para cada resistência mecânica “alvo” por cada um dos métodos isoladamente, verifica-se que os mesmos se apresentam bastante uniformes. Nas resistências “alvo” de 40 e 55 MPa, os valores obtidos pelo método de Ferreira são ligeiramente superiores aos obtidos por Nepomuceno, enquanto que na de 70 MPa a variação entre ambos é praticamente nula. É ainda de salientar que todos os valores obtidos pelos dois métodos em estudo se apresentam ligeiramente abaixo dos valores “alvo” pretendidos, com exceção do valor médio “alvo” de 40 MPa do método de Ferreira. As diferenças referidas são contudo uniformes em todas as resistências mecânicas “alvo”.

No caso dos resultados obtidos pelas amassaduras baseadas no método de Nepomuceno, é possível observar o aumento da resistência mecânica associada ao aumento da quantidade de cimento presente na mistura para uma quantidade de agregado grosso constante. O referido aumento da quantidade de cimento é consequência da alteração da percentagem de substituição de cimento que vai diminuindo com o aumento da resistência mecânica “alvo”.

No caso dos resultados obtidos pelas amassaduras baseadas no método de Ferreira, a resistência mecânica aumenta com o recurso ao aumento do ligante (cimento + adições) de forma proporcional (mantendo sempre a mesma percentagem de substituição) e também com o aumento da quantidade de agregado grosso em detrimento do agregado fino.

Das diferenças referidas entre os dois métodos nos parágrafos anteriores é de salientar o volume absoluto de argamassa sempre inferior no método de Ferreira. Por outras palavras, apesar das diferenças observadas, os dois métodos conseguem atingir as resistências mecânicas pretendidas. Essas diferenças reflectem-se, no entanto, em termos do comportamento no estado fresco, conforme referido no subcapítulo anterior.

São de salientar também as diferenças no tipo de cimento utilizado, nomeadamente nas resistências mecânicas “alvo” de 40 e 55 MPa em que, no método de Ferreira se utilizou o tipo I-42,5R e, no de Nepomuceno, o tipo II/B-L 32,5N. No caso da de 70 MPa, utilizou-se em ambos os métodos o tipo I-42,5R.

Pode assim afirmar-se que as propriedades do BAC no estado endurecido dependem essencialmente da mistura de materiais que compõem a argamassa e do agregado grosso disperso na mesma. No caso das amassaduras realizadas pelo método de Nepomuceno, o volume absoluto de agregado grosso mantém-se constante sendo na argamassa que reside a influência sobre os valores de resistência mecânica obtidos. Já no caso das amassaduras do método de Ferreira, essa influência encontra-se mais repartida entre a matriz de argamassa e a quantidade de agregado grosso.

Para as amassaduras produzidas pelo método de Nepomuceno, as propriedades das argamassas são convenientemente acertadas na fase do estudo das mesmas. Daí que, ao se chegar ao estudo em betões, a matriz de argamassa (água + adjuvante + cimento + adições + agregado fino) se encontra já devidamente otimizada para a obtenção de um BAC com as características requeridas. O mesmo já não se verifica nas amassaduras do método de Ferreira, em que se faz depender os constituintes da referida matriz da quantidade de agregado total, entre outros.

Em ambos os métodos propostos e apesar das diferenças referidas, não se pode evidentemente desprezar o contributo do agregado, nomeadamente do grosso, na resistência mecânica do betão. É inclusivamente por este constituinte que se poderá explicar a ligeira diferença encontrada entre as resistências mecânicas obtidas e os respectivos valores “alvo”. Importa primeiramente referir que, no método proposto por Ferreira, a influência do agregado grosso poderá ser mais relevante do que no de Nepomuceno.

Como referido, no método de Nepomuceno, a matriz de argamassa representa uma parcela razoável no contributo para a resistência mecânica obtida. Nesse sentido, é possível observar que, nas resistências mecânicas mais baixas (40 e 55 MPa), os valores de Ferreira são ligeiramente superiores aos de Nepomuceno. Tal pode-se confirmar também em termos de quantidade de agregado grosso, dado que o seu contributo é, nestas gamas de resistência mecânica, menos importante (menores quantidades do agregado grosso no método de Ferreira e valores constantes para Nepomuceno). No caso dos 70 MPa de resistência mecânica “alvo”, o agregado grosso começa a ter claramente um contributo superior, evidenciando-se deste modo, no caso de Ferreira (maiores volumes de agregado grosso), que as resistências mecânicas começam a ser inferiores às obtidas por Nepomuceno, fazendo depender os seus valores mais da matriz da argamassa.

Importa deste modo fazer referência às diferenças entre o agregado utilizado nos estudos que deram origem aos métodos em análise e ao utilizado no presente trabalho. No estudo de Nepomuceno, foi utilizado agregado britado de granito (zona do Fundão) devidamente tratado, nomeadamente ao nível da correcção da forma das partículas de agregado grosso, o que implica que as mesmas contenham percentagens muito reduzidas de partículas alongadas e achatadas. Por outro lado, Ferreira recorreu a agregado de origem calcária da zona de Pombal. No presente trabalho, foram utilizados agregados também de origem calcária extraído da zona de Pêro Pinheiro. No entanto, fazendo parte dos objectivos do presente trabalho a intenção de utilizar materiais o mais comum possível, recorreu-se aos existentes no mercado fazendo apenas referência em termos de dimensões máximas. Tal facto revelou-se bastante penalizante no que diz respeito à sua qualidade, essencialmente do agregado grosso. Desse modo, trabalhou-se com uma brita de origem calcária que se apresenta bastante alterada com valores de absorção de água bastante superiores ao recomendado e com valores de resistência ao desgaste de *Los Angeles* igualmente altos (*tabela 7*).

Tabela 7 – Comparação das características dos agregados utilizados.

Propriedades	Estudo de Nepomuceno		Estudo de Ferreira		Presente estudo	
	Brita 3/6	Brita 6/15	Brita 1	Brita 2	Brita 1	Brita 2
Massa volúmica absoluta [kg/m ³]	2710,00	2700,00	2680,00	2690,00	2685,00	2700,00
Baridade [kg/m ³]	1520,00	1540,00	1480,00	1500,00	1430,00	1380,00
Absorção de água [%]	0,15	0,14	1,41	0,80	5,00	4,00
D _{máx} [mm]	9,52	19,10	12,70	19,10	9,52	19,10
Módulo de finura	5,084	6,471	6,50	7,02	6,206	7,669
Desgaste de Los Angeles [%]	25,00 *		27,20	26,80	34,30	33,20

* valor indicativo de referência (resultado não disponível)

Em resumo, julga-se assim explicada a ligeira diferença entre os valores de resistência mecânica obtidos e os esperados. O presente trabalho teve por base tipos de agregado claramente de qualidade inferior ao utilizado no desenvolvimento das metodologias em análise.

4 Conclusões

É possível produzir BAC com recurso às duas metodologias estudadas e com materiais correntes disponíveis no mercado.

As diferenças na abordagem ao cálculo pelos dois métodos conduzem à obtenção de betões que, embora se podendo classificar ambos como BAC, têm algumas diferenças em termos de comportamento no estado fresco. Tais diferenças podem desde já apontar a possibilidade de utilizações distintas para os betões produzidos pelos dois métodos. Nesse sentido, pode afirmar-se que o BAC produzido pelo método de Nepomuceno se revela mais adequado em termos de auto-compactibilidade quando comparado com o de Ferreira.

Em termos de aplicação prática dos métodos de cálculo propriamente ditos, é de referir que o de Ferreira se torna mais simples de aplicar, sendo mais fácil a percepção por exemplo da influência em termos de alterações nas quantidades dos diversos constituintes no comportamento do betão.

Referências

- [1] Ferreira, R. - *“Betão auto-compactável: metodologia de composição”*; dissertação de Mestrado em Engenharia Civil na Especialidade de Materiais de Construção, Universidade do Minho, Guimarães, Julho de 2001.
- [2] Nepomuceno, M. - *“Metodologia para a composição de betões auto-compactáveis”*; tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2005.
- [3] Okamura, H. & Ozawa, K. - *“Mix-design for self-compacting concrete”*; *Concrete Library of JSCE*, nº 25 pp. 107-120, June, 1995.
- [4] Nawa, T.; Izumi, T.; Edamatsu, Y. - *“State-of-the-art report on materials and design of self-compacting concrete”*; *International Workshop on Self-compacting Concrete*; pp. 160-190, August, 1998.
- [5] RILEM TC 174 - SCC - *“Self-compacting concrete, State-of-the-art report 23”*; pp. 65, Paris, 2001.
- [6] SCC European Project Group - *“The European guidelines for self-compacting concrete - specification, production and use”*; United Kingdom, 2005.