

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/275545388>

A Durabilidade do Betão Auto-Compactável (BAC)

Conference Paper · December 2009

DOI: 10.13140/RG.2.1.2133.6084

CITATIONS

0

READS

56

2 authors:



Jorge de Brito

University of Lisbon

1,261 PUBLICATIONS 9,321 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Pedro Raposeiro da Silva

Instituto Politécnico de Lisboa

43 PUBLICATIONS 187 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

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



Performance of concretes made with recycled aggregates from construction and demolition waste from Portuguese recycling plants [View project](#)



SLPforBMS [View project](#)

A DURABILIDADE DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL (BAC)

The durability of self-compacting concrete (SCC)



Pedro Silva
Assistente
ISEL / DEC
silvapm@dec.isel.ipl.pt



Jorge Brito
Professor Catedrático
IST / DECivil
jb@civil.ist.utl.pt

Resumo

Nas últimas décadas, têm surgido novos tipos de betões associados a novas tecnologias com o objectivo de dar resposta aos problemas de durabilidade do betão bem como procurando melhorar o seu comportamento em ambientes agressivos. É o caso do betão auto-compactável (BAC), tema de grande interesse actual pois, apesar de o seu desenvolvimento inicial aparecer originalmente associado à procura da resolução de problemas de índoles várias em estruturas de betão armado associados à falta de mão-de-obra especializada, apresenta igualmente evidentes efeitos positivos, por exemplo na melhoria das condições de trabalho e do meio envolvente à obra através da redução do ruído associado à vibração.

As propriedades do BAC no estado fresco são a grande diferença quando comparado com um betão convencional (BC). No entanto, e devido às diferenças apresentadas entre ambos quanto às quantidades dos materiais constituintes e ao processo de colocação, a durabilidade do BAC é diferente da apresentada por um BC. Desse modo, pretende-se, neste artigo, apresentar um resumo sobre o estado actual do conhecimento relativo ao comportamento do BAC em termos de durabilidade.

Palavras-chave: betão auto-compactável, durabilidade, carbonatação, cloretos, sulfatos.

Abstract

In the last decades, new types of concrete associated with new technologies have been developed in order to provide solutions to concrete durability problems as well as to improve its behaviour in aggressive environments. It is the case of self-compacting concrete (SCC), which is of great interest nowadays since it produces, for example, positive effects in the improvement of working conditions and in the environment surrounding the worksite through noise reduction associated with vibration, even though its initial creation seems to be associated with the search for a solution to various problems of reinforced concrete structures linked to the lack of specialised labour. The properties of SCC in the fresh state are the major difference when comparing SCC to conventional concrete (CC). On the other hand, and due to their differences in what regards the quantities of constituent materials and the casting, the durability of SCC is different from that of a CC. Within this context, the aim of this article is to present a summary on the state-of-the-art related to the behaviour of SCC in terms of durability.

Keywords: self-compacting concrete, durability, carbonation, chlorides, sulphates.

1 Introdução

O BAC é cada vez mais utilizado como forma de melhorar alguns aspectos específicos ou pontuais da construção, sendo espectável que num futuro próximo venha a substituir o BC devido às suas vantagens tanto técnicas e de produtividade, como relacionadas com a melhoria do ambiente de trabalho em obra.

As suas principais características (aumento / melhoria da trabalhabilidade, capacidade de passagem e resistência à segregação), necessárias à eliminação do processo de compactação na fase de colocação do betão em obra, são conseguidas essencialmente com alterações de dosagem dos diversos constituintes [1]:

- diminuição da relação entre as quantidades de agregado grosso e de argamassa;
- consequente aumento do volume de argamassa (mais material ultra fino tipo cimento e adições);
- adequado controlo da dimensão máxima de agregado;
- utilização de adjuvantes do tipo superplastificantes e/ou moduladores de viscosidade.

Tomando em consideração as diferenças referidas, é expectável obter um betão com propriedades no estado fresco bem distintas das de um BC mas que, no estado endurecido, tem necessariamente que dar resposta às mesmas exigências do que um BC, nomeadamente as previstas na NP EN 206-1: 2007 [2], não obstante as propriedades relativamente à durabilidade do BAC serem ainda um pouco incertas.

As alterações na microestrutura do BAC, devido às diferenças apresentadas que são essenciais à necessidade de garantir o processo de auto-compactação, influenciam a capacidade do BAC se deixar atravessar pelos principais elementos de deterioração com consequências directas na durabilidade do mesmo. Pretende-se, nos pontos seguintes, apresentar um levantamento do estado actual do conhecimento sobre a influência na durabilidade do BAC das alterações em termos de microestrutura.

2 Enquadramento geral

A falta de durabilidade das estruturas de betão armado no Japão no início da década de 80 do século passado, entre outros factores, resultava principalmente da falta de trabalhadores qualificados necessários à adequada execução do processo de compactação do betão nos moldes. Desse modo, o Professor Okamura da Universidade de Tóquio inicia em 1986 o desenvolvimento de um betão (auto-compactável) que dispensasse a intervenção humana na fase de colocação [3]. No início da década de 90, no Japão, esta tecnologia já se tinha desenvolvido ao ponto de ser utilizada, tanto na construção de pontes como em estruturas de edifícios, através de um betão que conseguia preencher completamente os moldes, passando por zonas densamente armadas sem a ocorrência de floculação das suas partículas nem segregação, unicamente pelo efeito do seu próprio peso e sem recurso a qualquer método de compactação.

A utilização de BAC na Europa inicia-se na década de 90, muito pela indústria de pré-fabricação mas também com aplicações em betão pronto para estruturas de pontes, edifícios, entre outras aplicações. Tal pode ser observado na figura 1, onde se correlaciona a frequência de estudos de casos com o ano de realização e por zona do globo.

Desde o início da sua aplicação que um conjunto de factores tem condicionado de algum modo a sua maior implementação, nomeadamente a inexistência de:

- normalização dos métodos de ensaio e caracterização de BAC no estado fresco;
- métodos de cálculo de amassaduras mais fáceis de implementar e com maior reprodutibilidade;
- optimização das misturas em termos económicos de modo a tornar a aplicação deste material mais competitiva face aos BC;
- avaliação das propriedades do BAC a longo prazo em termos de durabilidade.

Na procura de respostas a todos estes pontos, tem a comunidade científica procurado contribuir de forma significativa essencialmente através da investigação e da apresentação de resultados, sendo assim possível criar na indústria da construção um clima de confiança sobre a utilização deste novo material. Começou-se desse modo a perceber as vantagens da utilização do BAC, sendo as próprias empresas a interessar-se e a querer a sua implementação. Com recurso não só aos inúmeros trabalhos de investigação sobre o tema mas também com a visão de algumas organizações ao nível Europeu (por exemplo RILEM, EFNARC, entre outras) sobre os benefícios não só técnicos mas também em termos de qualidade de vida, saúde,

segurança e gestão de recursos ambientais, é expectável que o BAC possa vir a substituir num futuro próximo o BC como uma inovação, com menores impactes ambientais, melhorando a durabilidade e qualidade final das estruturas e com custos potencialmente inferiores.

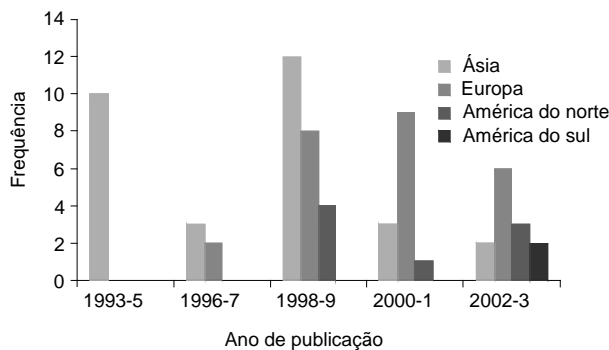


Figura 1 - Distribuição geográfica de estudos de caso, adaptado de [4]

Dos grupos técnicos de trabalho formados através das organizações referidas, é de salientar um dos primeiros consórcios europeus (self-compacting concrete - Brite EuRam Proposal N° BE96-3801), formado em 1996 por vários países membros da UE com o objectivo de estudar o BAC, desde os materiais constituintes até à sua produção e aplicação, e do qual resultou a publicação de um conjunto de documentos orientadores sobre a utilização de BAC. Terá sido talvez a primeira tentativa para introduzir alguma uniformização à utilização de BAC. Podem ainda referir-se as não menos importantes comissões técnicas da RILEM, nomeadamente a TC 145-WSM sobre o tema “Workability of Special Concrete Mixes”, bem como a TC 174-SCC sobre BAC.

Da bibliografia consultada, é unanimemente considerado que um dos principais obstáculos a uma utilização mais generalizada de BAC foi a falta de regulamentação sobre o tema. Actualmente, já se encontram disponíveis a prEN 206-9:2007 - Concrete Part 9: Additional Rules for Self-Compacting Concrete (SCC), bem como o documento “European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use”, publicado pela ERMCO [5], em conjunto com outras organizações europeias: BIBM, CEM-BUREAU, EFCA e EFNARC, em Maio de 2005, documento entretanto já adaptado e traduzido para português pela APEB em Maio de 2007 [6]. Estão deste modo lançadas as bases para uma normalização sobre a utilização de BAC que permitirá comparar e validar as misturas produzidas.

3 Durabilidade do BAC

Tal como num BC, a durabilidade do BAC é afectada por diversos factores tais como a distribuição e granulometria dos agregados, dosagem e o tipo de cimento e adições, relação A/C, entre outros. No entanto, as maiores quantidades de material ultra fino e adjuvantes utilizados no caso específico do BAC implicam uma alteração significativa do seu comportamento em termos de durabilidade com consequências directas nos custos quando comparado com um BC equivalente.

A título de exemplo, podem referir-se diferenças da ordem de 10 a 17% nos custos das matérias-primas encontradas por Martin [7] ou dos 15 % referidos por Ambrose e Péra [8]. Estão longe, é verdade, dos 20 a 50% a mais nos custos das matérias-primas verificados numa fase inicial da sua utilização mas ainda assim com valores superiores aos do BC. Não obstante, a eliminação do processo de vibração e a redução da mão-de-obra associada à tarefa de betonagem em conjunto com a diminuição do próprio prazo de execução podem contribuir de modo significativo para a diminuição dos custos globais da utilização de BAC [9]. No entanto, para uma total aceitação / implementação deste novo material, de modo a tornar-se mais competitivo, é essencial uma redução do seu custo em termos de matéria-prima sem comprometer o seu desempenho no estado endurecido nomeadamente a durabilidade.

As maiores quantidades referidas de material ultra fino são conseguidas pela mistura de mais cimento e essencialmente mais adições (cinzas volantes, fíleres calcários, entre outros). A utilização de adições será provavelmente a forma mais eficaz de, sem comprometer as propriedades exigidas ao BAC no estado fresco, minorar o aumento dos custos relativamente à matéria-prima. Não só devido às vantagens directas da sua utilização mas também pelo facto de entrarem em substituição do cimento, material que pode representar entre 30 e 50% do custo total de um BAC [9].

Com este objectivo, diversos autores tentaram produzir BAC recorrendo a volumes elevados de adições. Bouzoubaâ e Lachemi [10] usaram percentagens de substituição de cimento por cinzas volantes na ordem de 60%, tendo concluído que seria possível produzir um BAC, utilizando um elevado volume de cinzas volantes, com uma resistência mecânica de 35 a 40 MPa aos 28 dias a um preço competitivo.

Apesar das razões tanto de carácter económico como até ecológicas (utilização dos recursos de modo a garantir um crescimento sustentável) para a substituição de cimento por adições, a sua utilização em quantidades elevadas afecta substancialmente a durabilidade do BAC nomeadamente a penetração de cloretos e a resistência ao fogo podendo por exemplo aumentar o efeito de “spalling” [11]. Pode ainda afirmar-se que quantidades elevadas de adições aumentam o efeito da carbonatação e podem alterar outras propriedades de durabilidade de um BAC quando comparado com um BC [12].

Por outras palavras, as propriedades referidas encontram-se associadas à maior ou menor permeabilidade do BAC à água e aos gases considerando que, desse modo, um conjunto de fluidos poderá penetrar o BAC e deteriorá-lo, tais como a água pura ou com iões agressivos, o CO₂ e o oxigénio, como elemento regulador de todas as reacções de corrosão do aço embebido no betão.

Assim sendo, com recurso à análise da estrutura dos poros de um betão, é possível prever a sua durabilidade, uma vez que esta análise possibilita igualmente o conhecimento do modo como os agentes agressivos se difundem ou penetram na massa do betão. Uma forma de verificar a configuração da estrutura dos referidos poros será pela avaliação da sua absorção capilar [13].

3.1 Influência da microestrutura na durabilidade do BAC

Para qualquer tipo de betão, a zona de transição agregado / pasta representa o elo mais fraco da ligação, sendo a finura das adições utilizadas de extrema relevância na referida micro estrutura.

No caso do BAC, essa microestrutura apresenta diferenças significativas relativamente à de um BC nomeadamente na zona de transição entre agregado e pasta e devido, essencialmente, aos factores apresentados no Quadro 1 [14].

Considerando o referido no Quadro 1, conjuntamente com o afirmado por Núñez [14] no seu trabalho de doutoramento relativamente ao facto de a penetração dos agentes agressivos ser fortemente condicionada pelo comportamento da microestrutura da zona de transição agregado / pasta, é razoável afirmar que o BAC poderá potencialmente apresentar uma microestrutura mais fechada (maior compacidade) o que implicará um betão com condições de durabilidade idênticas ou até superiores relativamente a um BC.

No entanto, será necessária uma análise mais cuidada dado que a utilização de maiores quantidades de adições poderá também afectar o próprio processo de hidratação, comprometendo-o. O referido processo não depende exclusivamente do tipo de cimento mas também das adições incorporadas (tanto quantitativamente como qualitativamente).

É ainda possível adicionar mais uma variável às condicionantes referidas: o tipo e a quantidade de superplastificante utilizado, dado que, no caso dos BAC, este assume um papel preponderante. Tanto Wee [15], como mais recentemente Khatib [16], afirmam que a utilização combinada de adições minerais e adjuvantes superplastificantes poderá ter grande influência na porosidade do BAC através da sua redução e quando utilizados nas devidas proporções.

3.2 Mecanismos de transporte

De acordo com o referido, os mecanismos de transporte e as propriedades de permeabilidade que condicionam a velocidade de entrada dos agentes agressivos (através da sua estrutura porosa) bem como o ritmo de deterioração do próprio betão são essencialmente os apresentados no Quadro 2.

Quadro 1 - Factores que influenciam a zona de inter-face de transição agregado / pasta, adaptado de [14]

Factores		Consequências
Diminuição da relação entre as quantidades de agregado grosso e de argamassa	Aumento do volume de argamassa (mais material ultra fino tipo cimento e adições)	- Melhor distribuição granulométrica de toda a mistura; - maior compacidade da mistura.
	Diminuição do volume de agregado grosso	
Adequado controlo da máxima dimensão de agregado		- Quanto menor for a dimensão do agregado, maior será a coesão da zona de transição.
Utilização de volumes superiores de adições		- Melhor distribuição granulométrica de toda a mistura; - maior compacidade da mistura; - aumento da compacidade da zona de transição contribui significativamente para a redução da velocidade de penetração dos agentes agressivos.
NOTA: a ausência de vibração contribui igualmente de forma significativa para a melhoria da microestrutura do BAC		

Quadro 2 - Mecanismos de transporte de agentes agressivos ao betão, adaptado de [14, 17]

Mecanismos de transporte	Descrição
Difusão	Transporte de vapor, gás ou outras substâncias diluídas em água de contacto
Permeabilidade	Capacidade de um líquido ou gás penetrar e se deslocar no sistema mais ou menos fechado de poros e fissuras do betão por diferenças de pressão
Absorção capilar	Depende da permeabilidade
Migração iónica	Transporte de iões para o interior do betão por diferença de potencial eléctrico

Todos os mecanismos de transporte ou meios de penetração dos agentes agressivos no betão são facilitados pela maior ou menor porosidade e pela fissuração do próprio betão, sendo a sua estrutura de capilares de extrema relevância para a durabilidade [17].

São diversos os parâmetros que influenciam os referidos mecanismos e que podem variar desde:

- tipo de materiais utilizados;
- relação A/C;
- quantidades de cimento, adições e adjuvantes.

Existem ainda poucos resultados sobre a avaliação dos vários mecanismos de transporte e da sua influência na degradação do betão. Dos trabalhos consultados, encontram-se ainda algumas contradições dado que as variáveis envolvidas são inúmeras e interdependentes entre si e, sem metodologias bem definidas sobre a forma e os critérios de avaliação, torna-se difícil a análise comparativa destes resultados [14, 17]. No entanto, consultando o relatório da RILEM (comissão técnica 174 SCC) [18] sobre o estado da arte do BAC, onde este assunto aparece referenciado, é possível estruturar um conjunto de conclusões genéricas mas que se podem considerar consensuais, nomeadamente:

1. tal como acontece com o BC, os principais factores que influenciam a estrutura capilar do BAC e, conseqüentemente, o mecanismo de transporte são essencialmente os maiores volumes de finos, de pasta e de superplastificante, bem como a menor dimensão do agregado mais grosso; tomando em consideração o referido e as exigências em termos de dosagem do BAC, é razoável afirmar que os mesmos apresentam uma matriz de partículas com uma maior compacidade, bem como uma zona de transição agregado / pasta mais densa;
2. é possível observar que, para valores iguais de resistência mecânica entre BC e BAC, estes apresentam coeficientes de permeabilidade ao oxigénio e absorção de água significativamente mais baixos;
3. entre BAC com composições distintas, os que têm maiores volumes de moduladores de viscosidade em detrimento de adições (como forma de atingir exigências idênticas no estado fresco) são os que apresentam valores de permeabilidade, absorção e difusão de cloretos mais elevados.

3.3 Mecanismos de degradação

Os mecanismos de degradação do betão podem, de modo sucinto, ser organizados conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 - Mecanismos de degradação do betão, adaptado de [17]

Mecanismos de degradação	Descrição	Exemplo
Físico	Processos físicos externos de deterioração do betão	- Temperaturas elevadas; - gelo / degelo.
Químico	Reacção entre determinadas substâncias externas que penetram no betão deteriorando-o	- Ácidos orgânicos e/ou inorgânicos; - sulfatos; - soluções alcalinas em geral; - sais diversos; - carbonatação.
Electroquímico	Reacções químicas entre o ânodo e o cátodo conjuntamente com a corrente eléctrica que percorre as armaduras: Ânodo - zona da armadura despassivada; Cátodo - zona da armadura em contacto com oxigénio; Condutor eléctrico - armadura; Electrólito - betão	Corrosão directa das armaduras

3.3.1 Profundidade de carbonatação

Para o efeito da carbonatação no BAC, é possível estabelecer a seguinte correlação com o volume de adições: a utilização de adições favorece o efeito da carbonatação devido à redução do pH da pasta (as adições entram em substituição de cimento que é o elemento garante da alcalinidade do betão). Contudo, essas mesmas adições vão provocar uma pasta de matriz mais densa com menores índices de porosidade e consequente diminuição da capacidade de penetração do CO₂ [19]. Como referido, os elevados volumes de adições têm como consequência um aumento da espessura carbonatada devido ao abaixamento da capacidade alcalina da pasta. Considera-se deste modo consensual a existência de um limite para o volume de adições abaixo do qual o efeito da maior densidade da matriz da pasta é preponderante relativamente à redução da alcalinidade, conseguindo-se assim diminuir a espessura da camada carbonatada [19]. Relativamente ao efeito da relação A/C na profundidade de carbonatação, é de salientar o trabalho de Heirman et al [20] sobre o efeito da penetração de cloretos e da carbonatação no BAC. O referido autor afirma a extrema importância da relação A/C dado que, para valores da ordem de A/C=0.50 a A/C=0.60, os BAC produzidos apresentam valores de profundidade de contaminação significativamente superiores aos BAC com valores A/C= 0.4. O mesmo autor refere que, para qualquer das relações estudadas, o aumento das percentagens de substituição de adições (cinzas volantes para o caso em análise) por cimento representa um aumento da profundidade de carbonatação.

3.3.2 Penetração de cloretos

Relativamente aos valores de penetração de cloretos, estes aparecem não só dependentes da quantidade de adições mas também do seu tipo. Zhu e Bartos [1], no seu trabalho sobre a avaliação da permeabilidade de BAC, concluem que os BAC por eles produzidos apresentam valores de permeabilidade ao oxigénio inferiores aos do BC com a mesma resistência mecânica. Os referidos autores concluem ainda que os BAC com menores quantidades de adições e com moduladores de viscosidade apresentam valores superiores de permeabilidade comparativamente aos BC equivalentes e até mesmo aos BAC com quantidades superiores de adições e sem moduladores de viscosidade.

Já Yazici [21], no seu estudo sobre o efeito da utilização de cinzas volantes (CV) e de sílica de fumo (SF) nas propriedades do BAC, concluiu que os BAC por ele produzidos com recurso a diversas percentagens de substituição de cimento por CV (entre 30 e 60%) apresentam valores de penetração de cloretos inferiores quando comparados com BC de referência (também estes produzidos e avaliados pelo autor). Por sua

vez, comparando os resultados dos BAC entre si, observou que, com o aumento da percentagem de substituição de cimento por CV, aumenta o valor de penetração de cloretos, ainda assim sempre inferior aos registados nos BC de referência. A combinação de CV com SF melhora significativamente a referida penetração, nomeadamente, nas misturas com percentagens de substituição superiores de CV (30 a 50%) e com 10% de SF. Nesse sentido, a utilização em conjunto de CV e de SF reduz a profundidade de penetração dos cloretos e aumenta a durabilidade do BAC. Este comportamento está directamente relacionado com a melhoria do BAC em termos de permeabilidade conferida pela utilização das referidas adições. A referida utilização poderá ainda contribuir para a redução do calor de hidratação e em consequência diminuir a fissuração de retracção do betão (devida à hidratação do ligante e secagem do betão).

3.3.3 Penetração de sulfatos

No que diz respeito ao ataque ao betão por substâncias químicas, como por exemplo os sulfatos (Quadro 4), é de referir que a sua existência tanto na água de constituição (água de amassadura) como na água de contacto com o betão (água do mar, subterrânea, das chuvas, dos esgotos ou de drenagem de solos fertilizados) pode levar à reacção desses sulfatos com constituintes da pasta de cimento (Quadro 4), formando compostos expansivos geradores de tensões internas que podem provocar fissuração, desagregação e uma consequente redução na resistência do betão.

Quadro 4 - Sulfatos nocivos e constituintes da pasta de cimento, adaptado de [19]

Sulfatos nocivos para o betão presentes na água	Constituintes da pasta de cimento
Sulfato de magnésio;	Cal libertada no processo de hidratação do cimento (hidróxido de cálcio);
Sulfato de sódio;	Hidratos de aluminato de cálcio;
Sulfato de potássio;	Silicatos hidratados.
Sulfato de amónia.	

Refere Ferreira [22] que o ataque de sulfatos ocorre quando o sistema de poros do betão absorve soluções de sulfatos com origem normalmente nas águas dos solos em contacto com o betão. A referida reacção depende de vários factores, nomeadamente:

- concentração dos iões sulfato;
- catiões presentes na solução de sulfato (sódio, potássio, amoníaco ou magnésio);
- teor de C₃A do cimento;
- densidade / permeabilidade do betão.

A solução para impedir ou minimizar as consequências do ataque dos sulfatos poderá ocorrer, por um lado, através da diminuição de aluminato tricálcico (C₃A) utilizando cimentos especiais com escórias de alto-forno e clínquer isento ou pobre nesse componente. Por outro lado, pode recorrer-se a adições de alto-forno com elevado teor em escórias ou pozolanas, sendo que um processo igualmente eficaz passa pelo aumento da compacidade do betão de modo a diminuir a sua permeabilidade, dificultando ao máximo a penetração dos agentes agressivos no seu interior. A referida penetração ocorre por difusão ou absorção capilar (mecanismos de transporte) devido à maior ou menor permeabilidade do BAC.

3.3.4 Gelo-degelo

Um dos maiores problemas de durabilidade em estruturas em climas frios é a acção gelo-degelo, actuando de modo isolado ou conjuntamente com outro tipo de ataque como os cloretos ou os sulfatos.

Os principais factores que influenciam a resistência de um betão à acção do gelo-degelo são essencialmente o grau de saturação do betão (associado à sua capacidade de absorção e permeabilidade à água), a qualidade dos agregados, a relação A/C, o processo de cura e teor em ar (que representa o meio mais eficaz no aumento da resistência do betão à acção gelo-degelo) [23].

No caso específico do BAC, pode afirmar-se que, em geral, este apresenta um comportamento idêntico ou até superior ao de um BC, com excepção para aplicações submersas onde o controlo da segregação se torna mais complexo, originando um betão com menor resistência interna ao efeito da congelação [24].

A utilização de quantidades superiores de adições no BAC quando comparado com um BC pode contribuir para o aumento da resistência ao efeito da congelação [23]. Não se pode, no entanto, excluir o efeito do teor em ar para este mecanismo de degradação, dado que misturas com quantidades superiores de adições mas teores em ar inferiores apresentaram resultados menos satisfatórios. Por outras palavras, o teor em ar tem um efeito positivo no retardar do efeito de expansão do betão associado à congelação.

O efeito do teor em ar no mecanismo em causa está associado ao facto de as bolhas de ar microscópicas servirem como câmaras capazes de absorver (até determinado limite) a expansão da matriz de pasta de cimento provocada pelos ciclos de gelo-degelo [25]. Pode afirmar-se que o teor em ar aumenta a resistência do betão ao efeito da congelação. Não obstante, apresenta-se apenas como uma forma de retardar os seus efeitos, dado que, para solicitações consecutivas e continuadas no tempo, a matriz de pasta de cimento não ficará completamente imune ao referido mecanismo [23].

4 Conclusões

Se se pretende um aumento efectivo do ciclo de vida das estruturas de betão armado terá de ser dada prioridade ao estudo / avaliação da durabilidade do betão. O BAC apresenta-se como uma solução viável, tanto técnica como económica, de modo a melhorar o comportamento das estruturas em termos de durabilidade e, consequentemente, da sua vida útil. Como factor essencial para atingir a referida melhoria, será necessária uma correcta colocação do betão nos moldes, o que nem sempre é possível atingir com um BC, mesmo recorrendo a mão-de-obra especializada.

As alterações na dosagem dos constituintes do BAC necessárias para atingir a auto-compactabilidade pretendida resultam num produto final com uma microestrutura de maior compacidade e potencialmente de menor porosidade, o que conduz a melhorias significativas na sua durabilidade.

Dos vários aspectos relacionados com as diferenças em termos de dosagem dos constituintes e da própria auto-compactabilidade que afectam de modo positivo a resistência do BAC aos agentes agressivos, são de salientar as seguintes:

- a utilização de dosagens elevadas de adições pode melhorar a distribuição granulométrica da mistura, contribuir para uma maior compacidade e diminuir a porosidade; no entanto, será necessário ter em atenção a determinação da quantidade de equilíbrio, como referido, a utilização de quantidades elevadas pode contribuir para a acção nociva de alguns dos agentes agressivos;
- a baixa relação A/C contribui significativamente para um aumento da compacidade e diminuição da porosidade do BAC;
- as alterações da dimensão e da dosagem dos agregados grossos, através da redução da sua máxima dimensão e do seu volume total, contribuem para a melhoria da compacidade da microestrutura na zona de transição agregado / pasta;
- por último, mas talvez um dos aspectos mais relevantes, a eliminação dos problemas associados a um mau processo de vibração do betão.

Referências

- [1] Zhu W, Bartos J.M., Permeation properties of self-compacting concrete, *Cement & Concrete Research* 33, 2003, pp. 921–926.
- [2] IPQ, NP EN 206-1: 2007, Betão: especificação, desempenho, produção e conformidade, IPQ, 06/2007.
- [3] Lwin M.M., The state-of-the-knowledge of SCC - report, Office of Bridge Technology, Washington D.C., 2006, 9 pp.
- [4] Domone P.L., Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies, *Cement & Concrete Composites* 28, 2006, pp. 197–208.
- [5] ERMCO, European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use, 05/2005, Available at: www.efca.info or www.efnarc.org.
- [6] APEB, European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use, traduzido e adaptado, 05/2007.

- [7] Martin D.J., Economic impact of SCC in precast applications, 1st North American Conference on Design and Use of Self-consolidating Concrete, USA, Chicago - Illinois, 2002, pp. 47-152.
- [8] Ambrose J., Péra J., Design of self-leveling concrete, 1st North American Conference on Design and Use of Self-consolidating Concrete, Hanley Wood, LLC, Addison, IL, Chicago, Illinois, USA, 2002, pp. 89-94.
- [9] Silva P.M.S., Métodos de estudo da composição de betão auto-compactável (BAC) - Verificação da sua aplicabilidade técnico-económica, Dissertação apresentada ao Instituto Superior Técnico para obtenção do grau de Mestre em Construção, Lisboa, 09/2007.
- [10] Bouzoubaâ N., Lachemi M., Self-compacting concrete incorporating high-volumes of class F fly ash, *Cement & Concrete Research* 31 (3), 2001, pp. 413-420.
- [11] Persson B., Johansson A., Johansson P., The benefit of using high performance concrete for prefabrication, *Concrete International* 21 (9), 1999, pp. 58-62.
- [12] Andenaert B., Schutter G. de, Carbonation of SCC, HPC Congress, University of Leipzig, Leipzig, 2002, pp. 853-862.
- [13] Bassuoni M.T., Nehdi M.L., Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive pH reduction, *Cement & Concrete Research* 37, 2007, pp. 1070-1084.
- [14] Núñez E.B.B., Dosificación, propiedades y durabilidad en hormigón autocompactante para edificación, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 2009.
- [15] Wee, T. H.; Matsunga, Y.; Watanabe, Y. and Sahai, E., Production and properties of high-strength concrete containing various mineral admixtures. *Cement and Concrete Research*, 25(4), 1995, pp. 709-714.
- [16] Khatib, J. M. and Clay, R. M. Absorption characteristics of metakaolin concrete. *Cement & Concrete Research*, 34(1), 2004, pp. 19-29.
- [17] Landsberger G. A., Estudio sobre la aplicabilidad de los modelos de cálculo de la fluencia y retracción al hormigón autocompactable, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 2008.
- [18] Skarendahl, A. and Petersson, O., Self-Compacting Concrete, State of the Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC, RILEM Publications S.A.R.L., Cachan Cedex, France, 2000.
- [19] Barros P.G.S., Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável obtido com resíduo de corte de mármore e granito, Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFAL, Maceió, Brasil, 2008.
- [20] Heirman G., Chloride penetration and carbonation in SCC, International Rilem JCI seminar on concrete durability and service life planning (concretelife'06), Ein-Bokek, 03/2006.
- [21] Yazici H., The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials* 22, 2008, pp.456-462.
- [22] Ferreira R. M., Avaliação de ensaios de durabilidade do betão, Dissertação apresentada à Escola de Engenharia do Minho para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – Materiais e Reabilitação da Construção. Guimarães, 09/2000.
- [23] Nehdi M. L., Bassuoni M. T., Durability of self-consolidating concrete to combined effects of sulphate attack and frost action, *Materials and Structures* 41, 2008, pp.1657-1679.
- [24] Persson B., On the internal frost resistance of self-compacting concrete, with and without polypropylene fibres, *Materials and Structures* 39, 2006, pp.707-716.
- [24] Bassuoni M.T., Nehdi M., The case for air-entrainment in high performance concrete. *ICE Structures & Buildings* 158(5), 2005, pp.311-319.