

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/275545192>

# A influência da porosidade na durabilidade do betão auto-compactável (BAC)

Conference Paper · July 2010

DOI: 10.13140/RG.2.1.3640.9366

CITATIONS

3

READS

93

2 authors:



**Pedro Raposeiro da Silva**  
Instituto Politécnico de Lisboa

43 PUBLICATIONS 187 CITATIONS

SEE PROFILE



**Jorge de Brito**  
University of Lisbon

1,261 PUBLICATIONS 9,321 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](#)



Copper Slag [View project](#)

## **A influência da porosidade na durabilidade do betão auto-compactável (BAC)**



**Pedro Silva<sup>1</sup>**



**Jorge de Brito<sup>2</sup>**

### **RESUMO**

Pretende-se, neste artigo, apresentar um resumo sobre o estado actual do conhecimento relativo ao comportamento do BAC em termos de durabilidade, mais especificamente sobre o efeito da sua porosidade.

Apesar das exigências dos BAC em termos de propriedades no estado endurecido serem as mesmas de um betão convencional (BC), as quantidades de amassadura utilizadas bem como as proporções nas quais os diversos componentes se combinam são diferentes.

As diferenças referidas entre os BAC e os BC assentam na diminuição da relação entre as quantidades de agregado grosso e de argamassa com o conseqüente aumento do volume de pasta através da utilização de maiores volumes de material ultra fino (cimento + adições) e adjuvantes (tipo superplastificantes e/ou moduladores de viscosidade) e no adequado controlo da máxima dimensão de agregado. Apesar das razões, tanto de carácter técnico e económico, como até ecológicas (utilização dos recursos de modo a garantir um crescimento sustentável) para a utilização de maiores quantidades de adições, se estas forem demasiadamente elevadas, tal pode afectar substancialmente a durabilidade do BAC.

Tal como acontece com um BC, para obter uma maior durabilidade, o BAC terá de dificultar a penetração dos agentes agressivos para o seu interior. A referida penetração ocorre por difusão ou absorção capilar devido à maior ou menor permeabilidade do BAC à água e aos gases. Desse modo, um conjunto de fluidos poderá penetrar no BAC e deteriorá-lo, tais como a água pura ou com iões agressivos, o CO<sub>2</sub> e o oxigénio (como elemento regulador de todas as reacções de corrosão do aço embebido no betão). Com recurso à análise da estrutura dos poros de um betão, é possível prever a sua durabilidade uma vez que esta análise possibilita o conhecimento do modo como os agentes agressivos se difundem ou penetram na massa do betão.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Betão auto-compactável, durabilidade, porosidade, permeabilidade.

<sup>1</sup> ISEL, Departamento de Engenharia Civil, 1959-007, Lisboa, Portugal. silvapm@dec.isel.ipl.pt

<sup>2</sup> IST, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, 1049-001 Lisboa, Portugal. jb@civil.ist.utl.pt

## **1. INTRODUÇÃO**

O betão, praticamente como é conhecido hoje, é um material utilizado há milhares de anos. É constituído essencialmente por um compósito de agregado grosso ligado entre si por uma pasta de ligante hidráulico e já era usado pelos Romanos na construção de parte das suas estruturas, algumas das quais chegaram aos dias de hoje.

Com a invenção do cimento *portland* normal (CPN) na primeira metade do século XIX, surge o betão actual, que se torna, nos tempos modernos, no material de construção mais importante em todo o mundo. No entanto, e apesar da popularidade da sua aplicação, o betão está associado a muitas das anomalias observadas nas infra-estruturas em serviço, normalmente ligadas a problemas relacionados com as amassaduras, deficiente colocação em obra ou processos de manutenção inadequados ou até mesmo inexistentes, os quais podem conduzir à deterioração permanente das estruturas e consequente perda das condições de serviço.

Nesse sentido, 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 [1]. 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 consegue 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 por influência da indústria de pré-fabricação mas também com aplicações em betão pronto para estruturas de pontes, edifícios, entre outras aplicações.

A utilização de BAC permite atender à necessidade de obter melhorias da durabilidade das estruturas, independentemente da qualidade dos trabalhos de construção e consequentemente da intervenção da mão-de-obra na fase de betonagem, uma vez que se trata de um material que dispensa qualquer método de compactação. Devido às alterações necessárias à obtenção da auto-compactabilidade pretendida (aumento / melhoria da trabalhabilidade, capacidade de passagem e resistência à segregação), isto é, necessárias à eliminação do processo de compactação, o impacto da utilização de BAC está essencialmente relacionado com o processo de produção e com a colocação do betão em obra. As principais alterações estão relacionadas com os materiais constituintes, nomeadamente:

- 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 do agregado;
- utilização de adjuvantes do tipo superplastificantes e/ou moduladores de viscosidade.

Por sua vez, são também de salientar as alterações ao nível da produtividade no processo de execução da estrutura, a melhoria das condições de trabalho bem como da envolvente à obra (redução dos níveis de ruído), as potenciais melhorias no estado endurecido como a resistência mecânica, a durabilidade e o aspecto final da superfície de acabamento.

Não obstante os impactes referidos e apesar das exigências em termos de propriedades no estado endurecido dos BAC serem as mesmas de um BC, as quantidades de amassadura utilizadas bem como as proporções nas quais os diversos componentes se combinam são diferentes. Nesse sentido, pode afirmar-se que as suas propriedades no estado endurecido relativamente à durabilidade podem variar e são ainda um pouco incertas [2] [3].

Tal como acontece com um BC, para obter uma maior durabilidade, o BAC terá de dificultar a penetração dos agentes agressivos para o seu interior. Esta penetração ocorre por difusão ou absorção capilar devido à maior ou menor permeabilidade do BAC. Por outras palavras, a durabilidade encontra-se directamente associada à maior ou menor permeabilidade do BAC à água e aos gases considerando

que, desse modo, um conjunto de fluidos poderá penetrar no BAC e deteriorá-lo, tais como a água pura ou com iões agressivos, o CO<sub>2</sub> e o oxigénio (como elemento regulador de todas as reacções de corrosão do aço embebido no betão).

Desse modo, com recurso à análise da estrutura porosa e conseqüente permeabilidade de um betão, é possível prever a sua durabilidade, uma vez que esta análise possibilita o conhecimento do modo como os agentes agressivos se difundem ou penetram na massa do betão. Pretende-se, nos pontos seguintes, apresentar um levantamento do estado actual do conhecimento sobre a influência na durabilidade do BAC das alterações em termos da sua estrutura porosa.

## **2. ENQUADRAMENTO GERAL**

As melhorias a implementar relativamente à tecnologia do betão através da utilização de BAC passam essencialmente por uma alteração do modo como é encarado, em Portugal, pelos diversos intervenientes (do dono de obra ao empreiteiro), o próprio processo em si. Só assim será possível a implementação de novas técnicas construtivas bem como a utilização de novos materiais (e/ou combinações entre ambos) de modo a que seja possível uma efectiva melhoria na qualidade final do betão colocado nas estruturas e em serviço. Importa compreender as causas dos problemas correntes do betão endurecido, por outras palavras, a ocorrência de anomalias associadas directamente, quer ao processo construtivo quer à própria concepção do betão.

Baalbaki [4] apresenta no relatório técnico do grupo *Cementos Minetti* (Buenos Aires - Argentina) um conjunto de reflexões sobre os motivos pelos quais o betão ocasionalmente se apresenta de forma menos satisfatória. De referir:

### Concepção por vezes errada sobre a tecnologia do betão por parte dos diversos intervenientes

O mercado da construção é muito competitivo levando, em inúmeros casos, a adjudicações com base exclusivamente em factores económicos sem existir qualquer preocupação com a capacidade técnica para a execução dos trabalhos adjudicados e permitindo, desse modo, que os mesmos sejam realizados sem qualquer garantia de qualidade. A resistência mecânica não pode ser o único parâmetro a ter em conta na verificação da qualidade final do betão. Existem outros parâmetros igualmente importantes em termos da avaliação de desempenho do betão. Por outras palavras, pode afirmar-se que a tecnologia do betão se apresenta como algo simples levando a que muitos dos intervenientes “abusem” das propriedades do betão quer por ignorância ou desconhecimento quer, até mesmo, por falta de idoneidade. Refere Baalbaki [4] que ...“*muitas pessoas julgam ser especialistas porque terem 20 anos de experiência a fazer as coisas bem ou mal é de qualquer forma ter 20 anos de experiência*”...

### Especificação incorrecta do betão

De acordo com o referido, o modo de especificar o betão não passa exclusivamente pela indicação da resistência mecânica aos 28 dias de idade. De acordo com a NP EN 206-1: 2007, como forma de garantir um desempenho efectivo das suas funções estruturais e de durabilidade, é necessário indicar um conjunto de elementos para além da classe de resistência à compressão, tais como:

- classes de exposição ambiental e classe de teor de cloretos;
- máxima dimensão do agregado;
- classe de consistência.

### Falta de interesse generalizado pela qualidade do betão e um controlo inadequado em obra

O processo de colocação do betão nos moldes representa um factor importante na qualidade final do mesmo. Falhas ao nível do transporte e da colocação do betão, compactação inadequada (seja por excesso ou por omissão), processo de cura inexistente ou desadequado são factores que podem conduzir a que mesmo um betão correctamente especificado e produzido de acordo com a referida especificação possa resultar num material com um comportamento inadequado e portanto comprometendo a qualidade final da estrutura a que se destina.

## **2.1 Utilização de BAC**

Para além do referido, outros factores relacionados com a especificidade da utilização do BAC têm condicionado de algum modo a sua maior implementação nomeadamente a inexistência de:

- normalização de 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 estes pontos, a comunidade científica tem procurado contribuir de forma significativa sobretudo através da investigação e da apresentação de resultados, sendo assim possível criar na indústria da construção um clima de confiança conducente à 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, a RILEM, a 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.

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.º 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 é a falta de regulamentação sobre o tema. Actualmente, já há 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, CEMBUREAU, EFCA e EFNARC, em Maio de 2005. Esse documento foi entretanto adaptado e traduzido para português pela APEB em Maio de 2007 [6]. Estão deste modo lançadas as bases para uma normalização da utilização de BAC que permite 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, a dosagem e o tipo de cimento e adições, a 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.

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, ma-

terial que pode representar entre 30 e 50% do custo total de um BAC [7]. Com este objectivo, diversos autores tentaram produzir BAC recorrendo a volumes elevados de adições. Bouzoubaâ e Lachemi [8] 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 ecológico (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” [9]. 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 [10].

### 3.1 Influência da microestrutura na durabilidade do BAC

Em qualquer tipo de betão, a zona de transição agregado / pasta é o elo mais fraco da ligação, sendo a finura das adições utilizadas de extrema relevância na microestrutura. No caso do BAC, esta 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 [12].

Quadro 1 - Factores que influenciam a zona de inter-face agregado / pasta, adaptado de [12]

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 expressivamente 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

Considerando o Quadro 1, conjuntamente com o afirmado por Núñez [12] 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 [13], como mais recentemente Khatib [14], 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 con-

dicionam 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 2 - Mecanismos de transporte de agentes agressivos ao betão, adaptado de [12, 15]

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 [15]. São diversos os parâmetros que influenciam os referidos mecanismos:

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

Existem ainda poucos resultados da avaliação dos vários mecanismos de transporte e da sua influência na degradação do betão. Nos 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 desses resultados [12, 15]. No entanto, consultando o relatório da RILEM (comissão técnica 174 SCC) [16] 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, consequentemente, 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; tendo 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. observa-se 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 contêm 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.

#### **4. PERMEABILIDADE E POROSIDADE DO BAC**

Todos os factores de deterioração do betão, de um modo geral, estão associados ao transporte de fluidos através do mesmo, relacionando-se, na maioria dos casos, os problemas associados à durabilidade com a qualidade do betão, essencialmente com a sua permeabilidade e porosidade [17]. É desse modo importante reconhecer e enumerar os factores condicionantes da permeabilidade do betão [18]:

- volume da pasta ligante;
- estrutura porosa da pasta ligante;
- microestrutura da zona de transição agregado / pasta ligante.

No caso específico dos BAC, é possível afirmar que a maior estabilidade da mistura no estado fresco, bem como a utilização de volumes superiores de material ultra-fino, juntamente com a eliminação do processo de compactação do betão irá provocar uma mistura mais homogénea, mais densa e uma menor exsudação, com vantagens evidentes em termos da sua permeabilidade e portanto melhorando significativamente a durabilidade dos BAC [18]. Apresenta-se seguidamente um conjunto de trabalhos

relevantes que permitem um enquadramento em termos do trabalho desenvolvido sobre o tema.

Boel et al [3] referem, na discussão dos resultados obtidos no estudo sobre a permeabilidade de BAC com diferentes tipos de adições, nomeadamente cinzas volantes (CV) e fíler calcário (FC), que as diferenças de comportamento do BAC face a um BC equivalente, quando em contacto com água, são praticamente negligenciáveis. Por outras palavras, apresentam valores de absorção e permeabilidade à água muito semelhantes. Onde se pode observar algumas diferenças é, por exemplo, ao nível do coeficiente de difusão do vapor de água relativamente ao qual os BC apresentam valores relativamente superiores aos dos BAC estudados. No entanto, a principal diferença aparece associada à permeabilidade ao gás, que para os BAC é significativamente inferior. Tal facto é explicado, segundo o autor, pela diferença entre os BAC e os BC no que diz respeito à estrutura dos poros. A porosidade dos BC (tanto a quantidade de poros como o seu diâmetro) é significativamente superior quando comparada com a dos BAC. O mesmo autor compara os BAC produzidos entre si e apresenta algumas conclusões interessantes, nomeadamente o aumento, tanto das permeabilidades ao ar e aos gases, como da difusão do vapor de água, bem como da porosidade com o aumento da relação C/P (cimento / material pulverulento) para valores da relação A/C (água / cimento) constantes. Já a utilização de CV em substituição de cimento fez diminuir a permeabilidade à água e aos gases, devido essencialmente às alterações da estrutura porosa (microestrutura de maior compacidade). No entanto, será necessário ter em atenção a determinação da quantidade de equilíbrio pois a utilização de quantidades elevadas de CV pode contribuir para a acção nociva de alguns dos agentes agressivos. Quanto à diminuição da relação A/C, pode-se observar um aumento significativo da compacidade dos BAC produzidos e a consequente melhoria da estrutura porosa, diminuindo, desse modo, a permeabilidade tanto à água como aos gases. Boel et al [3] concluem igualmente que as referidas alterações da relação A/C têm mais impacto na estrutura porosa do BAC do que as alterações da relação C/P.

Relativamente às adições, e de acordo com o mencionado no parágrafo anterior, são de salientar as conclusões do trabalho de Núñez et al [18] sobre a permeabilidade e a porosidade de BAC onde os autores referem que a utilização de CV fornece melhores resultados do que a de FC, tanto ao nível da resistência mecânica, como da profundidade de penetração de água (com diminuição da permeabilidade). Os autores fazem referência aos bons resultados gerais apresentados pelos BAC produzidos com CV em detrimento do FC salientando a baixa porosidade e consequente reduzida permeabilidade. Referem ainda a diminuição da dimensão dos poros com implicações directas na melhoria da compacidade e da resistência aos agentes agressivos.

Torna-se, deste modo, evidente a importância das adições na capacidade de absorção, na permeabilidade e na própria porosidade dos BAC (tanto na quantidade de poros como na sua dimensão) e, consequentemente, na sua capacidade de resistir à penetração dos agentes agressivos.

Será portanto interessante verificar a influência das referidas adições (CV e FC), tanto do tipo como da quantidade ou até mesmo da percentagem de mistura de ambas, relativamente à penetração de agentes agressivos distintos. É, nesta fase, de referir o trabalho de Zhu e Bartos [2] sobre a permeabilidade do BAC no qual avaliaram não só a permeabilidade à água e ao oxigénio como também a resistência à penetração de cloretos por difusão. Os autores referem que os BAC produzidos apresentam valores de absorção e permeabilidade ao oxigénio significativamente inferiores aos dos BC com a mesma resistência mecânica e que a penetração de cloretos aparece mais condicionada pelo tipo de adições utilizadas do que pela sua quantidade. A comparação dos BAC produzidos entre si permitiu concluir que a utilização de adições melhora a permeabilidade dos mesmos. No entanto, e tal como referido por Boel et al [3], a utilização de quantidades elevadas de adições pode contribuir para a acção nociva dos agentes agressivos. Analisando o trabalho de Zhu e Bartos [2] mais em pormenor, é de referir que foram produzidas misturas equivalentes com resistências mecânicas “alvo” diferentes, nomeadamente 40 e 60 MPa para cada uma das misturas (contendo FC, PFA e moduladores de viscosidade), bem como 2 betões de referência igualmente com as 2 resistências mecânicas “alvo”. Comparando os betões produzidos com resistências mecânicas “alvo” distintas, os de 60 MPa (valor mais

elevado) tiveram sempre melhores resultados, tanto nas permeabilidades como na absorção capilar, o que pode ser explicado pela maior compacidade destas misturas (relações A/C significativamente inferiores nas misturas de resistência mecânica “alvo” de 60 MPa). Em termos de permeabilidade ao oxigénio, os autores referem os melhores resultados obtidos pelos BAC produzidos relativamente aos BC de referência, sendo de salientar diferenças entre 30 e 40% para os BAC com FC e PFA, respectivamente. Relativamente à absorção por capilaridade, o BAC produzido com recurso a moduladores de viscosidade é o que apresenta piores resultados, mesmo quando comparado com os BC de referência. Nos resultados do ensaio de difusão de cloretos, os autores Zhu e Bartos [2] referem que os mesmos são essencialmente afectados pelo tipo de adições utilizadas. São de salientar os resultados dos BAC com PFA que apresentam coeficientes de migração de cloretos significativamente inferiores quando comparados com as restantes misturas, tanto dos BAC com FC e moduladores de viscosidade como dos BC de referência.

Para além dos ensaios referidos no que diz respeito à avaliação, directa ou indirecta, da permeabilidade e da porosidade (nomeadamente absorções por imersão, capilaridade ou sub-pressão, permeabilidade ao ar e aos gases, difusão do vapor de água, resistência à penetração de cloretos, entre outros), é de referir a possibilidade de avaliar a densidade da microestrutura da pasta na zona de transição / ligação entre o agregado e a pasta através de ensaios de microscopia óptica e electrónica. Desse modo é de salientar o trabalho de Boel e Schutter [19] que, em complemento ao referido em [3] e abordado no início do presente capítulo, apresentam um estudo sobre a análise microscópica óptica e electrónica de BAC e de BC equivalente.

Com as amostras, tanto dos BAC como dos BC produzidos (Figura 1), devidamente preparadas (provetes com 25 mm de espessura impregnados em resina epóxida fluorescente, preenchendo todos os vazios incluindo os poros capilares), os autores procederam à análise de diversos parâmetros:

- observação da matriz de cimento (pasta) com a identificação dos vários constituintes, onde claramente identificam a utilização, por exemplo, de cimento *portland* como ligante e de fíler calcário como adição, através da identificação de grãos de cal e de calcite;
- observação da estrutura capilar e porosa da pasta, que os autores caracterizam como distribuída de forma pouco homogénea ou uniforme, o que pode ser indicativo de um processo heterogéneo de hidratação;
- observação da zona de transição agregado / pasta, que se apresenta como uma estrutura densa, com uma boa adesão e sem retracção aparente.

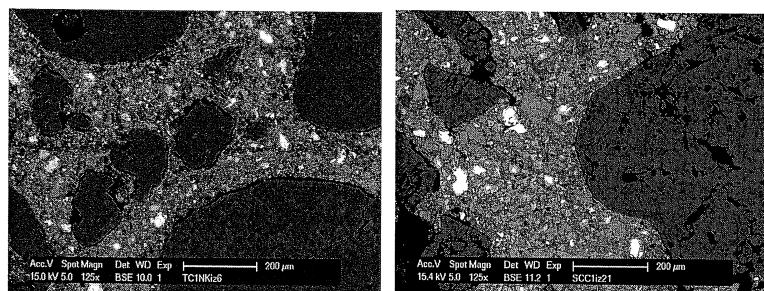


Figura 1 - Imagens de microscopia electrónica - (esquerda BC; direita BAC) [19]

Com recurso aos diversos parâmetros analisados por Boel e Schutter [19], foi-lhes possível proceder à comparação entre os BAC e os BC produzidos. Sobre essa comparação, são de salientar as seguintes observações dos autores:

- é claramente observado (mesmo com recurso ao microscópio óptico) que os BC apresentam maior porosidade do que os BAC, inclusivamente na zona de transição agregado / pasta;
- os BAC apresentam uma microestrutura significativamente mais densa;
- a utilização de microscópio electrónico permite a visualização de mais detalhes, tornando possível por exemplo observar a presença de partículas de cimento não hidratadas;

- nas imagens de microscopia electrónica do BC, é possível observar uma estrutura mais porosa;
- já nas imagens referentes ao BAC, os autores referem a observação de alguns vazios, estando, no entanto, os mesmos envoltos numa matriz de cimento (pasta) bastante densa;
- foi possível observar uma melhor interligação na zona de transição agregado / pasta nos BAC quando comparada com a dos BC.

## **5. CONCLUSÕES**

Da bibliografia consultada conclui-se que é unânime a observação de que os BAC podem apresentar uma durabilidade igual ou até mesmo superior à dos BC. É igualmente unânime a afirmação de que tal se deve essencialmente às diferenças apresentadas na sua microestrutura. A utilização de adições bem como as baixas relações A/C utilizadas são dois factores importantes e até mesmo essenciais na menor porosidade e maior densidade da estrutura porosa do BAC.

Se se pretende um aumento efectivo da qualidade das estruturas de betão armado e até mesmo da sua vida útil, terá de ser dada prioridade ao estudo / avaliação da durabilidade do betão. O BAC apresenta-se como uma solução viável, tanto técnica como economicamente, para melhorar o comportamento das estruturas em termos de durabilidade e, conseqüentemente, 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 os seguintes:

- a baixa relação A/C contribui significativamente para um aumento da compacidade e diminuição da porosidade do BAC;
- o aumento da relação C/P (cimento / material pulverulento) para valores da relação A/C (água / cimento) constantes pode provocar o aumento, tanto da permeabilidade ao ar e aos gases, como da difusão do vapor de água, bem como da porosidade;
- os BAC produzidos com recurso a CV como adição apresentam regra geral melhores resultados face aos produzidos com FC, salientando-se a baixa porosidade e conseqüente reduzida permeabilidade;
- alguns dos trabalhos consultados referem ainda, relativamente às vantagens da utilização das CV, a diminuição da dimensão dos poros, com implicações directas na melhoria da compacidade e da resistência aos agentes agressivos;
- por último, mas talvez um dos aspectos mais relevantes, a eliminação dos problemas associados a um processo de vibração do betão executado de forma deficiente.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] LWIN M.M., The state-of-the-knowledge of SCC - report, Office of Bridge Technology, Washington D.C., 2006, 9 p.;
- [2] ZHU W; BARTOS J.M., Permeation properties of self-compacting concrete, Cement & Concrete Research 33(6), 2003, pp. 921–926;
- [3] BOEL V.; AUDENAERT K.; SCHUTTER G.; HEIRMAN G.; VANDEWALLE L.; DESMET B.; VANTOMME J., Transport properties of self compacting concrete with limestone filler or fly ash, Materials and Structures 40(5), 2007, pp. 507-516;

- [4] BAALBAKI M., Latest developments on concrete technology: technical report (in Spanish), Cementos Minetti, Centro Tecnológico - Juan Minetti S.A., Buenos Aires, Argentina, 2006, 10 p., available at: <http://www.grupominetti.com/admin/items/R2HorEsp.pdf>;
- [5] ERMCO, European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use, 2005, Available at: [www.efca.info](http://www.efca.info) or [www.efnarc.org](http://www.efnarc.org);
- [6] APEB, European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use report (in Portuguese), traduzido e adaptado, 2007;
- [7] 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, 2007;
- [8] BOUZOUBAË N.; LACHEMI M., Self-compacting concrete incorporating high-volumes of class F fly ash, *Cement & Concrete Research* 31(3), 2001, pp. 413-420;
- [9] PERSSON B.; JOHANSSON A.; JOHANSSON P., The benefit of using high performance concrete for prefabrication, *Concrete International* 21(9), 1999, pp. 58-62;
- [10] ANDENAERT B.; SCHUTTER G. DE, Carbonation of SCC, HPC Congress, University of Leipzig, Leipzig, 2002, pp. 853-862;
- [11] BASSUONI M.T.; NEHDI M.L., Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive pH reduction, *Cement & Concrete Research* 37(7), 2007, pp. 1070-1084;
- [12] 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;
- [13] WEE T. H.; MATSUNGA Y.; WATANABE Y.; SAHAI E., Production and properties of high-strength concrete containing various mineral admixtures. *Cement and Concrete Research* 25(4), 1995, pp. 709-714;
- [14] KHATIB J. M.; CLAY R. M., Absorption characteristics of metakaolin concrete. *Cement & Concrete Research*, 34(1), 2004, pp. 19-29;
- [15] 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;
- [16] SKARENDAHL A.; 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;
- [17] BARROS P.G., Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável obtido com resíduos de corte de mármore e granito, Dissertação apresentada na Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Brasil, 2008;
- [18] NÚÑEZ E.B.A.; TERRADES M.; RUIZ J.C.; CÁNOVAS M.F., Permeabilidad y porosidad en hormigones autocompactantes, *Anales de Mecánica de la Fractura* 25(2), 2008, pp. 581-586;
- [19] BOEL V.; SCHUTTER G., Optical and electron microscopy on the microstructure of traditional and self compacting concrete, 5<sup>th</sup> International RILEM symposium on self compacting concrete, 3-5 September 2007, Ghent, Belgium, pp. 577-582.