Betões de elevado desempenho

Aires Camões [1]

Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil
Azurém, P – 4800-058 Guimarães, Portugal

RESUMO

Os betões de elevado desempenho (BED) são, actualmente, empregues apenas em situações particulares, sobretudo em edifícios altos e em estruturas localizadas em ambientes particularmente agressivos. Assim, o conhecimento associado a este tipo de betões não se encontra generalizado e é importante contribuir para a sua disseminação e, também, para a sua desmistificação, uma vez que os BED podem ser considerados como uma evolução dos betões convencionais, mas com elevada durabilidade.

Com o objectivo de contribuir para a sustentabilidade da construção, urge reduzir a produção e o consequente consumo de cimento. Assim, se a substituição de elevados volumes de cimento por subprodutos industriais, como é o caso das cinzas volantes, se revelar exequível, será extremamente benéfica sob o ponto de vista ecológico e ambiental.

Neste contexto, desenvolveu-se um programa experimental de forma a avaliar a possibilidade de produzir BED, fabricados com quantidades reduzidas de cimento e recorrendo à incorporação de materiais correntes, de baixo custo, comummente utilizados no fabrico de betões convencionais. O comportamento das misturas produzidas foi caracterizado experimentalmente, incidindo na avaliação das suas principais propriedades relacionadas com a trabalhabilidade, com as resistências mecânicas e com a durabilidade

Os resultados obtidos permitiram evidenciar que, para este tipo de betões, as exigências relacionadas com a resistência à compressão são, para a grande maioria das aplicações práticas, satisfeitas e que estes podem ser considerados de elevada durabilidade, o que os permite classificar como BED. Assim, é de esperar que a utilização mais generalizada deste tipo de BED permita edificar construções mais duráveis e contribuir significativamente para a sustentabilidade da construção.

1. INTRODUÇÃO

O BED é fabricado recorrendo a materiais de elevada qualidade cuidadosamente seleccionados, e a sua composição é determinada por intermédio de métodos que permitam optimizar a compacidade da mistura. Estes betões são misturados, colocados em obra, compactados e curados com o maior rigor possível, de modo a atingir elevados níveis de

[1] Professor Auxiliar (aires@civil.uminho.pt)

qualidade. Os BED são produzidos com uma reduzida relação água-ligante (A/L), que é assegurada pela presença de superplastificantes que possibilitam o fabrico de betões passíveis de aplicação em obra com relações A/L compreendidas entre 0.2 e 0.4. Em geral, os BED são dotados de resistências mecânicas (nomeadamente a resistência à compressão) superiores às dos betões convencionais. No entanto, a resistência não é sempre a principal propriedade requerida para este tipo de betões. Por exemplo, um betão convencional dotado de elevada durabilidade e reduzida permeabilidade pode ser considerado como um BED, uma vez que apresenta níveis de desempenho elevado. Ou seja, um betão de elevada resistência (BER) pode ser definido como um BED, mas um BED nem sempre apresenta elevada resistência mecânica, ou seja, nem sempre é um BER.

Conforme é do conhecimento público, a produção de cimento está na origem de elevados teores de CO_2 expelidos para a atmosfera. Assim, de modo a assegurar um desenvolvimento sustentável da indústria do betão, o emprego de subprodutos pozolânicos e cimentícios deve ser encorajado e substancialmente aumentado. Uma maior reutilização de cinzas volantes na indústria do betão, associada a uma substituição da dosagem de cimento contribuirá, certamente, para a redução de um importante problema de impacte ambiental.

Neste contexto, desenvolveu-se um programa experimental contemplando o fabrico e a caracterização experimental de três composições de betão distintas, incorporando elevadas quantidades de cinzas volantes. As composições de betão estudadas foram produzidas com 400, 500 e 600 kg/m^3 de ligante e com uma quantidade de substituição de cimento por cinzas volantes constante e igual a 60% (em massa). O seu comportamento foi caracterizado experimentalmente, incidindo na avaliação das suas principais propriedades relacionadas com a trabalhabilidade, com as resistências mecânicas e com a durabilidade.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados permitiram classificar estes betões de elevado volume de cinzas volantes como BED, devido à sua elevada durabilidade. Assim, estes betões revelaram-se promissores, podendo contribuir para a generalização da aplicação de um betão “amigo do ambiente”, de baixo custo e de elevada durabilidade.

2. EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA DO BETÃO

A invenção do cimento portland por Louis Vicat em 1817, a do betão armado em 1848 por Lambot e a intervenção do arquitecto Auguste Perret em 1898, foram os pontos de partida para o uso de um material de construção que veio determinar um novo rumo à construção do século XX, tornando-se, nos dias de hoje, no material mais utilizado na construção (Coutinho (1988)).

A utilização generalizada do betão na construção está relacionada, principalmente, com a facilidade de moldagem de elementos mais ou menos complexos, com o baixo custo dos materiais e processos utilizados e, ainda, com a pretensão de assegurar durabilidade aos elementos de betão armado, ou seja, garantir que durante o período de vida previsto não são necessários, ou são reduzidos, os custos de manutenção das estruturas. Assim, não é de todo surpreendente que as evoluções registadas neste material estejam intimamente ligadas a duas características fundamentais: a rapidez de construção e a durabilidade do betão (Mehta (1999_a)). No entanto, durante aproximadamente um século, o betão manteve-se como um material composto quase exclusivamente por uma mistura de agregados, cimento e água.

Em 1991, Mehta retrata a evolução do betão ao longo dos últimos cinquenta anos, enquadrada particularmente em relação às questões relacionadas com a durabilidade. Este autor indica que a maioria das evoluções surgidas não foram resultado directo da necessidade de aumentar a durabilidade do material. As principais evoluções registadas, com repercussão na durabilidade e na alteração da composição dos betões, incluem os melhoramentos surgidos

no cimento, as novas tecnologias implementadas com a utilização de betão pronto, o aparecimento de adjuvantes introdutores de ar, a introdução de adjuvantes redutores de água de alta gama (os superplastificantes, SP) e as evoluções entretanto verificadas na aplicação de adições minerais.

Os cimentos actuais diferem de forma substancial dos de há quarenta anos atrás, em especial no que se refere à sua composição e finura. Price (1974) e Tennis (1998) indicam que nos EUA o conteúdo de silicato tricálcico, C_3S, de um cimento portland tipo I aumentou de cerca de 30%, valor típico em 1950, para valores da ordem dos 45% a 50% em 1970 e 56% em 1998. Durante o mesmo período de tempo a finura do cimento sofreu um acréscimo de 100 para 400 m^2/kg. Devido ao aumento do C_3S e à maior finura, o cimento portland moderno hidrata mais rapidamente. Assim, hoje em dia, é possível fabricar betões com resistências à compressão semelhantes e com uma menor quantidade de cimento e uma maior razão A/L. No entanto, estas alterações podem, também, originar problemas associados à retracção por secagem e ao calor de hidratação, afectando assim a durabilidade do material.

O aparecimento da indústria de betão pronto foi motivado pela necessidade, entretanto surgida nos anos cinquenta, de aumentar os ritmos de construção. Quando comparados com os betões produzidos em obra, o transporte e a bombagem requeridos ao betão pronto exigiram um aumento substancial da sua trabalhabilidade. Sem a utilização de um adjuvante redutor de água, a dosagem de água aumentou significativamente, causando uma diminuição na durabilidade do betão. Os betões prontos presentemente utilizados contam já com a incorporação de adições minerais e adjuvantes que asseguram a trabalhabilidade requerida, e são de utilização generalizada. A produção de betão pronto na União Europeia atingiu, em 2005, 369.6 milhões de metros cúbicos (ERMCO (2006)).

Os adjuvantes introdutores de ar, utilizados a partir dos anos quarenta, trouxeram um avanço notório na melhoria da durabilidade dos betões, permitindo reduzir drasticamente as despesas de manutenção de estruturas de betão expostas à acção do gelo-degelo, em particular de pavimentos, muros de retenção e tabuleiros de pontes.

Já em 1918, Abrams indicou que a chave para a produção de BER, se encontrava na redução da razão A/L. No entanto, uma vez que à água de amassadura cabe o papel essencial de assegurar a hidratação do cimento e conferir a necessária trabalhabilidade à mistura de modo a permitir a sua correcta aplicação em obra, a produção de um betão trabalhável esteve condicionada durante longos anos à impossibilidade de executar misturas com A/L inferir a 0.4. Mesmo com a utilização de adjuvantes redutores de água (plastificantes) era impossível dispersar suficientemente as partículas de cimento. Esta situação permaneceu inalterável até ao aparecimento dos SP, que se verificou nos anos setenta do século XX.

O uso de SP no betão revelou-se um dos maiores progressos na melhoria das características do material. É hoje possível fabricar betões trabalháveis com razões A/L próximas de 0.2, e obter betões de elevada resistência, elevada fluidez e elevada durabilidade. Nestes betões modernos, é a quantidade de SP que controla a trabalhabilidade ao contrário dos betões correntes onde este papel era desempenhado pela quantidade de água presente na amassadura.

As adições minerais podem ser incorporadas no betão com o intuito de reduzir o calor de hidratação e melhorar a resistência, a trabalhabilidade e a durabilidade. A sua utilização permite, também, a reutilização de subprodutos industriais, e a eventual redução do custo do material. Adições minerais ultra finas como, por exemplo, a sílica de fumo ou o metacaulino de elevada reactividade foram recentemente incorporadas em betões. Só nos anos setenta é que as sílicas de fumo começaram a ser usadas na Escandinávia como adição no betão, demorando cerca de dez anos a serem aplicadas na América do Norte (Aïtcin (1998)). Por intermédio da adição de sílica de fumo é possível produzir betões que atingem resistências à

compressão da ordem dos 100 a 150 MPa e que são passíveis de colocação em obra.

Apesar das evoluções entretanto surgidas, nos últimos cinquenta anos não se verificaram mudanças verdadeiramente revolucionárias na indústria do betão. A utilização de novos componentes (adjuvantes, adições activas, etc.) melhorou a qualidade dos betões, mas não proporcionou uma revolução como a sofrida no campo das telecomunicações ou mesmo na indústria automóvel (Neville e Aïtcin (1998)). A menos que surjam vantagens económicas muito significativas, será muito difícil alterar equipamentos e procedimentos usuais, tendo em vista a melhoria das características do material. Assim, a utilização de um novo material só será bem sucedida se satisfizer os critérios de exequibilidade da construção (transporte, moldagem, acabamento e cura) com eficiência e sem grandes inconvenientes (Almeida (1995)).

O sucesso dos BED reside no facto de os seus componentes não diferirem dos empregues em betões correntes, obrigando apenas à utilização de SP e, em certos casos, de adições activas, mantendo o essencial das condições de implementação e não interferindo substancialmente nos processos e equipamentos correntemente utilizados nos betões convencionais.

3. BETÃO DE ELEVADO DESEMPENHO

O aparecimento dos SP permitiu o fabrico de betões com razões A/L substancialmente reduzidas. Como nas primeiras aplicações deste tipo de betão se procurava a obtenção de elevadas resistências mecânicas, estes começaram a ser designados como BER. No entanto, a redução da razão A/L permitiu evidenciar melhorias significativas de outras características. Tornou-se, assim, possível executar betões com elevada fluidez, elevados valores do módulo de elasticidade, da resistência à flexão, à tracção e à abrasão, com reduzida permeabilidade e melhoria substancial da durabilidade. Neste contexto, a designação BER tornou-se inadequada para descrever a totalidade das melhorias verificadas nesta nova família de betões, surgindo, consequentemente, a expressão *betão de elevado desempenho*.

A designação BED foi empregue pela primeira vez por Mehta e Aïtcin em 1990 para classificar composições de betões que possuíssem três características diferentes: elevada trabalhabilidade, alta resistência e elevada durabilidade. Estava, portanto, estabelecida a principal distinção entre BER e BED: a elevada durabilidade exigida aos BED.

Como exemplo da inadequação da designação BER, pode ser apontado o descrito por Smith em 1996. O autor salienta a necessidade de aplicação de BED nos EUA, indicando que cerca de 12.5% das pontes existentes se apresentam estruturalmente deficientes. Cerca de 43500 pontes necessitam de manutenção acrescida, reabilitação substancial ou mesmo substituição. Assim, neste caso particular, os principais motivos para o uso de BED consistem na melhoria da durabilidade e na redução de custos de manutenção, reparação e substituição a longo prazo, podendo não ser condicionante a elevada resistência mecânica.

Tradicionalmente, as especificações relativas ao betão apenas enfatizavam a necessidade de determinada resistência à compressão e não davam a mesma importância à permeabilidade e durabilidade requeridas para o material. Serve apenas como um pequeno consolo constatar que a resistência à compressão de um certo betão está conforme o requerido contratualmente se este se apresenta fissurado, delaminado, desagregado ou sofrendo as três anomalias em simultâneo. Actualmente, é imperioso que as especificações tratem com igual importância os requisitos mecânicos e os necessários a uma adequada durabilidade, tais como: reduzido valor de A/L, reduzido potencial de retracção por secagem, baixa permeabilidade e apropriada quantidade de ar introduzida. De modo a reduzir a fissuração devida à retracção também deve ser limitado o conteúdo de pasta ligante da mistura (Mehta (1999)).

No entanto, ao contrário da designação BER, a expressão BED pode ser considerada demasiado vaga. O que é o desempenho de um betão? Como pode ser medido? É certo que a designação BER não deixa qualquer dúvida, excepto no estabelecimento da fronteira entre um betão convencional e um BER exclusivamente à custa da resistência à compressão. E se o material for prescrito devido a outro parâmetro que não a resistência à compressão? Se, por exemplo, for necessário um determinado betão para uma estrutura sujeita a condições ambientais adversas e elevado período de vida útil, requerendo, portanto, elevada durabilidade? O material não será, certamente, escolhido exclusivamente em função da sua resistência à compressão, podendo até ser suficiente atingir níveis correntes de resistências à compressão, da ordem dos 25 MPa.

A NP EN 206-1 (2005) considera que um betão para ser classificado como BER deve pertencer a uma classe de resistência superior a C50/60. Porém, apesar de apresentar uma divisão clara entre BER e betões convencionais, esta norma não contempla o termo BED, não fazendo qualquer referência a este tipo de designação.

O ACI adoptou uma definição abrangente para BED, proposta em 1999 por Russel, baseada em Zia (1993): um betão que congrega a combinação de desempenhos e requisitos uniformes especiais, que não podem ser atingidos rotineiramente recorrendo a constituintes e amassaduras convencionais e práticas correntes de colocação e cura, é definido como sendo um BED. O ACI acrescenta, em comentário, que um BED é um betão em que certas características foram desenvolvidas para uma aplicação particular inserida num determinado ambiente. Exemplos de características que podem ser consideradas críticas numa aplicação concreta são: facilidade de colocação em obra; compactação sem segregação; resistências iniciais elevadas; propriedades mecânicas a longo prazo; permeabilidade; densidade; calor de hidratação; tenacidade; estabilidade volumétrica e elevado período de vida útil em ambientes agressivos. Este conjunto de características e propriedades não são autónomas e podem ser relacionadas entre si em função dos materiais e processos utilizados. Dito de outra forma, a tentativa de influenciar uma dessas propriedades, necessariamente repercute-se em, pelo menos, uma das restantes. Neste sentido, se para cumprir determinados objectivos, houver que cumprir vários dos parâmetros apresentados, estes devem ser claramente especificados.

Apesar de a designação BED não ser consensual e poder ser considerada algo ambígua, para fabricar um BED é necessário recorrer a um reduzido valor da razão A/L e, para tal, é essencial recorrer-se à adição de um adjuvante redutor de água de alta gama, um SP. Assim, um BED pode ser razoavelmente definido como um betão de reduzida razão A/L, inferior a 0.4. Esse valor não é fixo de forma arbitrária, e pretende reflectir a extrema dificuldade, ou mesmo a impossibilidade, de, para tais valores de A/L, produzir betões passíveis de serem colocados em obra sem a inclusão de SP.

4. MATERIAIS, DOSAGENS E CARACTERÍSTICAS

Os materiais a utilizar para o fabrico deste tipo de betões não difere dos usados nos betões convencionais. Os BED são constituídos por cimento, agregados finos e grossos, adições minerais, SP e água.

Em geral, são empregues cimentos CEM I, da classe 42.5 ou 52.5, em quantidades elevadas, compreendidas, em geral, entre 400 e 500 kg/m^3, podendo, no entanto, ultrapassar este valor.

Nos BED, as propriedades dos agregados assumem maior importância do que num betão convencional. Enquanto que num betão convencional as fissuras desenvolvem-se na pasta ligante e na interface agregado/pasta, devido ao fortalecimento da pasta ligante dos BED, a superfície de fractura penetra nos agregados, mobilizando a sua resistência, uma vez

que a capacidade de carga dos agregados e da pasta é, muitas das vezes, aproximadamente igual. Assim, para os BED os agregados deverão ser seleccionados criteriosamente, não devendo apresentar-se limpos e isentos de partículas aderentes. A fracção grossa dos agregados terá que ter uma rigidez e uma resistência à compressão apropriada (superior a 150 MPa) devido às inevitáveis concentrações de tensões sofridas. Devem apresentar uma forma aproximadamente cúbica, sendo de evitar os agregados de forma alongada e lamelar, e não devem conter sílica reactiva para evitar a reacção alcalis/sílica, mais preocupante neste tipo de betões devido à elevada dosagem de cimento com que são fabricados.

Para aumentar a compacidade da mistura, as areias devem ser um pouco mais grossas, com um módulo de finura de cerca de 3, uma vez que estes betões contêm já grande quantidade de partículas finas devido à elevada dosagem de ligante.

Um BED pode ser produzido utilizando apenas o cimento como material ligante. No entanto, uma substituição parcial de cimento por uma ou pela combinação de duas ou três adições minerais com propriedades cimentíceas, quando disponíveis a preços competitivos, pode ser vantajosa, não só sob o ponto de vista económico, mas também, sob o ponto de vista reológico e, em algumas situações, sob o ponto de vista da resistência e durabilidade.

A grande maioria das adições utilizadas nos BED são subprodutos industriais, que se não forem utilizados, irão ser acumulados em depósitos, o que acarretará inevitáveis riscos de poluição do solo, da água e do ar, para além de todos os inconvenientes paisagísticos (Mehta (1994)). Neste contexto, o seu consumo nos betões, para além das vantagens que se podem constatar no próprio material, é responsável por benefícios de ordem económica, de consumo de energia, de protecção ambiental e de conservação dos recursos naturais (Swamy (1986)).

A substituição parcial de cimento pode ser conseguida através do uso de cinzas volantes, escória granulada de alto-forno, sílica de fumo, metacaulino e cinzas de casca de arroz. Contudo, comparada com a produção mundial de cinzas volantes, a disponibilidade das restantes adições minerais é consideravelmente limitada.

As adições mais frequentemente utilizadas em BED são, sem dúvida, as sílicas de fumo e as cinzas volantes. A sílica de fumo, cuja disponibilidade é bastante limitada, é, em geral, especificada em aplicações especiais devido à sua elevada pozolanicidade como, por exemplo, em estruturas expostas a ambientes de agressividade química elevada.

Apesar de não ser obrigatória a adição de sílica de fumo na produção de BED, é praticamente indispensável a sua inclusão em betões com resistência à compressão superior a 100 MPa (Neville e Aïtcin (1998)). O elevado preço da sílica de fumo pode ser um factor inibidor da sua utilização. Sendo o custo da sílica de fumo aproximadamente igual a dez vezes o do cimento, a adopção de uma dosagem corrente de 10% de sílica de fumo em relação ao peso de cimento, pode elevar o custo do material aglomerante presente no betão para cerca do dobro.

Em relação à quantidade de ligante a empregar no fabrico de BED, generalizando, é possível indicar que oscila entre os 400 e os 500 kg/m^3, podendo atingir, em determinado casos específicos, valores de 600 kg/m^3, ou até mesmo superiores (Camões (2002)).

A dosagem óptima de sílica de fumo, segundo Larrard (1992) é de 20 a 25% da massa de cimento. No entanto, para percentagens menores a diferença de comportamento é diminuta e, considerando o custo da adição mineral e dos SP, a dosagem óptima de sílica de fumo a empregar deverá ser próxima dos 10%.

Valores da quantidade de SP entre 3 a 10 L/m^3 são correntes na composição de BED (Aïtcin (1992)). A estes valores correspondem dosagens de 0.5 a 3.0% de extracto seco de SP em relação à massa de ligante, sendo típicas dosagens de 1.0 a 2.0%.

A quantidade de água a adicionar deverá ser a menor possível de modo a satisfazer os requisitos prescritos para a mistura enquanto fresca. Com o uso de adjuvantes redutores de

água de alta gama é possível colocar em obra betões com razão A/L inferior a 0.3 e abaixamento de cerca de 200 mm. Minimizando a quantidade de água a juntar à amassadura e permitindo ao SP controlar as características reológicas do conjunto, é possível maximizar os parâmetros do betão relacionados com a durabilidade. A adição de cinzas volantes, pode contribuir significativamente para a redução da razão A/L, dado o seu esperado efeito benéfico na trabalhabilidade dos betões.

Na Tabela 1 apresentam-se algumas composições de BED, disponíveis comercialmente nos EUA (PCA (2003)).

Tabela 1 – Composições de BED disponíveis comercialmente nos EUA (PCA (2003).

	Composição					
	1	2	3	4	5	6
CEM I, kg/m^3	564	475	487	564	475	327
sílica de fumo, kg/m^3	—	24	47	89	74	27
cinzas volantes, kg/m^3	—	59	—	—	104	87
brita calcária ($D_{máx}$=12.5 mm), kg/m^3	1068	1068	1068	1068	1068	1121
areia, kg/m^3	647	659	676	593	593	742
SP, L/m^3	11.6	11.6	11.22	20.11	16.44	6.3
SP retardador, L/m^3	—	—	—	—	—	3.24
retardador, L/m^3	1.12	1.05	0.97	1.46	1.5	—
A/L	0.28	0.29	0.29	0.22	0.23	0.32
Propriedades do betão fresco						
abaixamento, mm	197	248	216	254	235	203
densidade, kg/m^3	2451	2453	2433	2486	2459	2454
teor em ar, %	1.6	0.7	1.3	1.1	1.4	1.2
temperatura, °C	24	24	18	17	17	23
Resistência à compressão (provetes cilíndricos ϕ100 x 200 mm^3; cura húmida)						
3 dias, MPa	57	54	55	72	53	43
7 dias, MPa	67	71	71	92	77	63
28 dias, MPa	79	92	90	117	100	85
56 dias, MPa	84	94	95	122	116	—
91 dias, MPa	88	105	96	124	120	92
182 dias, MPa	97	105	97	128	120	—
426 dias, MPa	103	118	100	133	119	—
1085 dias, MPa	115	122	115	150	132	—
Módulo de elasticidade em compressão, (provetes cilíndricos ϕ100 x 200 mm^3; cura húmida)						
91 dias, GPa	50.6	49.9	50.1	56.5	53.4	47.9

Associada à implementação em obra dos BED podem ser enunciadas, de forma sucinta, as seguintes características principais:

- durabilidade e tempo de vida útil: o emprego dos BED, devido à sua reduzida permeabilidade e elevada resistência à penetração de agentes agressivos, está, muitas das vezes, associado a requisitos de durabilidade das estruturas e respectivos tempos de vida útil, que podem ser definidos para períodos superiores a 100 anos;
- resistência à compressão e módulo de elasticidade: a elevada resistência à compressão dos BED permite a construção de pilares de dimensões mais reduzidas, o que pode levar a uma maior eficiência económica. O módulo de elasticidade é, também, superior ao dos betões convencionais, o que acarreta um aumento de rigidez, que pode ser condicionante, principalmente em edifícios altos sujeitos a

importantes acções horizontais, como é o caso do vento ou dos sismos;

- perda de trabalhabilidade e temperatura: a perda de trabalhabilidade com o tempo é um dos problemas que pode afectar a colocação em obra deste tipo de betões, que pode ser resolvido recorrendo ao uso de um retardador. As elevadas dosagens de ligante, designadamente de cimento, podem originar importantes problemas relacionados com a elevada temperatura de hidratação desenvolvida, o que pode levar à necessidade de adopção de procedimentos em obra que permitam arrefecer os elementos de betão;
- elevada resistência em idades iniciais: neste tipo de betões, é possível atingir resistências à compressão na ordem dos 25 MPa decorridas apenas 4 horas após a betonagem, o que permite uma mais rápida remoçam dos moldes e consequente aumento do ritmo de construção;
- cura: neste tipo de betões a cura tem que ser particularmente cuidada, uma vez que a presença de elevadas quantidades de cimento e reduzida dosagem de água pode potenciar riscos de fissuração por retracção, nomeadamente por retracção plástica e autogénea.

5. APLICAÇÕES

Devido às suas elevadas resistências mecânicas, um dos principais campos de aplicação deste tipo de betões consiste na sua utilização em elementos verticais (pilares e paredes) de edifícios altos. Outras das utilizações privilegiadas dos BED refere-se às estruturas situadas em ambientes particularmente agressivos, como é o caso de determinadas obras especiais, designadamente pontes. Neste tipo de aplicações, a elevada durabilidade deste material torna-o particularmente atractivo como meio de dotar as estruturas de um elevado tempo de vida útil, de 100 anos, ou mais.

Figura 1 – *Two Union Square*, Seattle, EUA.

Até ao momento, existem já variadas aplicações práticas deste tipo de betão, apresentando-se aqui, sucintamente, três aplicações de BED em edifícios altos (*Two Union*

Square, *Petronas Towers* e *Taipei Financial Center*) e em duas pontes (Ponte da Normandia e viaduto de Millau).

O edifico *Two Union Square* (Figura 1) situa-se em Seattle, nos EUA, tem 216 m de altura, 58 pisos, e a sua construção decorreu durante 1988 e 1989. Trata-se da primeira utilização de betão confinado em edifícios altos: os quatro pilares centrais, constituintes do núcleo central de rigidez da estrutura, foram realizados com tubos metálicos ocos com 3 m de diâmetro e 10 mm de espessura preenchidos no seu interior com BED. Os BED utilizados apresentaram um abaixamento elevado (250 mm), elevada resistência à compressão (91 MPa aos 2 dias; 119 MPa aos 28 dias e 145 MPa aos 119 dias de idade) e elevado módulo de elasticidade em compressão (50 GPa). As composições foram produzidas com 513 kg/m^3 de cimento, 43 kg/m^3 de sílica de fumo e uma razão A/L particularmente reduzida, igual a 0.22.

As *Petronas Towers* (Figura 2), situadas em Kuala-Lumpur, na Malásia têm 452 m de altura, 88 pisos, a sua construção foi concluída em 1996 e ocupam, actualmente, o segundo lugar no ranking dos edifícios mais altos do mundo. Os BED utilizados foram fabricados com uma dosagem de 260 kg/m^3 de cimento portland, 260 kg/m^3 de cimento composto (incorporando 50 kg/m^3 de cinzas volantes), 30 kg/m^3 de sílica de fumo e uma razão A/L de 0.27. Os betões obtidos apresentaram elevada resistência à compressão (100 MPa de resistência média aos 28 dias de idade), elevado módulo de elasticidade em compressão (35.5 GPa aos 56 dias de idade) e um abaixamento de 200 mm.

Figura 2 – *Petronas Towers*, Kuala-Lumpur, Malásia.

Actualmente, o edifício mais alto do mundo situa-se em Taiwan, é o *Taipei Financial Center* – 508 m de altura e 101 pisos – (Figura 3), foi concluído em 2003 e incorpora, também, BED. Este edifício é dotado de uma estrutura resistente mista aço/betão, sendo o BED aplicado caracterizado por uma elevada trabalhabilidade e resistência à compressão (70 MPa). As composições utilizadas incorporaram sílica de fumo e escória granulada de alto-forno moída.

Outra aplicação típica deste tipo de betão está relacionada, também, com obras especiais, como é o caso das pontes. A ponte da Normandia (Figura 4), situada em França, foi construída durante 1988 e 1994, tem um comprimento total de 2141 m e o vão central é de

856 m que, aquando da sua inauguração (Janeiro de 1995), era o maior do mundo para este tipo de pontes (estaiadas). O BED utilizado foi composto por 425 kg/m^3 de cimento composto, incorporando 8% de sílica de fumo, e por uma razão A/L de 0.36. Aos 28 dias de idade atingiu uma resistência média de 79 MPa e foi colocado em obra com um espalhamento compreendido entre 450 e 560 mm.

Figura 3 – *Taipei Financial Center*, Taiwan.

Figura 4 – Ponte da Normandia, França.

Outra ponte emblemática construída com BED é o viaduto de Millau (Figura 5), projectado de forma a garantir um período de vida útil de 120 anos. O BED utilizado atingiu uma resistência à compressão aos 28 dias de idade na ordem dos 60 MPa. Esta obra de arte tem 2460 m de comprimento, 340 m de altura máxima (mais 20 m que a torre Eiffel), vão

máximo de 342 m e durante a sua construção foram gastos cerca de 85000 m^3 de betão, dos quais 50000 m^3 de BED, e a sua construção decorreu entre Outubro de 2001 e Dezembro de 2004.

Em Portugal, existem já várias aplicações deste tipo de betão, sendo de destacar as aqui apresentadas: ponte Vasco da Gama (Figura 6), situada na cidade de Lisboa, e Edifício do "Centro de Coordenação e Controlo de Tráfego Marítimo e Segurança" do porto de Lisboa (Figura 7).

Figura 5 – Viaduto de Millau, França.

Figura 6 – Ponte Vasco da Gama, Lisboa.

A ponte Vasco da Gama é a mais longa da Europa, com os seus 17,2 km de comprimento e o vão principal é de 420 metros. Para a sua construção (concluída em 1998) foi, pela primeira vez em Portugal, exigido à empresa fornecedora de betão pronto um BED, satisfazendo um elevado padrão de qualidade. Para além das usuais preocupações com a

resistência e a trabalhabilidade do betão, exigiu-se uma durabilidade tal que assegurasse um período de vida útil de 120 anos, sem necessidade de intervenções de manutenção e reparação de grande vulto. Identificados os principais mecanismos de degradação do betão, foi possível estabelecer rigorosos critérios de durabilidade, cujo cumprimento se revelou condicionante. Satisfazendo as exigências de durabilidade, foi possível colocar em obra betões com abaixamentos medidos no cone de Abrams compreendidos entre 200 mm e 230 mm e atingir resistências à compressão médias aos 28 dias de idade de 61.9 MPa a 77.3 MPa. Para tal, foram fabricadas composições com 360 kg/m^3 de cimento, 20% de cinzas volantes e com uma razão A/L compreendida entre 0.34 e 0.31 (Taborda (1998)).

Figura 7 – Edifício do "Centro de Coordenação e Controlo de Tráfego Marítimo e Segurança" do porto de Lisboa.

O Edifício do "Centro de Coordenação e Controlo de Tráfego Marítimo e Segurança" do Porto de Lisboa encontra-se localizado em ambiente marítimo, portanto numa zona particularmente agressiva, sujeita, nomeadamente, à acção dos cloretos. De acordo com o descrito por Appleton *et al* (2005) a qualidade necessária aos betões foi definida conforme preconizado na NP ENV206 (1993) e na E378 (1996), tendo sido determinadas as respectivas classes de exposição ambiental. Este tipo de abordagem resultou na imposição de restrições a cumprir relativamente à classe de resistência dos betões, respectivos teores em cimento, relações A/L e espessuras de recobrimento. Contudo, o estabelecimento destas restrições tem como base um período de vida útil de 50 anos, que se considerou insuficiente para uma obra desta natureza. Assim, foi especificado um conjunto de requisitos para o betão, considerados capazes de adequarem a qualidade do betão ao ambiente agressivo em questão. Neste sentido, foram impostos, adicionalmente, os seguintes requisitos, a nível da composição do betão: adopção obrigatória de sílica de fumo (15 a 30 kg/m^3); relação A/C inferior a 0.4; dosagem de cimento entre 350 a 400 kg/m^3. Foram, também, especificados requisitos adicionais ao nível do desempenho das composições, consubstanciados em valores limites dos resultados de determinados ensaios: penetração de água; absorção de água por capilaridade; resistência à penetração de cloretos; porosidade. O estudo da composição a adoptar conduziu a uma composição com 440 kg/m^3 de cimento, 40 kg/m^3 de sílica de fumo, uma relação A/L de 0.35 e a necessidade de utilizar um SP. Com esta composição foram atingidos todos os requisitos

impostos, tendo-se obtido uma resistência à compressão média de 89 MPa.

6. BETÕES COM ELEVADO VOLUME DE CINZAS VOLANTES

Conforme referido, actualmente, o principal campo de aplicação dos BED confina-se a obras especiais, e este tipo de betão deverá continuar a ter um impacto moderado na indústria da construção, sendo a sua aplicação não generalizada e condicionada a casos concretos, abrangendo apenas alguns nichos de mercado. Devido à simplicidade tecnológica, ao reduzido custo inicial e à ampla vantagem ambiental, os betões produzidos com SP e grandes volumes de cinzas volantes ou escórias poderão ter um elevado impacto na indústria da construção. O seu uso pode ser estendido a diversos tipos de estruturas, aproveitando uma melhoria significativa de determinadas características específicas do material, nomeadamente da sua durabilidade.

O betão, devido à elevada quantidade utilizada na construção, é um dos veículos ideais para a incorporação segura e económica de milhões de toneladas de resíduos e subprodutos industriais, como é o caso das cinzas volantes provenientes de centrais termoeléctricas. Assim, se se revelar exequível, a substituição de grandes quantidades de cimento por cinzas volantes, será altamente vantajosa sob o ponto de vista da economia, da eficiência energética, da durabilidade e dos benefícios ecológicos e ambientais em geral (Malhotra e Mehta (2002)).

A produção mundial de cinzas de carvão é estimada em mais de 700 milhões de toneladas por ano, das quais pelo menos 70% (cerca de 500 milhões de toneladas) são cinzas volantes que são adequadas e podem ser usadas como adição pozolânica em betões ou outros produtos de cimento (Mehta (1999_b)). Infelizmente, apenas aproximadamente 20% das cinzas volantes disponíveis mundialmente são utilizadas para o fabrico de cimento e de betão. Neste contexto, e de modo a assegurar um desenvolvimento sustentável da indústria do betão, o emprego de subprodutos pozolânicos e cimentícios deve ser encorajado e substancialmente aumentado (Malhotra e Mehta (2002)). Uma maior reutilização de cinzas volantes na indústria do betão, associada a uma substituição da dosagem de cimento contribuirá, certamente, para a redução de um importante problema de impacte ambiental. Assim, a incorporação de elevados volumes de cinzas volantes em betões é um dos meios possíveis para produzir um betão mais "amigo do ambiente".

Nestas circunstâncias, desenvolveu-se um programa experimental contemplando o fabrico e a caracterização experimental de três composições de betão distintas, incorporando elevadas quantidades de cinzas volantes. As composições de betão estudadas foram produzidas com 400, 500 e 600 kg/m^3 de ligante e com uma quantidade de substituição de cimento por cinzas volantes constante e igual a 60% (em massa). O seu comportamento foi caracterizado experimentalmente, incidindo na avaliação das suas principais propriedades relacionadas com a trabalhabilidade, com as resistências mecânicas e com a durabilidade. A durabilidade das composições estudadas foi avaliada por intermédio de ensaios de permeabilidade ao oxigénio e à água, de absorção de água por imersão e por capilaridade, de resistividade e de determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por meio de ensaios de migração em regime não estacionário.

Maior desenvolvimento acerca da campanha experimental realizada está disponível em Camões (2005), (2006).

6.1. Materiais, fabrico e conservação

Como materiais constituintes das três diferentes composições de betão foram seleccionados: cimento Portland CEM I 42.5R, cinzas volantes (CV), provenientes da Central

Termoeléctrica do Pego, areia fluvial silíciosa (máxima dimensão de 2.38 mm e módulo de finura igual a 2.53), brita granítica (máxima dimensão de 9.53 mm e módulo de finura igual a 5.75) e um SP.

Tabela 2 – Composição e trabalhabilidade dos betões.

Composição	A/L	CEM (kg/m^3)	CV (kg/m^3)	Areia (kg/m^3)	Brita (kg/m^3)	SL (mm)	F (mm)
C400	0.27	160	240	780	1170	185	480
C500	0.23	200	300	731	1097	175	470
C600	0.20	240	360	685	1027	195	510

As composições dos betões produzidos apresentam-se na Tabela 2, bem como os resultados dos ensaios de abaixamento (SL) e espalhamento (F).

As dosagens dos agregados foram determinadas experimentalmente de modo a maximizar a compacidade do esqueleto granular, tendo-se obtido uma relação brita/areia igual a 1.5. A razão A/L adoptada para cada composição foi estabelecida por intermédio de amassaduras experimentais prévias, realizadas com o objectivo de obter um abaixamento similar em todas as composições de cerca de 185 ± 10 mm.

De cada uma das composições produzidas foram recolhidos provetes cúbicos de 100 mm de aresta e cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura com o objectivo de avaliar, respectivamente, a resistência à compressão e a resistência à tracção por compressão diametral. Para cada composição, foi ainda moldada uma placa de betão de modo a permitir a extracção de carotes, posteriormente submetidos a ensaios relacionados com a aferição de indicadores de durabilidade.

Após a betonagem, os provetes foram mantidos durante 48 horas a uma temperatura de 21 ºC e 80% de humidade relativa. Decorrido esse período de tempo, os provetes foram desmoldados e conservados imersos em água à temperatura de 21 ºC até à data de realização dos ensaios.

6.2. Apresentação e análise dos resultados experimentais

Na Tabela 3 apresentam-se os principais resultados obtidos na campanha experimental desenvolvida. Para cada ensaio apresentam-se os valores médios obtidos, seguidos dos respectivos coeficientes de variação (δ).

6.3. Resistência à compressão e resistência à tracção por compressão diametral

Na Figura 8 é possível observar a evolução das resistências mecânicas determinadas ao longo do tempo. Com base nos resultados obtidos, apresentados na Figura 8 e na Tabela 3, é possível constatar que é possível produzir um betão de moderada resistência à compressão contendo apenas 160 kg/m^3 de cimento e que atinge, aos 28 dias de idade, uma resistência à compressão de cerca de 35 MPa. É de realçar que este nível de resistência à compressão corresponde a um valor típico dos betões convencionais e que satisfaz as exigências da grande maioria das aplicações de betão. Aumentando a dosagem de cimento para 200 ou 240 kg/m^3 (valores ainda reduzidos quando comparados com os empregues em betões convencionais), a resistência à compressão aos 28 dias de idade aumenta para cerca de 45 MPa ou 55 MPa, respectivamente.

Tabela 3 – Resultados experimentais.

	Idade (dias)	C400	C500	C600
Resistência à compressão $f_{cm,cubo}$ (MPa) / δ (%)	7	21.3/2.1	26.9/2.2	36.8/2.5
	28	33.9/5.4	47.0/0.1	52.8/2.0
	365	41.0/5.2	58.3/4.4	79.1/2.2
Resistência à tracção por compressão diametral $f_{ctm,sp}$ (MPa) / δ (%)	7	1.6/4.9	2.0/24.1	2.0/7.9
	28	1.8/14.7	2.0/8.9	2.8/2.8
	365	3.9/18.3	4.2/9.7	4.2/15.3
Coeficiente de absorção capilar S_{cm} (kg/m^2/min$^{0.5}$) / δ (%)	365	0.046/9.7	0.047/11.8	0.046/6.3
Porosidade P_m (%) / δ (%)	365	11.9/2.5	10.8/3.1	11.8/3.5
Coeficiente de permeabilidade ao oxigénio K_{Om} (x10^{-17} m^2) / δ (%)	365	3.9/47.6	0.9/26.3	0.1/24.2
Coeficiente de permeabilidade à água K_{Wm} (x10^{-18} m^2) / δ (%)	365	2.16/112.2	0.39/51.0	0.35/77.8
Coeficiente de difusão dos cloretos D_m (x10^{-12} m^2/s) / δ (%)	365	0.96/21.0	0.60/26.9	0.53/54.6
Resistividade eléctrica ρ_m(kΩm) / δ (%)	365	1.09/58.0	1.42/62.9	1.52/37.2

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tracção por compressão diametral podem ser considerados de acordo com o esperado, uma vez que são comparáveis com os normalmente obtidos em betões convencionais com resistência à compressão similar.

É importante salientar que a resistência à compressão deste tipo de betão, para além de garantir a obtenção de valores adequados aos 28 dias para a grande maioria das aplicações práticas, continua a evoluir consideravelmente ao longo do tempo devido à reacção pozolânica das cinzas volantes. Decorrido um ano de idade, os betões estudados atingiram aproximadamente 40 MPa, 60 MPa e 80 MPa de resistência à compressão.

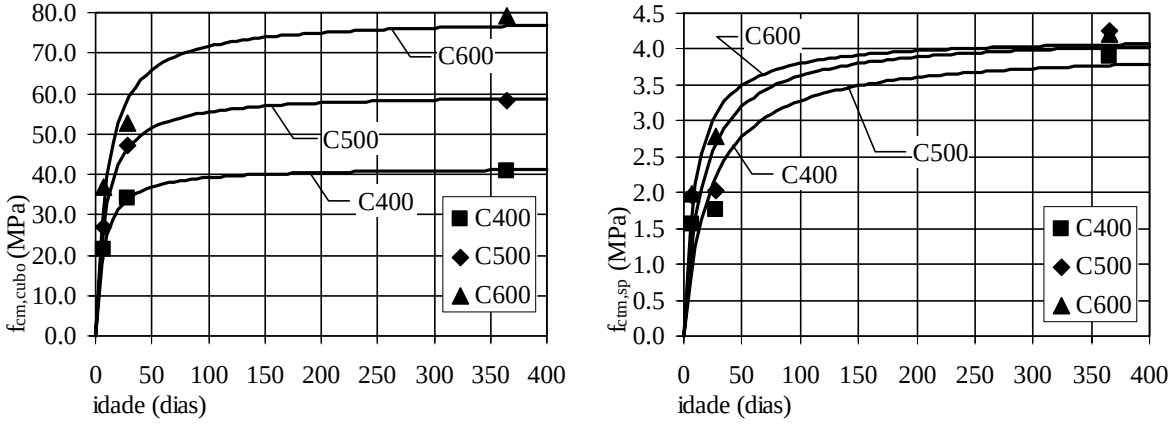

Figura 8 – Evolução com o tempo da resistência à compressão média ($f_{cm,cubo}$) e da resistência à tracção por compressão diametral média ($f_{ctm,sp}$).

6.4. Absorção capilar e porosidade

Os resultados apresentados na Tabela 3 e na Figura 9, relativos ao ensaio de absorção

de água por capilaridade, estão expressos pelo coeficiente de absorção capilar (S_c) que corresponde ao declive da curva representativa da água absorvida por unidade de área *versus* a raiz quadrada do tempo durante as primeiras quatro horas de ensaio.

Por observação dos resultados obtidos, é possível constatar que o ensaio de absorção de água por capilaridade não permitiu distinguir os diferentes betões testados, não tendo sido sensível à variação da quantidade de ligante e da razão A/L dos mesmos. No entanto, os valores obtidos, que podem ser considerados extremamente reduzidos, mostram que estes betões apresentam uma tendência diminuta para absorver água por capilaridade. Como a absorção capilar é um mecanismo preponderante de entrada de água e de agentes agressivos através do betão, os betões em estudo podem ser considerados como de elevada durabilidade.

Os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão sob vácuo (P_m) também não se revelaram sensíveis às diferentes composições testadas. Os valores alcançados atingiram valores relativamente elevados, nomeadamente quando comparados com os restantes indicadores de durabilidade determinados, o que parece indicar que estes betões têm uma porosidade aberta considerável mas que a rede de poros é discreta, ou seja, que há uma reduzida interconectividade entre os poros. O elevado teor de carbono das cinzas volantes também pode justificar o ocorrido pois, como é sabido, as partículas de carbono apresentam uma grande apetência em absorver água.

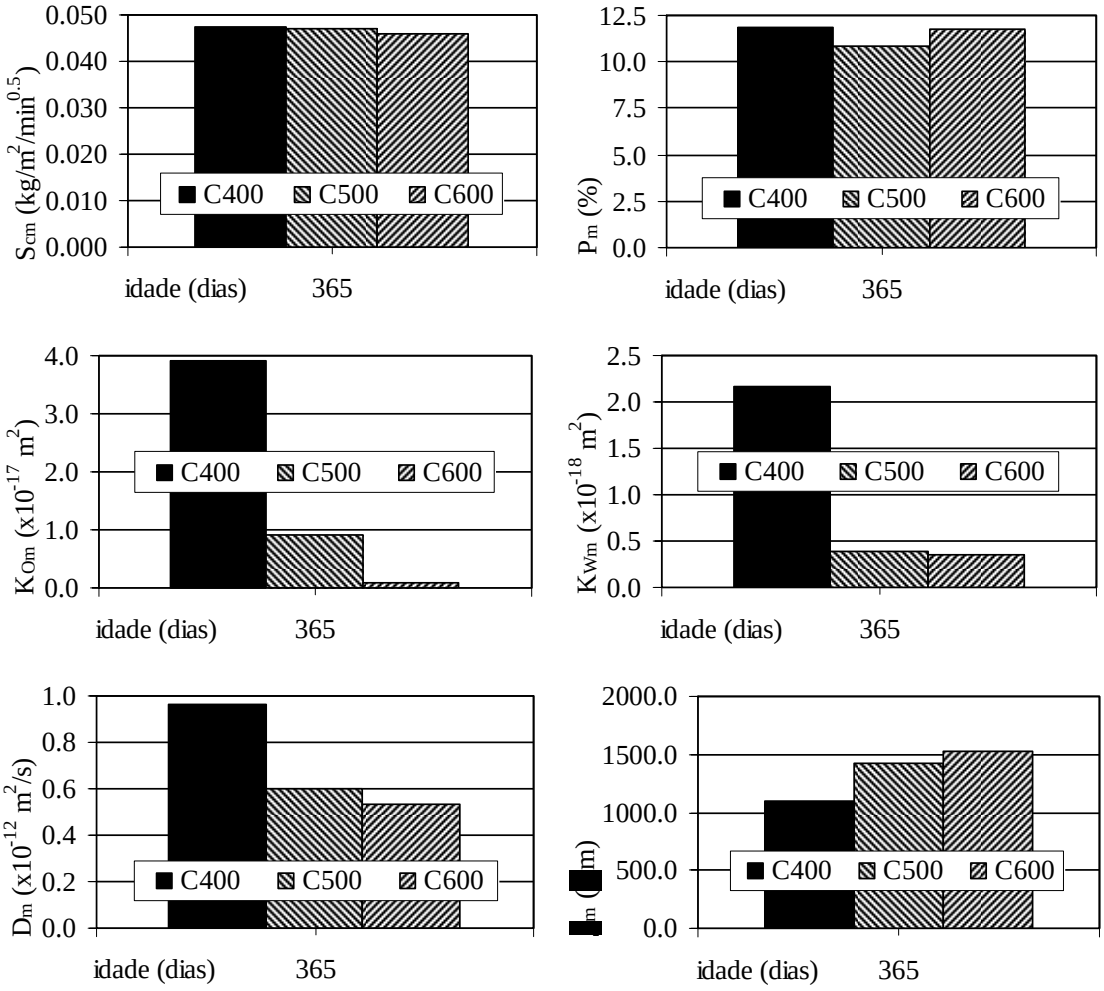

Figura 9 – Resultados dos ensaios de durabilidade.

6.5. Permeabilidade ao oxigénio e à água

Observando os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade ao oxigénio (K_{Om}) e à água (K_{Wm}), é possível constatar que o aumento da quantidade de ligante suscitou uma redução dos respectivos coeficientes de permeabilidade, influenciando favoravelmente o desempenho das composições. Este aspecto é aparentemente mais relevante quando a composição C400 é comparada com as restantes. Relativamente à permeabilidade à água, parece não haver ganhos significativos em aumentar a quantidade de ligante de 500 (C500) para 600 kg/m^3 (C600). Os resultados obtidos, em geral, revelaram-se reduzidos sendo possível classificar os betões estudados como de elevada resistência à penetrabilidade dos fluidos testados.

6.6. Penetração de cloretos

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 3 e na Figura 9, o coeficiente de difusão dos cloretos por migração (D_m) diminui com o aumento da dosagem de ligante. Este efeito é mais pronunciado aquando do acréscimo de ligante de 400 para 500 kg/m^3 do que de 500 para 600 kg/m^3. Atendendo aos resultados experimentais apresentados por Gjørv (1996), os valores de D_m determinados indicam que estes betões são dotados de uma extrema resistência à penetração de cloretos.

6.7. Resistividade eléctrica

A resistividade eléctrica foi determinada utilizando a intensidade de corrente inicial do ensaio de migração de cloretos. Os valores da resistividade eléctrica (ρ_m) foram determinados de acordo com a lei de Ohm. A Tabela 3 e a Figura 9 mostram que, em geral, os resultados obtidos estão em concordância com os alcançados no ensaio de migração de cloretos. Os resultados demonstram que existe uma forte relação entre o coeficiente de difusão dos cloretos por migração (D_m) e a resistividade eléctrica (ρ_m) e que esta grandeza permite detectar as diferenças de resistência à penetração de cloretos associadas às diferentes quantidades de ligante e respectivas razões A/L usadas.

7. CONCLUSÕES

O BED devido, fundamentalmente, à sua elevada durabilidade, é especialmente adequado para construções situadas em ambientes particularmente agressivos. A utilização deste tipo de betão permite que as estruturas possam ter um elevado tempo de vida útil, de 100, ou mais, anos e pode ser considerado como uma das maiores evoluções sofridas na tecnologia dos betões. Contudo, esta evolução não pode ser considerada como revolucionária e os BED devem ser entendidos como uma continuidade dos betões convencionais. São betões que podem ser produzidos com o mesmo tipo de materiais mas onde é exigido um controlo criterioso das matérias-primas e da sua colocação em obra. A principal diferença destes betões reside no facto de os BED incluírem um adjuvante SP que permite uma redução substancial da relação A/L, para valores inferiores a 0.4.

Os BED são fabricados, em geral, recorrendo a uma elevada dosagem de cimento, e são dotados de elevadas resistências mecânicas e durabilidade acrescida. Contudo, para a maioria das aplicações práticas, a resistência à compressão de um betão convencional é suficiente. No entanto, não é expectável que estes BED venham a ser de utilização generalizada, mas sim, que, tal como actualmente, sejam aplicados em situações particulares

tais como pontes e edifícios altos.

Por outro lado, é sabido que a produção e o consequente consumo de cimento deve ser diminuído com o objectivo de contribuir para a sustentabilidade da construção Contudo, esta diminuição não deve comprometer o necessário desempenho das estruturas de betão, de forma a garantir a manutenção de períodos de vida útil suficientemente alargados. Assim, se a substituição de elevados volumes de cimento por subprodutos industriais, como é o caso das cinzas volantes, se revelar exequível, será extremamente benéfica sob o ponto de vista ecológico e ambiental. Neste contexto, os betões com elevado volume de cinzas volantes, podem ser uma alternativa bastante interessante. A campanha experimental desenvolvida permitiu concluir que:

- é possível produzir betão de elevada trabalhabilidade com cerca de 35 MPa de resistência à compressão aos 28 dias de idade utilizando apenas 160 kg/m^3 de cimento e 400 kg/m^3 de ligante (C400). Uma vez que este valor de resistência à compressão é suficiente para cumprir os requisitos exigidos na grande maioria das aplicações práticas de betão estrutural, a necessidade de obtenção de níveis de resistência correntes não parece ser obstáculo à utilização mais generalizada deste tipo de betões;
- aumentando a quantidade de ligante para 500 (C500) ou 600 kg/m^3 (C600) e mantendo a percentagem de substituição de cimento por cinzas volantes de 60%, é possível garantir a obtenção de valores de resistência à compressão mais elevados, atingindo aos 28 dias de idade aproximadamente 45 MPa ou 55 MPa, respectivamente;
- comparando este tipo de betão com o betões sem inclusão de adições, constata-se que os betões com elevado volume de cinzas volantes podem-se considerar vantajosos no que concerne ao desenvolvimento da resistência ao longo do tempo. Os resultados obtidos demonstram que é possível atingir resistências à compressão aos 365 dias de idade com cerca de 40 MPa (C400), 60 MPa (C500) e 80 MPa (C600);
- todos os indicadores de durabilidade aferidos indicam que este tipo de betões apresenta elevada durabilidade, o que possibilita a sua classificação como BED.

Portanto, estes betões de elevado desempenho com elevado volume de cinzas volantes, dotados de elevada trabalhabilidade e incorporando materiais de baixo custo apresentam vantagens significativas quando comparados com os betões convencionais. Tendo em vista a generalização da sua aplicação, é importante realçar que, em geral, os requisitos relacionados com as características mecânicas são perfeitamente alcançáveis e que este tipo de betão permite erigir construções mais duráveis e contribuir de maneira significativa para a sustentabilidade da construção.

Contudo, deve ser salientado que os ensaios realizados não englobaram a totalidade das acções ambientais, nomeadamente a resistência ao gelo-degelo. Relativamente a este tipo de agressividade, será expectável que estes betões, devido ao elevado teor de carbono das cinzas volantes, não mantenham o mesmo nível de desempenho.

É também importante referir que as condições de cura reais em obra podem diferir consideravelmente das testadas, o que pode comprometer drasticamente o desempenho destes betões. Para que a aplicação em obra deste tipo de betões tenha sucesso é fundamental assegurar que a cura e conservação sejam particularmente cuidadas.

8. REFERÊNCIAS

Abrams, D.A., Design of concrete mixtures, *Structural materials research laboratory*, Chicago (1918).

Aïtcin, P.-C., The use of superplasticizers in high performance concrete, *High performance concrete – from material to structure*, Yves Malier ed., E&FN SPON, London, 14-33 (1992).

Almeida, I.R., Aspectos práticos relacionados com a produção e a utilização dos concretos de alto desempenho, *Engevista*, Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense, Niterói, I (1), 73-82 (1995).

Appleton, J., Travassos, N., Appleton, P., Edifício do centro de coordenação e controlo de tráfego do porto de Lisboa – Com inclinação sobre o Tejo, Engenharia e Vida, II (14), 22-29 (2005).

Camões, A., Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes, Dissertação de Doutoramento, Universidade do Minho, 1-456 (2002).

Camões, A., Betões de Elevado Desempenho com Elevado Volume de Cinzas Volantes, *Engenharia Civil/Civil Engineering*, Revista do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, 23, 55-64 (2005).

Camões, A., Durability of High Volume Fly Ash Concrete, *International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability*, Madrid, Spain, 19-21, 8 p. (2006).

Coutinho, A.S., *Fabrico e propriedades do betão*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Volume I, Lisboa, 1-401 (1988).

E378, Betões – guia para a utilização de ligantes hidráulicos, Documentação normativa, *especificação LNEC*, Lisboa, 1-11 (1996).

ERMCO, European ready-mixed concrete industry statistics – year 2005, 1-12 (2006).

Larrard, F., Ultra fine particles for making very high performance concretes, *High performance concrete – from material to structure*, Yves Malier ed., E&FN SPON, London, 34-47 (1992).

Gjørv, O.E., Performance and Serviceability of Concrete Structures in the Marine Environment, *Proceedings of Symposium on Concrete for Marine Structures*, Edit. P.K. Mehta, CANMET/ACI, 259-279 (1996).

Malhotra, V.M., Mehta, P.K., *High Performance, High Volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice, and Case Histories*, CANMET, Ottawa, Canada (2002).

Mehta, P.K., Durability of concrete – fifty years of progress?, *Durability of concrete*, P. Kumar Mehta ed., Second International Conference, Montreal, Canada, 1-30 (1991).

Mehta, P.K., Mineral admixtures for concrete – an overview of recent developments, *Advances in cement and concrete*, Proceedings of an Engineering Foundation Conference, Michael W. Grutzeck and Shondeep L. Sarkar ed., University of New Hampshire, ASCE, 243-256 (1994).

Mehta, P.K., Advancements in concrete technology, *Concrete International*, ACI, 21 (6), 69-76 (1999a).

Mehta, P.K., Concrete Technology for Suitable Development, *Concrete International* 21 (11), 47-53 (1999_b).

Mehta, P.K., Aïtcin, P.-C., Principals underlying the production of high performance concrete, *Cement, Concrete and Aggregates*, ASTM, 12 (2), 70-78 (1990).

Neville, A.M., Aïtcin, P.-C., High-performance concrete – an overview, *Materials and structures / Matériaux et constructions*, 31 (206), 111-117 (1998).

NP EN 206-1, Betão – parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade, *IPQ*, Lisboa, 1-84 (2005).

NP ENV 206, 1993, Betão – comportamento, produção e critérios de conformidade, *IPQ*, Lisboa, 1-54 (1993).

PCA, Design and Control of Concrete Mixtures, Portland Cement Association (2003).

Price, W.H., The practical qualities of cement, *ACI journal*, proceedings, 71, 436-444 (1974).

Russell, H.G., ACI defines high performance concrete, *Concrete International*, ACI, 21 (2), 56-57 (1999).

Smith, D.C., The promise of high performance concrete, *Public roads on-line*, http://www.tfhrc.gov/pubrds/fall96/p96au31.htm (1996).

Swamy, R.N., Cement replacement materials, Survey University Press, London (1986).

Taborda, J., Bridge Vasco da Gama – high performance concrete, *Proceedings of the 12th European Ready Mixed Concrete Congress ERMCO98*, Lisboa, 723-735 (1998).

Tennis, P.D., Portland cement characteristics – 1998, *Concrete technology today*, Portland cement association, 20 (2), 1-3 (1998).

Zia, P., Preface, *High performance concrete in severe environments*, ACI SP-140, Paul Zia ed. (1993).

Inovação em betões

Nova normalização e produção de betões especiais

Aires Camões
Rui Miguel Ferreira

Universidade do Minho
Departamento de Engenharia Civil

PEB
Parque de Exposições de Braga
Feiras Internacionais

INOVAÇÃO EM BETÕES

Nova normalização e produção de betões especiais

INOVAÇÃO EM BETÕES
Nova normalização e produção de betões especiais

Comunicações do Seminário

Parque de Exposições de Braga
21 de Setembro de 2006

Editado por

AIRES CAMÕES
Departamento de Engenharia Civil
Universidade do Minho

RUI MIGUEL FERREIRA
Departamento de Engenharia Civil
Universidade do Minho

Texto elaborado a partir da reprodução directa dos originais preparados pelos autores.
Os editores não se responsabilizam por possíveis erros ou omissões.

(c) 2006 Universidade do Minho, Portugal

Índice

Prefácio VII

NOVA NORMALIZAÇÃO IX

1. Evolução da normalização dos betões 1
MANUEL JOÃO ESTEVES FERREIRA
(LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil)

2. A Directiva comunitária dos Produtos de Construção - Perguntas frequentes sobre a directiva 7
MARIA ODETE FERNANDES
(LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil)

3. Classificação requisitos e métodos de verificação 25
ARLINDO GONÇALVES
(LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil)

4. Especificação, controlo da conformidade e controlo da produção 31
JOÃO CARLOS DUARTE
(APEB – Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto)

PRODUÇÃO DE BETÕES ESPECIAIS 47

5. Possibilidades e desafios do betão auto compactável reforçado com fibras – do laboratório à aplicação real 49
JOAQUIM A.O. BARROS, EDUARDO N.B. PEREIRA, SIMÃO P.F. SANTOS, LÚCIO A.P. LOURENÇO
(UM – Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil)

6. Aplicações de BAC à escala real 69
SANDRA NUNES, HELENA FIGUEIRAS, ANA MARIA PROENÇA, JOANA SOUSA COUTINHO, JOAQUIM FIGUEIRAS
(FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, LABEST)

7. Betões de elevado desempenho 81
AIRES CAMÕES
(UM – Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil)

8. Projecto de durabilidade de betão 101
RUI MIGUEL FERREIRA
(UM – Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil)

Prefácio

Nos últimos anos, tem sido produzida nova normalização nacional e europeia no domínio dos betões. Esta actividade normativa, entre outros factores, pretende acompanhar tanto as evoluções recentes surgidas ao nível do material, com o advento dos betões de elevado desempenho e dos betões autocompactáveis, por exemplo, como as novas abordagens no sentido de propiciar a construção de estruturas de betão armado mais duráveis, capazes de cumprir eficazmente longos períodos de vida útil e novas preocupações, relacionadas com a sustentabilidade da construção, abrangendo os materiais eco eficientes.

Neste contexto, o presente Seminário pretende ser um veículo de transmissão do conhecimento acerca das inovações recentes relacionadas com o betão. Considera se ser este o momento propício para divulgar junto da comunidade técnica alguns dos trabalhos efectuadas por especialistas nacionais, fomentando desta forma a discussão sobre o presente e o futuro do betão na construção.

Esta publicação reúne as comunicações apresentadas, onde resultados importantes são expostos e analisados por especialistas.

Um agradecimento muito sincero e especial merecem os conferencistas e autores das comunicações, que prontamente se disponibilizaram a partilhar o seu conhecimento, demonstrando a qualidade da investigação desenvolvida neste domínio e ajudando, assim, ao cumprimento dos objectivos propostos para este evento.

Temos esperança que este Seminário venha a ser útil para os participantes e os sensibilize para as questões abordadas.

Braga, 21 de Setembro de 2006

Aires Camões
Rui Miguel Ferreira