

# BETÕES DE ELEVADO DESEMPENHO DE CUSTO REDUZIDO UTILIZANDO MATERIAIS CORRENTES

Aires Camões  
Assistente  
Dep. Eng<sup>a</sup> Civil - Universidade do Minho  
Campus de Azurém - 4800 Guimarães

Patrício Rocha  
Assistente do 1<sup>o</sup> Triénio  
Escola Superior de Tecnologia e Gestão  
Apartado 574, 4901 Viana do Castelo

J.C. Pereira  
Escola Superior de Tecnologia e Gestão  
Apartado 574, 4901 Viana do Castelo

J. B. de Aguiar  
Professor Associado  
Dep. Eng<sup>a</sup> Civil - Universidade do Minho  
Campus de Azurém - 4800 Guimarães

Said Jalali  
Professor Auxiliar  
Dep. Eng<sup>a</sup> Civil - Universidade do Minho  
Campus de Azurém – 4800 Guimarães

## SUMÁRIO

Para a produção de betões de elevado desempenho (BED) é genericamente aceite que são necessários materiais criteriosamente seleccionados, obrigando assim a um acréscimo significativo do custo inicial dos BED quando confrontados com betões correntes. Este trabalho pretende abordar duas características: possibilidade de produzir betões de elevado desempenho que incorporam materiais considerados correntes, nomeadamente cinzas volantes com teor de inqueimados superior ao máximo regulamentar e inertes britados; verificação do efeito do teor de inqueimados na resistência e durabilidade dos BED. Para tal, processou-se ao melhoramento das cinzas volantes através da eliminação das partículas de dimensão superior a 75  $\mu\text{m}$ , reduzindo assim cerca de 50% do teor em carbono.

Foram realizadas diferentes composições de betão, incorporando cinzas na proporção de 0, 20%, 40% e 60% de substituição de cimento Portland e utilizando 0, 20% e 40% de cinzas com dimensões inferiores a 75  $\mu\text{m}$  (cinzas *melhoradas*). Os valores das resistências à compressão e respectivos coeficientes de difusão foram analisados, satisfazendo assim o propósito deste trabalho. Os resultados obtidos permitem concluir que é possível a produção de BED com cinzas volantes de baixa qualidade e inertes britados. As resistências à compressão determinadas indiciam a possibilidade de produção de BED com percentagens de substituição de cinzas volantes até cerca de 40%, permitindo a obtenção de cerca de 60 a 65 MPa de resistência à compressão aos 56 dias de idade. Foi também possível constatar que a influência do teor de inqueimados das cinzas volantes é reduzida, não sendo significativa na resistência e durabilidade dos BED analisados. A durabilidade dos betões produzidos, aferida pelo valor do seu coeficiente de difusão, aumentou drasticamente com a substituição de cimento Portland por cinzas volantes em percentagens convenientes.

## 1. INTRODUÇÃO

No decorrer dos últimos anos a utilização de betões de elevado desempenho (BED) tem vindo a aumentar. A crescente utilização deste material surge como resultado dos recentes avanços no conhecimento e aplicação de adjuvantes, nomeadamente superplastificantes e adições activas. Este tipo de material tem vindo a ser produzido recorrendo à utilização de sílica de fumo e/ou cinzas volantes de elevada qualidade e inertes convenientemente seleccionados. Assim, o custo inicial dos betões de elevado desempenho vem substancialmente agravado, quando comparado com os betões correntes.

A utilização de BED em estruturas especiais pode surgir como uma alternativa viável aos betões correntes em determinados casos. Betões com resistência à compressão de cerca de 120 MPa tem vindo a ser utilizados com sucesso e com alguma frequência em construções especiais.

No entanto, a utilização generalizada de BED necessita de uma conveniente adaptação da industria de construção. Tradicionalmente este tipo de industria mostra alguma lentidão na aplicação de novos materiais e soluções. Assim, a utilização de BED dificilmente, a curto prazo, não passará de uma excepção à regra dentro do mercado da construção, estando vocacionada para obras especiais.

Em muitos países, os betões considerados correntes não ultrapassam um resistência de 25 a 35 MPa. Assim, sugere-se a adopção de um betão de elevado desempenho, atingindo cerca de 60 MPa de resistência à compressão aos 28 dias de idade, como um nível intermédio para a aplicação generalizada de BED com resistências superiores em estruturas correntes, permitindo, assim, uma maior assimilação da industria de construção.

A utilização de materiais correntes para a fabricação de BED é justificada como sendo uma forma de tornar o produto competitivo em termos de custos iniciais quando comparado com os betões correntes. Em Portugal, o custo da sílica de fumo é cerca de 10 vezes o do cimento. Para uma dosagem corrente (10% do peso de cimento) a adição de sílica de fumo implicaria elevar o preço do material cimentício para o dobro. De modo a permitir reduzir os custos de produção, analisaram-se composições com dosagens elevadas de cinzas volantes (até 60%), possibilitando, também, o escoamento das cinzas, ajudando assim a resolver um problema ambiental.

Neste contexto, este trabalho pretende realçar a possibilidade de produção de betões de elevado desempenho incorporando cinzas volantes de baixa qualidade e inertes correntes, disponíveis no mercado. As cinzas volantes utilizadas (*conforme fornecidas*) apresentam uma perda ao fogo elevada (cerca de 7%), tendo-se reduzido o seu valor para cerca de 3.5% com a separação por peneiração efectuada. Os inertes não sofreram qualquer tipo de tratamento prévio (lavagem, peneiração, etc.) e são todos (incluindo as areias) provenientes da britagem de rochas graníticas. Foi assim possível obter betões com valores da resistência à compressão aos 56 dias de idade na ordem dos 60 a 65 MPa.

## 2. MATERIAIS E COMPOSIÇÕES UTILIZADAS

### 2.1. Inertes

É geralmente aceite que os inertes com superfícies arredondadas, necessitam menos água na mistura do betão e por esta razão são preferidos no fabrico dos BED [1]. Cánovas et al. [2], para além de confirmar este princípio acrescenta que o módulo de finura da areia deve ser aproximadamente 3. De Larrard [3] afirma a importância da porosidade e da absorção de água dos inertes, indicando que a porosidade é o ponto crítico dos inertes no que diz respeito à absorção de água, devendo o seu valor ser inferior a 1% para os inertes grossos. O coeficiente de forma dos inertes recomendado deve ser superior a 0.25, enquanto a percentagem de desgaste, obtida através da realização do ensaio de Los Angeles deve ser no máximo igual a 15%.

Os inertes usados neste trabalho são produzidos por britagem de rocha granítica disponível na região, os quais não respeitam as características anteriormente recomendadas [4] para os BED. Na tabela 1, apresentam-se as características dos inertes empregues.

Tabela 1 - Características dos inertes

Peneiro / característica	Areia 1	Areia 2	Brita
3/8"	0	0	3.42
4	0	9.82	94.72
8	2.51	68.32	98.54
16	28.69	87.80	98.85
30	53.41	93.95	99.03
50	75.99	96.51	99.18
100	86.65	97.84	99.35
200	97.38	98.65	99.53
Máxima dimensão (mm)	2.38	4.76	9.53
Módulo de finura	2.47	4.54	5.93
Coeficiente de forma	-	-	0.21
Densidade específica	2.61	2.53	2.39
Absorção de água (%)	0.51	1.88	2.35
Los Angeles (%)	-	-	21

### 2.2. Cimento Portland

Foi usado neste trabalho o cimento Portland tipo I, classe 42.5. A composição química bem como as propriedades físicas e mecânicas do cimento são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 - Características do cimento Portland

Perda ao fogo (%)	2.52	Massa específica	3.15
SiO <sub>2</sub> (%)	19.71	Superfície específica de Blaine (m <sup>2</sup> /Kg)	384.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	5.41	Granulometria >90 µm (%)	1.7
FE <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.34	Exigência de água (%)	28.3
CaO total (%)	61.49	Início de presa	3h05
MgO (%)	2.58	Fim de presa	4h03
SO <sub>3</sub> (%)	3.22	Expansibilidade	1
Cloretos (%)	0.01	Resistência à compressão - 2 dias (MPa)	33.1
CaO livre (%)	0.81	Resistência à compressão - 7 dias (MPa)	44.9
Resíduos insolúveis	1.94	Resistência à compressão - 28 dias (MPa)	53.6

### 2.3. Cinzas volantes

É normalmente aceite que a exigência de água em argamassas e betões está directamente dependente do teor de carbono presente na constituição das cinzas volantes; tanto maior é a necessidade de água para produzir uma pasta de consistência normal quanto mais elevado for o teor de carbono nas cinzas volantes. Algum deste carbono fica disponível para absorver não só significativas quantidades de água mas, também, as adições químicas próprias dos betões, tais como introdutores de ar, redutores de água e retardadores de presa [5].

Grande parte das normas limitam o teor de carbono nas cinzas volantes a 5%, enquanto muito poucas admitam valores até 7% [6]. Algumas investigações [7] indicam que as cinzas volantes a usar nos BED devem cumprir as especificações das normas ASTM C618 ou AASHTO M295 que limitam a perda ao fogo a 6% e 5% respectivamente. A norma europeia EN450, adoptada por Portugal – NP EN450 – limita esta quantidade a 5% embora admita como máximo valor 7% caso existam regulamentos ou normativas nacionais que o permitam. Isto significa que cinzas volantes com elevados teores de carbono não podem ser usadas no fabrico do betão.

As cinzas volantes utilizadas neste trabalho são provenientes da central termoeléctrica do Pego, com teores de carbono que variam entre 6% e 9%, a que corresponde um valor médio superior a 7%. Na tabela 3 são apresentadas as principais características das cinzas volantes, *conforme produzidas*, apresentando-se na tabela 4 os valores da perda ao fogo das cinzas volantes *conforme produzidas* e após separação através de um peneiro com abertura de 75  $\mu\text{m}$ .

Tabela 3 - Características das cinzas volantes

Humidade (%)	0.09	Total: $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	87.73
Perda ao fogo (%)	7.03	$\text{Na}_2\text{O}$ (%)	0.44
Finura > 45 $\mu\text{m}$ (%)	27.53	$\text{K}_2\text{O}$ (%)	1.53
Finura > 75 $\mu\text{m}$ (%)	14.30	$\text{MgO}$ (%)	1.45
CaO livre (%)	0.00	$\text{SO}_3$ (%)	0.25
CaO total (%)	2.25	Cloretos (%)	0.00
$\text{SiO}_2$ (%)	58.46	$\text{P}_2\text{O}_5$ (%)	0.16
$\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	21.47	$\text{TiO}_2$ (%)	0.93
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	7.81	Massa específica	2.36

Tabela 4 – Perda ao fogo das cinzas volantes

Cinzas Volantes	Perda ao Fogo (%)
Total ( <i>conforme fornecidas</i> )	7
$\phi > 75 \mu\text{m}$	26.5
$\phi < 75 \mu\text{m}$ ( <i>cinzas melhoradas</i> )	3.5

É possível observar que o carbono não queimado concentra-se principalmente nas partículas de dimensão superior a 75  $\mu\text{m}$ , validando o interesse da análise de betões produzidos com cinzas da mesma proveniência mas com teores de inqueimados substancialmente diferentes.

## 2.4. Composição dos betões

Foram realizadas seis amassaduras correspondentes a uma quantidade constante de ligante (cimento + cinzas volantes) e uma relação água/ligante também constante. A quantidade de ligante foi fixa em 500 Kg/m<sup>3</sup> e a relação água/ligante em 0.28. As quantidades dos inertes a utilizar foram estimadas através da aplicação do método de Faury [8]. Na tabela 5 apresenta-se as dosagens empregues na confecção dos betões ensaiados. Na mnemónica utilizada para referenciar os betões produzidos, "CV" significa cinzas volantes *conforme recebidas*, "CVm" cinzas volantes *melhoradas* e o número a seguir significa a percentagem de substituição de cimento por cinzas volantes.

Tabela 5 - Dosagem dos betões

Betão	Cimento	Cinzas volantes	Brita	Areia 1	Areia 2
CV 0	500	0	863	306	516
CV 20	400	100	857	327	469
CVm 20					
CV 40	300	200	851	349	423
CVm 40					
CV 60	200	300	850	370	374

A quantidade de superplastificante a utilizar nas várias misturas, foi estimada recorrendo aos resultados de uma série de ensaios de fluidez com o cone de Marsh sobre pastas, que indicaram para quantidade óptima de adição de SP - ponto de saturação - valores entre 0.5% a 1% do peso de ligante [9]. Por razões económicas, consubstanciadas com o facto de não haverem diferenças significativas que justifiquem a adopção de valores mais elevados, foi adoptado na realização deste trabalho o valor de 0.5% de peso de material sólido do superplastificante em relação à quantidade de ligante.

## 3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - EVOLUÇÃO AO LONGO DO TEMPO

A resistência à compressão foi determinada através do ensaio à compressão uniaxial de provetes cúbicos 100x100x100 mm<sup>3</sup> moldados para as diferentes amassaduras mencionadas no ponto 2.4. Os provetes foram ensaiados às idades de 3, 7, 28, 56 e 259 dias e conservados à temperatura de 21°C e 100% de humidade relativa. Foram ensaiados três provetes em cada idade e os respectivos valores médios são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 - Resistência à compressão e abaixamento dos betões

Betão	Abaixamento (cm)	f <sub>c</sub> (MPa)				
		3 dias	7 dias	28 dias	56 dias	259 dias
CV 0	0	53.3	57.3	64.5	67.5	67.66
CV 20	3.5	44.7	47.3	59.0	64.8	73.55
CVm 20	3.5	36.8	49.6	62.5	65.9	68.3
CV 40	6.0	33.4	35.6	55.8	60.4	66.31
CVm 40	5.0	29.9	38.7	57.3	60.5	66.5
CV 60	3.5	13.5	20.1	35.1	43.0	56.73

Os resultados obtidos indicam que os ganhos de resistência dos betões com maiores percentagens de substituição de cimento por cinzas volantes é mais lento nas primeiras idades, i.e., até aos sete dias, devido ao relativamente longo período de indução da reacção pozolânica motivada pela adição das cinzas volantes. De notar também que aos 56 dias de idade a resistência das amassaduras com cinzas volantes é de cerca de pelo menos 90% - com excepção de CV 60 – da resistência do betão de referência, sem cinzas volantes, mas com tendência a continuar a recuperar posteriormente como se prova através dos valores obtidos aos 259 dias.

Isto confirma os resultados apresentados por outros investigadores, de que os ganhos de resistência em betões com cinzas volantes são mais lentos do que os obtidos com betões de referência, sem cinzas volantes. De realçar que aos 259 dias de idade os betões com 20% de substituição por cinzas volantes atingem resistências superiores à dos betões de referência, o que indicia a favorável acção das cinzas volantes quando adicionadas em quantidades convenientes. Mesmo para percentagens maiores de substituição de cimento por cinzas volantes a redução de resistência à compressão apenas é notada de forma substancial para uma substituição de 60%.

Comparando as resistências à compressão determinadas em betões produzidos com cinzas volantes *conforme fornecidas* com os betões onde foram incorporadas cinzas volantes *melhoradas*, não se detectaram diferenças significativas, comprovando o bom desempenho de cinzas com perda ao fogo elevada.

Dada a gama de valores obtidos nestes ensaios, foi aferido um modelo numérico de ajuste da evolução da resistência à compressão com o tempo, por forma a avaliar a sua aplicabilidade a este tipo de betões.

O modelo teórico adoptado, proposto por Jalali [10], é representado pela equação 1. Os resultados da aproximação, recorrendo à análise da regressão não linear obtida pelo método dos mínimos quadrados, são apresentados na tabela 7 e nas figuras 1 e 2.

$$f_c = f_{\max} [ 1 - \exp ( -k t^n ) ] \quad (1)$$

A expressão (1) sugere que a resistência à compressão “ $f_c$ ” para uma determinada idade “ $t$ ”, é função da resistência máxima “ $f_{\max}$ ”, quando o tempo tende para o infinito, de um parâmetro “ $k$ ” que é variável com a temperatura de cura e calor de hidratação e outro parâmetro, “ $n$ ”, relacionado com a morfologia do cimento hidratado.

Tabela 7 - Valores das variáveis resultantes da regressão não linear

Betão	F <sub>máx</sub>	K	n	$\Sigma\Delta^2$	$\Delta$
CV 0	68.44732	1.05941	0.30018	2.4696	0.3143
CV 20	89.80926	0.52158	0.21552	6.1130	0.4945
CVm 20	67.81281	0.44735	0.53277	2.0538	0.2866
CV 40	67.66294	0.37290	0.44016	25.5782	1.0115
CVm 40	66.44997	0.33387	0.51269	4.23708	0.4117
CV 60	59.77837	0.14108	0.54813	0.0823	0.0574

$\Sigma\Delta^2$  - somatório do erro quadrático;  $\Delta$  - erro quadrático médio

Figura 1 – Evolução da resistência ao longo do tempo – CV.

Figura 2 – Evolução da resistência ao longo do tempo – CV e Cvm.

#### 4. PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Tendo como objectivo avaliar o efeito da introdução de cinzas volantes e do seu teor de inqueimados na durabilidade dos betões, foram moldados provetes cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, respeitando as diferentes amassaduras descritas. A durabilidade foi aferida através da realização de ensaios de difusão por migração de cloretos no estado não estacionário [11]. Esta metodologia envolve a aplicação de um potencial de 30 – 40 Volts através de um provete de 50 mm de espessura durante um determinado período de tempo. A profundidade de penetração de cloretos é assim determinada recorrendo a um processo calorimétrico. O coeficiente de difusão pode ser obtido através da aplicação da expressão (2).

$$D = (R.T.L / z.F.U)[(x_d - ax_d^{1/2}) / t] \quad (2)$$

Em que:

- D: coeficiente de difusão ( $m^2/s$ );
- z: valor absoluto de iões de valência (para iões cloreto  $z=1$ );
- F: constante de Faraday ( $F=9.648 \times 10^4$ );
- U: valor absoluto da diferença de potencial (V);
- R: constante dos gases perfeitos ( $R=8.314 \text{ J}/(\text{mole.K})$ );
- T: temperatura da solução (K);
- L: espessura do provete (m);
- $x_d$ : profundidade de penetração (m);
- t: duração do ensaio (s);
- $\text{erf}^{-1}$ : inverso da função erro;
- $c_d$ : concentração de cloretos necessária para haver mudança de cor ( $c_d=0.07 \text{ N}$ );
- $c_0$ : concentração de cloretos na célula superior ( $c_0=2 \text{ N}$ );
- $a = 2 (R.T.L / z.F.U)^{1/2} \text{ erf}^{-1} [1 - (2 c_d / c_0)]$ .

A tabela 8 ilustra os resultados dos ensaios efectuados de difusão por migração de cloretos no estado não estacionário, permitindo, por aplicação da expressão (2), a determinação dos respectivos coeficientes de difusão.

Tabela 8 – Resultados dos ensaios de penetração de cloretos e valor estimado do coeficiente de difusão

Betão	Idade (dias)	Posição Topo/Centro	Duração (s)	$x_d$ (m)	$D$ ( $10^{-12}$ ) $m^2/s$	$D_{médio}$ ( $10^{-12}$ ) $m^2/s$
CV0	87	T	86400	0.0195	7.48	6.58
	84	C	86400	0.0155	5.68	
CV20	86	T	172800	0.0175	3.31	3.15
	82	C	172800	0.0155	3.00	
CV40	89	T	176400	0.0140	2.66	2.27
	80	C	176400	0.0100	1.87	
CVm20	96	T	172800	0.0155	2.95	3.23
	110	C	86400	0.0100	3.51	
CVm40	97	T	117000	0.0065	1.78	1.47
	102	C	172800	0.0065	1.17	

A tabela 8 mostra que o coeficiente de difusão médio decresce com o acréscimo de cinzas volantes na mistura. O coeficiente de difusão médio aumenta de  $1.47E-12$   $m^2/s$  para  $6.58E-12$   $m^2/s$  quando da redução da quantidade de cinzas de 40% para 0. O coeficiente de difusão determinado foi superior nos provetes provenientes do topo dos cilindros, excepto num caso. Este resultado é, contudo, esperado devido ao processo de cura do betão. A parte interior do betão é curada com um teor de água mais elevado do que no topo, onde são de esperar perdas de água durante o processo de cura.

## 5. CONCLUSÕES

É viável a produção de um BED utilizando cinzas volantes de baixa qualidade e inertes britados, sendo possível obter resistências à compressão aos 56 dias de idade na ordem dos 60 a 65 MPa, com percentagens de até 40% de substituição de cimento por cinzas com teores de inqueimados de cerca de 7%.

A substituição de cimento por cinzas volantes no âmbito dos betões de elevado desempenho não reduziu significativamente as propriedades mecânicas exigíveis a um BED.

Pode assim concluir-se que, para obtenção de betões de elevado desempenho, a substituição de cimento por cinzas é vantajosa do ponto de vista económico, desde que adequada ao tipo de aplicação, visto o desenvolvimento da sua resistência ser mais lento.

A expressão proposta por Jalali para a evolução da resistência ao longo do tempo mostrou ser adequada no âmbito dos betões em estudo.

A separação de cinzas volantes e consequente eliminação da fracção mais grossa, provocando uma diminuição de cerca de 50% do teor de inqueimados, não trouxe benefícios significativos quer no desenvolvimento da resistência à compressão quer na evolução do coeficiente de difusão do betão. Assim, as limitações normativas impostas quanto ao teor limite de inqueimados das cinzas não parecem ser adequadas para avaliação da qualidade das mesmas, sendo viável a utilização de cinzas com 7% de teor de inqueimados.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] *State-of-the-Art Report on High Strength Concrete*, Reported by Committee 363, American Concrete Institute, 1992.
- [2] M.F. Cánovas, P.A. Gutiérrez, *Composición y Dosificación de los Hormigones de Alta Resistências y sus Aplicaciones*, Cemento-Hormigon, Número 709, Agosto 1992.
- [3] F. De Larrard, *High Performance Concrete: From the Laboratory to Practical Utilization*, Concrete Technology: New Trends, Industrial Applications, E&FN Spon, Barcelona, November 1994.
- [4] P.A. Gutiérrez, M.F. Cánovas, *High-Performance Concrete: Requirements for Constituent Materials and Mix Proportioning*, ACI Materials Journal, Vol. 93, N.3, May-June 1996.
- [5] V.M. Malhotra, A.A. Ramezaniapur, *Fly Ash in Concrete*, 2<sup>nd</sup> Edition, Canmet, Ottawa, Canada, 1994.
- [6] R.N. Swamy, R.N. Swamy, *Fly Ash and Slag: Standards and Specifications – Help or Hindrance?*, Materials and Structures, Vol. 26, 1993.
- [7] Roy H. Keck, Eugene H. Riggs, *Specifying Fly Ash for Durable Concrete*, Concrete International, April 1997.
- [8] J. Faury, *Le Béton*, Editions Dunod, Paris, 1958.
- [9] A. Camões, et al. – *Low Cost High Performance Concrete Using Low Quality Flay Ash*, ERMCO98, 12<sup>th</sup> European Ready Mixed Concrete Congress, Lisboa, Junho 1998, p.478-486.

- [10] S. Jalali, *Modelling the Overall Rate of Reaction in Lime-Fly Ash Systems*, Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement, Vol. 3, Gothenburg, Sweden, June 1997.
- [11] T. Luping, *Chloride Transport in Concrete – Measurement and Prediction*, Tese de Doutorado, Chalmers University of Technology, Gotemburgo, Suécia, 1996.