

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE BETÕES DE ELEVADO DESEMPENHO COM CINZAS VOLANTES

Aires Camões
Assistente
Dep. Eng^a Civil - Universidade do Minho
Campus de Azurém - 4800 Guimarães

Raimundo Delgado
Professor Associado
FEUP
Rua dos Bragas - 4099 Porto Codex

Patrício Rocha
Assistente do 1^o Triénio
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Apartado 574, 4901 Viana do Castelo

Said Jalali
Professor Associado
Dep. Eng^a Civil - Universidade do Minho
Campus de Azurém – 4800 Guimarães

J. B. de Aguiar
Professor Associado
Dep. Eng^a Civil - Universidade do Minho
Campus de Azurém - 4800 Guimarães

SUMÁRIO

Para a produção de betões de elevado desempenho é genericamente aceite que são necessários materiais criteriosamente seleccionados. Neste trabalho procurou-se realizar betões de elevado desempenho que incorporam materiais considerados correntes, nomeadamente cinzas volantes com teor de inqueimados superior ao máximo regulamentar e inertes britados. Esta intenção foi concretizada através da análise das resistências à compressão e do módulo de elasticidade.

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.

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 apresentam uma perda ao fogo elevada (cerca de 7%), 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 90 dias de idade na ordem dos 65 MPa. São apresentadas neste trabalho as características mecânicas de betões incorporando cinzas volantes em percentagem de substituição de cimento de 0, 20%, 40% e 60%. As características mecânicas determinadas consistiram na aferição da resistência à compressão do betão ao longo do tempo e na determinação do módulo de elasticidade.

Os resultados obtidos são confrontados com expressões preconizadas por outros autores permitindo, assim, tecer algumas considerações quanto à sua aplicabilidade a este tipo de betões.

2. MATERIAIS E DOSAGEM

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 que absorção de água dos inertes está relacionada com essa porosidade, devendo o seu ponto crítico ser inferior a 1% para os inertes grossos. O coeficiente de forma dos inertes recomendado deve ser superior a 0.25, enquanto o factor 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 ₂ (%)	19.71	Superfície de Blaine (m ² /Kg)	384.3
Al ₂ O ₃ (%)	5.41	Granulometria >90 µm (%)	1.7
FE ₂ O ₃ (%)	3.34	Exigência de água (%)	28.3
CaO total (%)	61.49	Início de presa	3h05
MgO (%)	2.58	Fim de presa	4h03
SO ₃ (%)	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 função da trabalhabilidade 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 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.

Tabela 3 - Características das cinzas volantes

Humidade (%)	0.09	Total: SiO ₂ + AL ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	87.73
Perda ao fogo (%)	7.03	Na ₂ O (%)	0.44
Finura > 45 µm (%)	27.53	K ₂ O (%)	1.53
Finura > 75 µm (%)	14.30	MgO (%)	1.45
CaO livre (%)	0.00	SO ₃ (%)	0.25
CaO total (%)	2.25	Cloretos (%)	0.00
SiO ₂ (%)	58.46	P ₂ O ₅ (%)	0.16
Al ₂ O ₃ (%)	21.47	TiO ₂ (%)	0.93
FE ₂ O ₃ (%)	7.81	Massa específica	2.36

As cinzas volantes usadas neste trabalho são provenientes da central termoelétrica 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.

2.4. Dosagem dos betões

Foram realizadas quatro 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/m³ e a relação água/ligante em 0.28. As dosagens dos inertes foram estimadas através da aplicação do método de Faury [8]. Na tabela 4 apresenta-se o resumo das dosagens dos betões ensaiados. Na mnemónica utilizada para referenciar os betões produzidos “CV” significa cinzas volantes e o número a seguir significa a percentagem de substituição de cimento por cinzas volantes.

Tabela 4 - 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
CV 40	300	200	851	349	423
CV 60	200	300	850	370	374

Quanto ao superplastificante (SP), foi estimado recorrendo aos resultados de uma série de ensaios 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 da água [9]. Por razões económicas foi adoptado na realização deste trabalho o valor de 0.5%.

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 moldados com 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 5.

Tabela 5 - Resistência à compressão e abaixamento dos betões

Betão	Abaixamento (cm)	f _c (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
CV 40	6.0	33.4	35.6	55.8	60.4	66.31
CV 60	3.5	13.5	20.1	35.1	43.0	56.73

É evidente 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 aumento do período de indução da reacção pozolânica induzido pela adição das cinzas volantes. De notar também que aos 56 dias de presa a resistência das amassaduras com cinzas volantes é de cerca de 90% da resistência da referência sem cinzas volantes, mas com tendência a continuar a recuperar posteriormente como se prova através dos valores obtidos aos 259 dias. Isto prova o facto, bem conhecido, de que os ganhos de resistência em betões com cinzas volantes é mais lento quando comparados com os betões de referência sem cinzas volantes. De realçar que aos 259 dias de idade os betões com 20% de substituição por cinzas volantes atingem resistência 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 é pouco significativa.

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 Said 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 6 e na figura 1.

$$f_c = f_{m\acute{a}x} [1 - \text{Exp} (-k t^n)] \quad (1)$$

A expressão 1 sugere que a resistência à compressão “ f_c ” para uma determinada idade “ t ”, é função da resistência máxima “ $f_{m\acute{a}x}$ ”, 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.

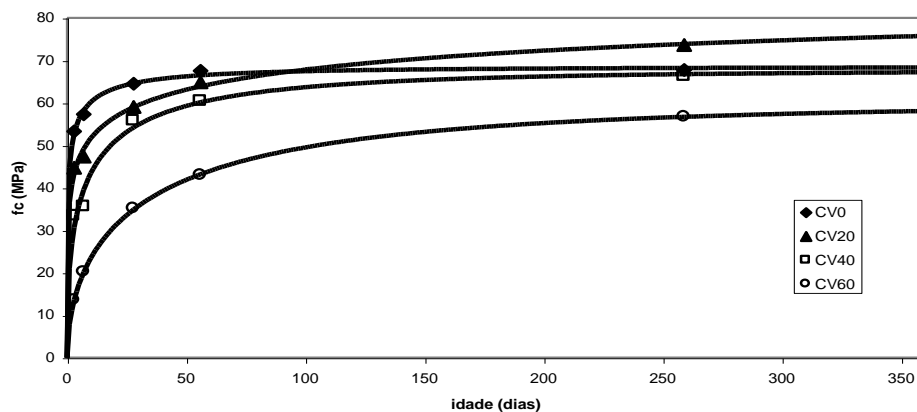


Figura 1 – Evolução da resistência ao longo do tempo.

Tabela 6 - Valores das variáveis resultantes da regressão não linear

Betão	$f_{máx}$	k	n	$\Sigma\Delta^2$	Δ
CV 0	68.44732	1.05941	0.30018	2.4696	0.3143
CV 20	89.80926	0.52158	0.21552	6.1130	0.4945
CV 40	67.66294	0.37290	0.44016	25.5782	1.0115
CV 60	59.77837	0.14108	0.54813	0.0823	0.0574

4. MÓDULO DE ELASTICIDADE

Tendo como objectivo determinar a variação do módulo de elasticidade dos betões ensaiados, procedeu-se à sua determinação.

A determinação do módulo de elasticidade foi efectuada em provetes cúbicos de 10 cm de aresta aos 56 dias de idade. O ensaio foi conduzido com controlo de deslocamentos, tendo estes sido aferidos através do transdutor interno do equipamento.

Os deslocamentos assim obtidos não correspondem a um estado uniaxial de tensão, sendo então necessário proceder à sua calibração. Para tal recorreu-se a expressões propostas por diferentes regulamentações, suficientemente comprovadas quanto à sua aplicabilidade em betões correntes e betões de elevado desempenho sem incorporação de cinzas volantes. Assim, é possível estimar o valor do módulo de elasticidade do betão de referência – CV0 – através do conhecimento da sua resistência à compressão.

O Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado [11] (REBAP), o Modelo Código CEB-FIP 1990 [12] (MC90) e o ACI 318-95 [13] propõe as seguintes relações:

$$\text{REBAP: } E_C = 9.5 \times \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (2)$$

$$\text{MC90: } E_C = 9.979 \times \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (3)$$

$$\text{ACI 318-95: } E_C = 4.7 \times \sqrt{f_{cm}} \quad (4)$$

Em que E_C representa o módulo de elasticidade em GPa de um betão com resistência média f_{cm} expressa em MPa e determinada em cilindros 15x30.

A expressão recomendada pelo MC90 é aplicável em betões cuja resistência característica à compressão, determinada em cilindros 15x30, não excede os 80 MPa. Mais recentemente, o CEB publicou uma extensão ao MC90 [14], abrangendo betões de classes de resistência até os 100 MPa.

A extensão ao MC90, aplicável a qualquer classe de betão, indica:

$$E_C = 11.026 \times f_{cm}^{0.3} \quad (5)$$

A expressão proposta pelo ACI, para betões de massa volúmica corrente, foi deduzida através de ensaios em betões de resistência inferior a 40 MPa. O comité ACI 363 [1] apresenta uma relação aplicável a betões com resistências à compressão compreendidas entre 21 MPa e 83 MPa:

$$E_C = 3.32 \times \sqrt{f_{cm}} + 6.9 \quad (6)$$

Para o betão sem inclusão de adições minerais, CV0, cuja resistência média à compressão em cubos de 10 cm de aresta aos 56 dias de idade é de 67.5 MPa, a aplicação das expressões apresentadas, considerando que a resistência em cilindros 15x30 é 85% da obtida em cubos, origina os resultados ilustrados na tabela 8.

Tabela 7 - Previsão do módulo de elasticidade

Regulamento	E_C (GPa)
REBAP	36.6
MC90	38.5
ACI 318-95	35.6
Ext. MC90	37.2
ACI 363	32.0

Os resultados apresentados na tabela 7 não diferem substancialmente entre si, tendo-se adoptado a relação preconizada na regulamentação nacional.

Efectuada a calibração do equipamento, tendo como base o módulo de elasticidade previsto do betão de referência (CV0), obtiveram-se os seguintes valores para o módulo de elasticidade dos betões ensaiados:

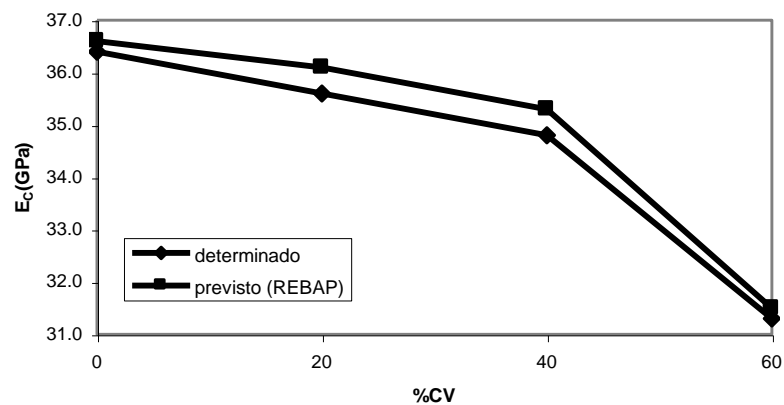


Figura 2 - Módulo de elasticidade dos betões ensaiados

Tabela 8 – Módulo de elasticidade dos betões ensaiados

Betão	E_c (GPa)	
	Determinado	previsto (REBAP)
CV0	36.4	36.6
CV20	35.6	36.1
CV40	34.8	35.3
CV60	31.3	31.5

Observação da tabela 8 e da figura 2 permite constatar a boa aproximação obtida através da utilização da expressão sugerida pelo REBAP – diferença máxima de 1.4% – iniciando a validade da aplicabilidade de modelos numéricos que relacionem o módulo de elasticidade com a resistência à compressão, mesmo em betões incorporando cinzas volantes.

5. CONCLUSÕES

É viável a produção de um BED utilizando cinzas de baixa qualidade e inertes britados, sendo possível obter resistências à compressão aos 90 dias de idade na ordem dos 60 a 65 MPa, com percentagens de substituição de CV até 40%.

A substituição de cimento por cinzas volantes no âmbito dos betões de elevado desempenho não reduziu significativamente as propriedades 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 Said Jalali para a evolução da resistência ao longo do tempo mostrou ser adequada no âmbito dos betões em estudo.

Dos estudos efectuados, pode ainda concluir-se que as expressões regulamentares que permitem a obtenção do módulo de elasticidade são ainda aplicáveis a betões com incorporação de cinzas volantes.

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. Ramezaniapour, *Fly Ash in Concrete*, 2nd 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 fly ash”, ERMCO98, 12th european ready mixed concrete congress, Lisboa, June 1998, p.478-486.
- [10] S. Jalali, *Modelling the Overall Rate of Reaction in Lime-Fly Ash Systems*, Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol. 3, Gothenburg, Sweden, June 1997.
- [11] *Regulamento de Estruturas de betão Armado e Pré-Esforçado*, Imprensa Nacional da Casa da Moeda, E.P., Lisboa, 1986
- [12] *CEB-FIP Model-Code 1990*, Comité Euro-International du Béton, Bulletin d’information n° 203-205, 1990
- [13] *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, ACI 318-95, American Concrete Institute, Detroit, 1995
- [14] *High Performance Concrete – Recommended Extensions to the Model Code 90; Research Needs*, Comité Euro-International du Béton, Bulletin d’information 228, 1995