

no âmbito da **CONSTRUNOR 2002**

Seminário

CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL

19 de Setembro 2002

Parque de Exposições de Braga

Organização:



idite  **minho**
Instituto de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Minho



Construção Sustentável

Parque de Exposições de Braga

Braga, Portugal
19 de Setembro de 2002

Editado por:

Saíd Jalali
Bruno Joel Silva

ÍNDICE

Construção Sustentável: Novo Paradigma da Indústria da Construção.....	1
<i>Said Jalali</i>	
Sustainable Construction In The Past And today.....	3
<i>Peter Schmid</i>	
Sustainable Construction Today And In The Future.....	5
<i>Peter Schmid</i>	
Recuperação de Habitações Rurais Como Contributo Para a Construção Sustentável.....	8
<i>J.P. Castro-Gomes; J.C. Gonçalves Lanzinha</i>	
Reabilitação de Estruturas de Betão Armado.....	22
<i>J.B. Aguiar</i>	
O Betão Hidráulico e o Ambiente.....	39
<i>Ana Maria Esteves; Manuel João Ferreira</i>	
Betão de Desempenho Melhorado Com Recurso a Cinzas Volantes.....	49
<i>Aires Camões</i>	
Geopolímeros – O Betão do Futuro Para Construção Sustentável	60
<i>Teixeira Pinto, A; Cardão, R.</i>	
Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição Investigação no I.S.T.....	71
<i>Jorge de Brito</i>	
Betão Eco-Eficiente Utilizando Metacaulino.....	108
<i>José Miguel Fernandes; Said Jalali; Elvira Torres; Luís Oliveira</i>	

PREFÁCIO

As Jornadas Técnicas da Construnor têm sido um espaço para apresentação das inovações desenvolvidas e divulgação dos resultados das investigações e desenvolvimentos no domínio da construção civil.

Considerou-se de interesse nacional o tema geral de “Construção Sustentável” para a edição deste ano. O programa previsto cobre as múltiplas dimensões do tema com a presença e contribuições dos investigadores de quatro Universidades Portuguesas, do Laboratório Nacional da Engenharia Civil (LNEC) e da Universidade de Eindhoven (Holanda).

Espera-se que a iniciativa venha a servir os interesses da indústria da construção civil e que seja um contributo positivo para o progresso na direcção de uma construção verdadeiramente sustentável.

Este Seminário foi realizado graças aos esforços e a colaboração do Parque de Exposições de Braga, Idite-Minho e Universidade do Minho.

Braga, Setembro de 2002

Betão de Desempenho Melhorado Com Recurso a Cinzas Volantes

Aires Camões¹

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal*

SUMÁRIO

O betão de elevado desempenho (BED) é geralmente produzido recorrendo a materiais constituintes cuidadosamente seleccionados e de elevada qualidade. Estes materiais aumentam significativamente o custo inicial dos BED, o que tem condicionado a sua utilização. Neste trabalho pretende-se realçar a possibilidade de melhorar o desempenho dos betões através do recurso à incorporação de cinzas volantes (CV), consideradas de baixa qualidade, e de agregados britados, correntemente disponíveis no mercado nacional. Assim, a concretizarem-se estes objectivos, poderão ser fabricados betões de desempenho melhorado ou mesmo de elevado desempenho com custo reduzido e, também, diminuir significativamente o consumo de cimento (C) e de recursos naturais não renováveis (areias roladas), contribuindo para a necessária sustentabilidade da construção. O efeito da substituição de C por CV (até 60%) no desempenho dos betões foi avaliado por intermédio do estudo comparativo das características mecânicas e de durabilidade com as obtidas em composições de controlo, sem adição de CV. Os resultados obtidos demonstram ser possível produzir BED com os materiais seleccionados e com quantidades de substituição de C por CV até 40% que atingiram resistências à compressão semelhantes às das misturas de controlo a partir dos 56 dias de idade e cuja trabalhabilidade e durabilidade foi beneficiada com a adição de CV.

1. INTRODUÇÃO

Actualmente o ecossistema mundial tem vindo a ser confrontado com um problema de importância crescente (o aquecimento global) e que está associado aos elevados níveis de CO₂ emitidos para a atmosfera. A indústria da construção é, também, responsável por uma parte significativa dessas emissões: a produção de cimento é altamente consumidora de energia e contribui com cerca de 7% do total de CO₂ expelido para a atmosfera e cada tonelada de cimento Portland fabricada provoca a libertação de cerca de uma tonelada de CO₂. Com o objectivo de reduzir os níveis de CO₂ associados ao fabrico do cimento, urge reduzir o consumo deste material, sem comprometer o necessário desempenho das estruturas de betão.

Outro dos problemas associados à indústria da construção está relacionado com o elevado consumo de recursos naturais não renováveis. Os elevados volumes de construção alcançados, principalmente nas últimas décadas, provocaram uma diminuição significativa desses mesmos recursos, sendo necessário contribuir para a sua manutenção.

¹ Assistente, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho

O BED tem demonstrado ser uma alternativa viável ao betão convencional, especialmente em obras especiais. No entanto, os BED são, em geral, produzidos recorrendo a materiais constituintes de elevada qualidade, o que provoca um aumento considerável do seu custo inicial e impede a generalização da sua utilização.

Neste contexto, foi desenvolvido este trabalho experimental com o objectivo de avaliar a possibilidade de produzir BED de custo reduzido recorrendo a quantidades substanciais de substituição de C por CV e utilizando agregados britados, permitindo, assim, diminuir as consequências adversas associadas a elevados consumos de C e à extracção de agregados, designadamente de areias, do leito dos rios, estuários e costa marítima.

A utilização de CV não constitui novidade na indústria do betão e é geralmente encarada como um meio de reduzir a quantidade de C incorporada na mistura. Desta forma, é normal considerar o uso das CV fundamentalmente numa perspectiva de redução de custos do produto final. Contudo, neste trabalho a adição de CV foi considerada como uma mais valia que deve conduzir ao aumento da qualidade das misturas, esperando-se que seja responsável por uma melhoria global do comportamento do betão, em particular a longo prazo, com particular incidência na durabilidade.

Com o intuito de cumprir os objectivos descritos determinou-se a trabalhabilidade, as características mecânicas e de durabilidade de composições de betão, que foram produzidas com 400 kg/m^3 , 500 kg/m^3 e 600 kg/m^3 de ligante ($L = C + CV$) e com quantidades de substituição de C por CV de 0%, 20%, 40% e 60%.

A durabilidade das misturas produzidas foi avaliada através da realização de ensaios de migração de iões de cloro, resistividade eléctrica e absorção de água por capilaridade.

2. MATERIAIS, COMPOSIÇÕES, FABRICO E CONSERVAÇÃO:

2.1. Agregados

Todas as amassaduras foram realizadas recorrendo à mistura de três agregados britados, provenientes da mesma pedreira granítica: areia fina (AF) ($D_{\text{máx}} = 2.38 \text{ mm}$; $\eta = 2.47$); areia grossa (AG) ($D_{\text{máx}} = 4.76 \text{ mm}$; $\eta = 4.54$); brita (B) ($D_{\text{máx}} = 9.53 \text{ mm}$; $\eta = 5.93$). Os agregados foram utilizados conforme recebidos, i.e., sem se proceder a qualquer lavagem ou outro tipo de tratamento prévio.

2.2. Cimento e cinzas volantes

Os betões foram produzidos com um cimento Portland do tipo CEM I 42.5R. As CV foram fornecidas pela Central Termoeléctrica do Pego e apresentavam um teor de inqueimados elevado, entre 6% e 9%, o que excede o recomendado pela regulamentação nacional e europeia NP EN450 [1]. Segundo esta norma, o valor máximo do teor de inqueimados deve ser de 5% e pode alcançar o valor de 7% somente quando existam normativas nacionais que o permitam. No entanto, estudos anteriores [2, 3] revelaram que a aplicação deste tipo de CV permitiu alcançar níveis de desempenho similares aos obtidos com as mesmas CV, mas melhoradas através de peneiração de modo a cumprirem os requisitos impostos na NP EN450.

Na Tabela 1 apresentam-se as principais propriedades químicas e físicas do C e das CV e na Tabela 2 indicam-se os componentes potenciais do C estimados de acordo com as expressões propostas por Bogue [4].

Tabela 1 – Composição química e principais propriedades físicas do C e das CV

	C	CV
SiO₂ (%)	19.71	42.16 – 58.46
Al₂O₃ (%)	5.41	21.04 – 32.65
Fe₂O₃ (%)	3.34	3.51 – 9.13
CaO total (%)	61.49	1.67 – 9.18
MgO (%)	2.58	0.65 – 2.59
SO₃ (%)	3.22	0.22 – 1.04
cloretos (%)	0.01	0.00 – 0.06
CaO livre (%)	0.81	0.00 – 0.12
perda ao fogo (%)	2.52	5.60 – 9.28
resíduo insolúvel (%)	1.94	—
massa específica (kg/m³)	3150	2360
superfície específica de Blaine (m²/kg)	358.4	387.9
finura (%)	1.7 (> 90 µm)	14.1 – 31.6 (> 45 µm)
exigência de água	28.0	29.7

Tabela 2 – Componentes potenciais do C

C₃S (%)	61.61
C₂S (%)	4.55
C₃A (%)	8.69
C₄AF (%)	10.15
C$\bar{S}$ (%)	5.47

2.3. Superplastificante

Nas amassaduras realizadas recorreu-se à adição de um superplastificante, dotado de uma composição química à base de condensados de naftaleno formaldeído sulfonado. Em trabalho prévio realizado [2], constatou-se que a quantidade óptima de superplastificante a introduzir na mistura, expressa em partículas sólidas, situa-se no intervalo compreendido entre 0.5% e 1.0% da massa de ligante. Por razões económicas adoptou-se a dosagem de 0.5%.

2.4. Composições, fabrico e conservação

Foram fabricadas 12 composições diferentes correspondendo a 3 diferentes quantidades de L (400 kg/m³, 500 kg/m³ e 600 kg/m³) e 4 níveis de substituição de C por CV (0%, 20%, 40% e 60%). As relações A/L foram mantidas constantes para cada dosagem de L e foram determinadas através de amassaduras experimentais dotadas de 40% de CV, realizadas com o objectivo de atingir abaixamentos próximos de 200 mm. As dosagens dos agregados foram estimadas por intermédio da aplicação do método de Faury [5]. As composições dos betões produzidos apresentam-se na Tabela 3, bem como os resultados dos ensaios de abaixamento (SL) e espalhamento (F).

Tabela 3 – Composição e trabalhabilidade dos betões

Betão	A/L	C (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	AF (kg/m ³)	AG (kg/m ³)	B (kg/m ³)	SL (mm)	F (mm)
400CV0	0.40	400	0	613.56	233.55	857.45	105	450
400CV20		320	80	591.96	262.38	878.58	210	485
400CV40		240	160	552.99	284.75	875.65	180	550
400CV60		160	240	503.44	300.96	855.01	205	535
500CV0	0.30	500	0	502.92	308.43	865.61	25	315
500CV20		400	100	461.85	334.01	869.82	105	395
500CV40		300	200	406.91	349.01	847.11	205	474
500CV60		200	300	364.24	373.70	848.70	230	550
600CV0	0.25	600	0	377.30	367.85	850.73	35	350
600CV20		480	120	326.57	399.51	856.01	125	365
600CV40		360	240	271.28	407.93	832.76	200	510
600CV60		240	360	223.26	421.23	824.23	230	530

De cada uma das composições produzidas foram extraídos provetes, que foram mantidos numa câmara húmida durante cerca de 24 horas a uma temperatura de 21°C e 80% de humidade relativa. Decorrido esse período de tempo, os provetes foram desmoldados e conservados imersos em água até à data de realização dos ensaios.

3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS:

3.1. Resistência à compressão

A influência das CV nas propriedades mecânicas dos betões foi avaliada por intermédio de ensaios de resistência à compressão uniaxial, realizados sob controlo de deslocamentos, em provetes cúbicos de 100 mm de aresta e em 6 idades distintas. Nas Figuras 1 a 3 apresentam-se os valores médios obtidos ($f_{cm,cubo}$) no ensaio de 3 provetes, bem como as curvas representativas do ajuste pelo método dos mínimos quadráticos desses mesmos resultados recorrendo à equação hiperbólica (1), proposta por Carino [6] e Knudsen [7].

$$f_c = f_{m\acute{a}x} \frac{k(t - t_0)}{1 + k(t - t_0)} \quad (1)$$

Em que:

- f_c : resistência à compressão prevista para uma determinada idade t ;
- t_0 : idade correspondente ao início do desenvolvimento da resistência ($t_0 = 0$);
- $f_{m\acute{a}x}$: resistência à compressão máxima, obtida quando t tende para infinito; e
- k : constante válida para uma determinada temperatura de cura mantida estável e expressa em dias⁻¹.

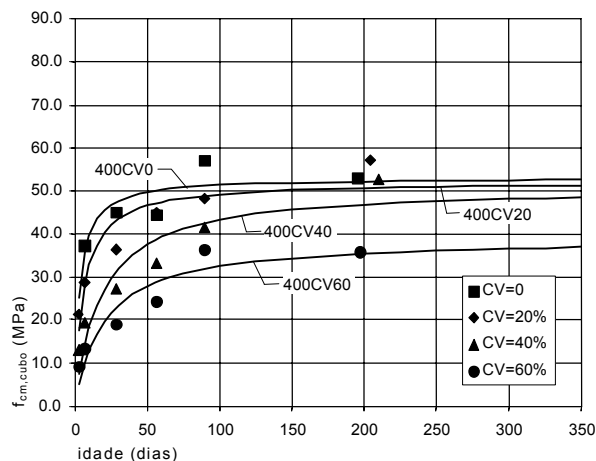


Figura 1 – Resistência à compressão média
($L = 400 \text{ kg/m}^3$)

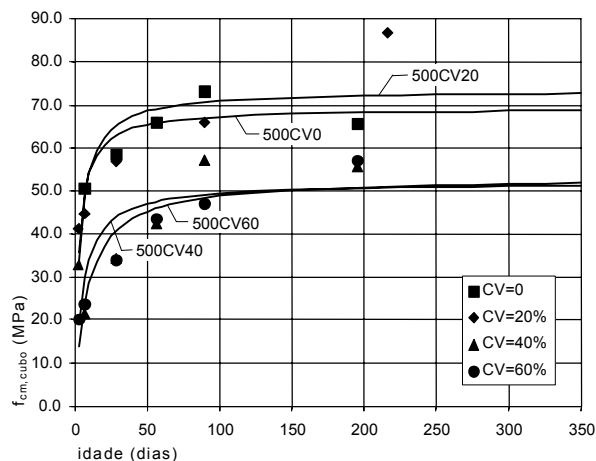


Figura 2 – Resistência à compressão média
($L = 500 \text{ kg/m}^3$)

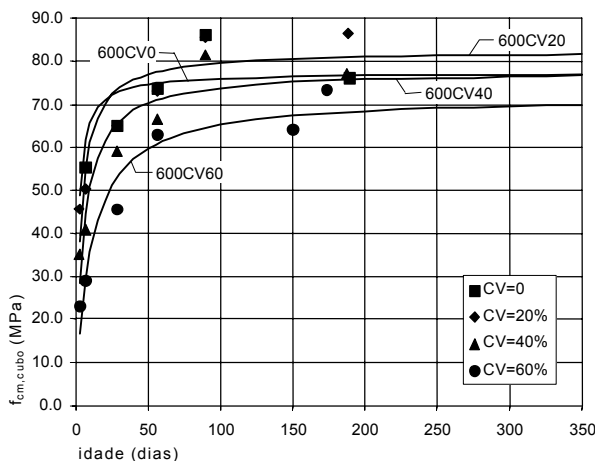


Figura 3 – Resistência à compressão média
($L = 600 \text{ kg/m}^3$)

Através da análise das Figuras 1 a 3 é possível apontar as seguintes observações:

- é possível produzir BED de custo reduzido incorporando materiais correntes com $f_{cm,cubo}$ de cerca de 60 MPa aos 28 dias de idade e 65 MPa aos 56 dias de idade com $L = 500 \text{ kg/m}^3$. Aumentando a quantidade de L para 600 kg/m^3 , o $f_{cm,cubo}$ sobe para cerca de 70 MPa aos 28 dias de idade e 75 MPa aos 56 dias de idade;
- a utilização de $L = 400 \text{ kg/m}^3$ conduz a valores de $f_{cm,cubo}$ inferiores e os valores máximos foram alcançados nas misturas de controlo (cerca de 45 MPa aos 28 dias de idade e aproximadamente 50 MPa aos 56 dias de idade);
- em termos gerais, nas composições com $L = 600 \text{ kg/m}^3$ e idades superiores a cerca de 56 dias, percentagens de substituição de C por CV até 40% parecem resultar em $f_{cm,cubo}$ com a mesma ordem de grandeza;
- apesar das reduzidas resistências verificadas nas idades mais jovens, as composições com CV = 60%, obtiveram uma resistência à compressão apreciável em idades mais avançadas, atendendo à reduzida quantidade de C presente na mistura: cerca de 50 MPa aos 90 dias de idade e $L = 500 \text{ kg/m}^3$ ($C = 200 \text{ kg/m}^3$); aproximadamente 65 MPa aos 90 dias com $L = 600 \text{ kg/m}^3$ ($C = 240 \text{ kg/m}^3$);

- a evolução ao longo do tempo da $f_{cm,cubo}$, é tanto mais lenta quanto maior for a quantidade de C substituída por CV, consequência da morosidade da reacção pozolânica das CV;
- a composição 500CV40 apresentou um desenvolvimento de $f_{cm,cubo}$ ao longo do tempo atípico, bastante aquém do esperado. Tal comportamento foi posteriormente identificado como afecto a deficiências na amassadura ou na cura. Ensaio complementares realizados em provetes cilíndricos comprovaram que a evolução relativa da resistência à compressão ao longo do tempo de 500CV40 foi semelhante à apresentada para a mistura 600CV40.

3.2. Migração de iões de cloro

A durabilidade das composições foi avaliada por intermédio da determinação dos respectivos coeficientes de difusão de cloretos em estado não estacionário. O ensaio adoptado foi baseado na metodologia proposta por Luping [8] (*CTH rapid method*) e, sumariamente, consistiu em submeter os provetes a uma diferença de potencial de 40 V que forçou a penetração dos iões de cloro através do betão. A duração da aplicação da diferença de potencial foi fixa em função da intensidade de corrente inicial, cumprindo o disposto por Luping [8]. A profundidade de penetração média foi determinada através de um processo colorimétrico utilizando nitrato de prata.

O coeficiente de difusão em regime não estacionário (D_{ns}) é calculado recorrendo à seguinte expressão [8]:

$$D_{ns} = \frac{R T L}{Z F \Delta E} \left(\frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \right) \quad (1)$$

Sendo:

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{R T L}{Z F \Delta E}} \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2 c_d}{c_0} \right) \quad (2)$$

Onde:

- R: constante dos gases perfeitos, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mole.K})$;
T: temperatura absoluta da solução, K;
L: espessura do provete, m;
Z: valor absoluto do ião de valência; para iões de cloro, $Z = 1.0$;
F: constante de Faraday, $F = 9.648 \times 10^4 \text{ J}/(\text{mole.V})$;
 ΔE : valor absoluto da diferença de potencial, V;
 x_d : profundidade de penetração, m;
t: duração do ensaio, s;
 erf^{-1} : inverso da função de erro;
 c_d : concentração de cloro para a qual se verifica alteração colorimétrica do nitrato de prata, $c_d \approx 0.07 \text{ N}$;
 c_0 : concentração de cloro na célula a montante, N.

Para cada composição foram sujeitos a ensaio 6 provetes com 100x100x50 mm³, com uma idade de aproximadamente 1 ano. Os resultados médios obtidos (D_{ns}) apresentam-se na Figura 4.

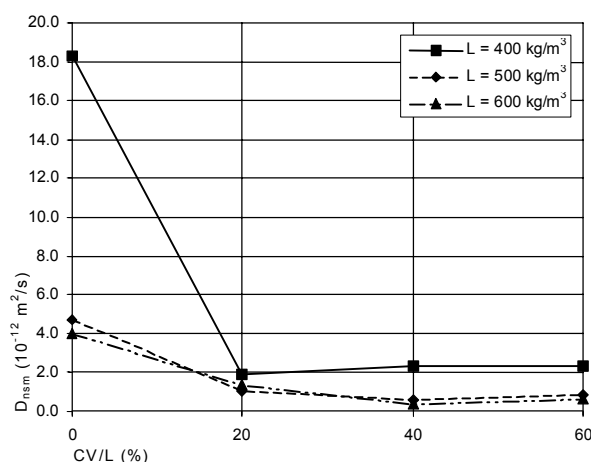


Figura 4 – Coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário

Os D_{ns} obtidos demonstram que a adição de CV tem um notório efeito favorável na resistência dos betões à penetração de cloretos. É de salientar que mesmo para a composição mais pobre em L e em C (400CV60: $C = 160 \text{ kg/m}^3$; $CV = 240 \text{ kg/m}^3$), o D_{ns} obtido foi inferior ao da mistura sem incorporação de CV e com 600 kg/m^3 de cimento (600CV0). Percentagens de substituição de C por CV de 20% foram responsáveis por uma substancial redução do D_{ns} das composições fabricadas com $L = 400 \text{ kg/m}^3$ e uma redução menos marcante apesar de significativa para as restantes dosagens de L. Para quantidades superiores de CV, as variações detectadas foram marginais, indiciando que, pelo menos, até 60% a adição de CV não é prejudicial na resistência à penetração de cloretos. Relativamente à influência da quantidade de L, parece não haver vantagens em proceder ao seu aumento de 500 kg/m^3 para 600 kg/m^3 .

Com base na classificação proposta por Gjrv [9], que divide os betões relativamente à resistência à penetração de cloretos em cinco categorias (de *reduzida* a *ultra elevada*) em função do seu coeficiente de difusão de iões de cloro determinado recorrendo a um ensaio de migração, semelhante ao efectuado, a substituição de 20% de C por CV nas composições fabricadas com 400 kg/m^3 de ligante permite melhorar consideravelmente a qualidade do betão, aumentando a sua classificação de *reduzida* ($D_{ns} > 15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) para *ultra elevada* ($D_{ns} < 2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$). Para os restantes betões ($L = 500 \text{ kg/m}^3$ e $L = 600 \text{ kg/m}^3$) o acréscimo qualitativo é menos pronunciado, passando os betões sem CV da classificação *muito elevada* ($2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{ns} < 5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) para *ultra elevada*, por intermédio da adição de CV à mistura. É de salientar que a totalidade dos betões produzidos recorrendo à incorporação de CV em quantidades de substituição de C de 20% a 60% são enquadrados na classificação proposta pelo autor na categoria de melhor desempenho face ao ataque de iões de cloro (resistência *ultra elevada*), comprovando a eficácia das CV face a este agente agressivo.

3.3. Resistividade eléctrica

A resistividade eléctrica dos betões produzidos (ρ) foi aferida recorrendo aos valores da intensidade de corrente inicial do ensaio *CTH* e por intermédio da utilizao da lei de Ohm.

Os valores médios determinados (ρ_m), resultantes do ensaio de 6 provetes, apresentam-se na Figura 5.

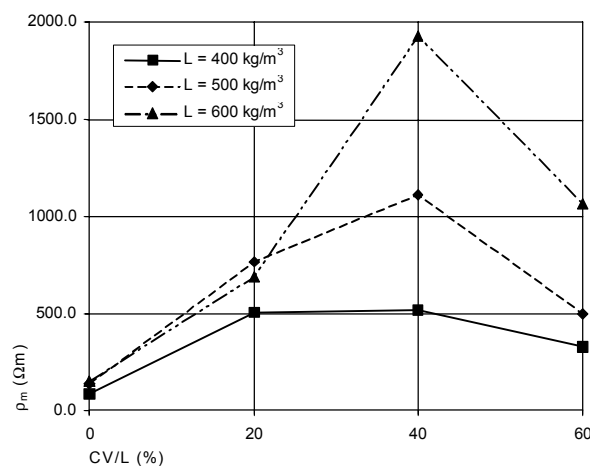


Figura 5 – Resistividade eléctrica

A Figura 5 permite evidenciar que a substituição de C por CV aumenta a ρ_m de todas as composições estudadas e que este efeito é mais significativo para elevadas quantidades de L. Nas composições com $L = 500 \text{ kg/m}^3$ e $L = 600 \text{ kg/m}^3$ verificou-se um acréscimo substancial da ρ_m com o aumento da quantidade de CV até 40%, decrescendo quando $CV = 60\%$, mas para valores ainda superiores aos obtidos nas misturas de controlo. Os resultados obtidos apontam para a existência de um valor óptimo de substituição de C por CV igual a 40%, independentemente da dosagem de L.

Este ensaio, contrariamente ao verificado no *CTH*, não se mostrou sensível à quantidade de C dos betões de controlo. No entanto, nas misturas com CV o ensaio de resistividade eléctrica mostrou-se mais sensível e permitiu distinguir as diferentes composições.

3.4. Absorção de água por capilaridade

As misturas realizadas foram, também, sujeitas ao ensaio de absorção de água por capilaridade, realizado de acordo com o prescrito na especificação E393 do LNEC [10]. Com base nos resultados deste ensaio determinou-se o coeficiente de absorção capilar (S) que é um dos parâmetros correntemente empregues para caracterizar a durabilidade dos betões. O S corresponde ao declive inicial da curva de absorção capilar, expressa pela quantidade de água absorvida por unidade de área do betão em contacto com a água, em função da raiz quadrada do tempo. Foram consideradas apenas as primeiras 4 horas de ensaio e os valores de S foram determinados através do método dos mínimos quadráticos. Os resultados médios (S_m), obtidos a partir do ensaio de 3 provetes, encontram-se representados na Figura 6.

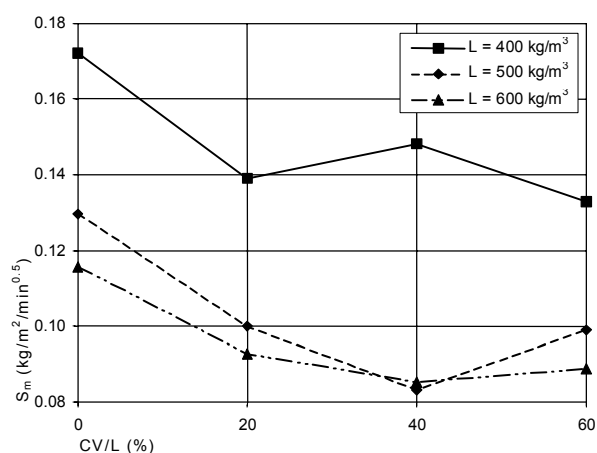


Figura 6 – Coeficiente de absorção de água por capilaridade

Conforme se pode constatar por intermédio da observação da Figura 6 a inclusão de CV provoca a diminuição do S_m . Este efeito é mais pronunciado quando comparados os S_m das composições de controlo com os correspondentes às misturas fabricadas com 20% de CV. Para quantidades superiores de CV, a evolução do S_m apresenta-se menos clara, havendo tendência para uma menor variação. Relativamente ao efeito afecto ao acréscimo da quantidade de L associado à redução da respectiva razão A/L, a Figura 6 mostra que o S_m das composições diminui de forma muito mais evidente até $L = 500 \text{ kg/m}^3$. Para quantidades de L entre 500 kg/m^3 e 600 kg/m^3 , os respectivos S_m variam pouco.

Recorrendo à classificação proposta por Browne [11], que permite avaliar a qualidade do betão em função do seu coeficiente de absorção capilar (betão de *qualidade elevada* caso $S < 0.1 \text{ kg/m}^2/\sqrt{\text{min}}$; de *qualidade baixa* quando $S > 0.2 \text{ kg/m}^2/\sqrt{\text{min}}$; e de *qualidade média* para valores intermédios) é possível verificar que os betões produzidos com $L = 400 \text{ kg/m}^3$ podem ser considerados como de *qualidade média* e que aumentando a dosagem de L, desde que adicionadas CV nas amassaduras, se conseguem betões de *qualidade elevada*.

4. CONCLUSÕES:

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão uniaxial realizados indicam que é possível produzir BED com 65 MPa de resistência aos 56 dias de idade com $L = 500 \text{ kg/m}^3$ e $CV = 20\%$ ou com $L = 600 \text{ kg/m}^3$ e percentagens de substituição de C por CV até 40%. No entanto, é de salientar que estes valores foram obtidos em provetes conservados imersos em água logo após a desmoldagem e até à data de realização dos ensaios, o que potencia o desenvolvimento das reacções pozolânicas do C com as CV. Como estas condições são praticamente impossíveis de assegurar em condições práticas, é possível que, nestes casos, os níveis de resistência não atinjam valores tão elevados.

A inclusão de CV reduz a resistência à compressão dos betões nas idades iniciais, mas tende a recuperar ao longo do tempo. Em termos gerais, atingida a idade de cerca de 56 dias, as diferenças na resistência à compressão entre as composições com 500 kg/m^3 e 600 kg/m^3 de L e fabricadas com quantidades de substituição de C por CV até 40% podem ser consideradas pouco significativas. Os valores registados foram da mesma ordem de grandeza, o que comprova o bom desempenho das CV, particularmente em idades mais avançadas.

O comportamento mecânico das composições com 60% de CV afastou-se do das restantes. No entanto há que realçar a apreciável resistência à compressão obtida com esta dosagem de CV nas idades mais avançadas. A composição 500CV60 ($C = 200 \text{ kg/m}^3$) alcançou cerca de 60 MPa aos 90 dias de idade e a composição 600CV60 ($C = 240 \text{ kg/m}^3$) aproximadamente 65 MPa, o que permite classificar estas composições como dotadas de bom desempenho económico.

A durabilidade das composições estudadas foi avaliada através da realização de 3 ensaios distintos. Estes ensaios foram seleccionados devido à sua aceitação generalizada para caracterizar a durabilidade dos betões. A totalidade dos ensaios aponta para uma melhoria do desempenho das composições com CV. No entanto, a quantidade óptima de substituição de C por CV dependeu do ensaio realizado. Enquanto que nos ensaios de resistividade eléctrica o melhor desempenho foi obtido com CV = 40%, os restantes indicam uma tendência para a melhoria da durabilidade com a adição de CV, mas não apontam claramente uma dosagem óptima de CV.

O ensaio de migração de cloretos mostrou sensibilidade relativamente à qualidade dos betões fabricados sem CV, mas os seus resultados foram praticamente independentes da quantidade de C substituída por CV e mesmo da dosagem de L nas composições produzidas com CV. Situação contrária foi detectada na resistividade eléctrica, cujo ensaio não se mostrou capaz de distinguir as diferentes composições de controlo fabricadas. Contudo, este ensaio reflectiu claramente a influência da quantidade de L empregue e da percentagem de substituição de C por CV nas misturas onde esta adição mineral foi incluída.

Os resultados obtidos no ensaio de resistividade eléctrica indicam que a quantidade óptima de substituição de C por CV deve ser próxima de 40%. Este aspecto pode ser justificado devido ao facto de, para percentagens superiores de CV, a quantidade de hidróxido de cálcio disponibilizado pela hidratação do C não ser suficiente para reagir com uma parte significativa das CV que, assim, participam na mistura de forma semelhante à de uma areia fina.

O ensaio de absorção de água por capilaridade mostrou-se dependente da dosagem de L dos betões estudados e, também, evidenciou alguma sensibilidade relativamente à quantidade de CV presente nas misturas.

5. AGRADECIMENTOS:

O autor manifesta os seus agradecimentos às empresas que gentilmente forneceram os materiais usados nesta campanha experimental, nomeadamente à Cimpor, Indústria de Cimentos, S.A, ao Departamento de Carvão e Cinzas da PEGOP, Energia Eléctrica, S.A, e à Bettor MBT Portugal, Produtos Químicos para Construção, S.A.

6. REFERÊNCIAS:

- [1] NP EN450 1995, *Cinzas volantes para betão, definições, exigências e controlo da qualidade*, Instituto Português da Qualidade, Fevereiro de 1996;
- [2] Camões, A. et al., *Low cost high performance concrete using low quality fly ash*, ERMCO98, 12th European Ready Mixed Concrete Congress, Lisboa, Junho de 1998, p.478-486;
- [3] Rocha, P., *Betões de elevado desempenho com recurso a materiais e processos correntes*, Tese de Mestrado, UM, Outubro de 1999;

- [4] Bogue, R. H., *Chemistry of Portland cement*, Reinhold, Nova Iorque, 1955;
- [5] Faury, J., *Le Béton*, Editions Dunod, Paris, 1958;
- [6] Carino, N. J., *The maturity method: theory and application*, Cement, Concrete and Aggregates, ASTM, Volume 6, Number 2, Winter 1984, p.61-67;
- [7] Knudsen, T., *On particle size distribution in cement hydration*, Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Editions Septima, Paris, Volume 2, 1980, p.I-170-175;
- [8] Luping, T., *Chloride Transport in Concrete – Measurement and Prediction*, Tese de Doutorado, Chalmers University of Technology, Gotemburgo, Suécia, 1996;
- [9] Gjorv, Odd E., *Service life of concrete structures and performance-based quality control*, International Workshop on Innovations in Concrete Materials, Whistler, Canada, Junho 2001;
- [10] LNEC 393, *Betões – determinação da absorção de água por capilaridade*, Documentação normativa, especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Maio de 1993;
- [11] Browne, R. D., *Field investigations: site & laboratory tests: maintenance repair and rehabilitation of concrete structures*, CEEC, Lisboa, 1991.