



# Encontro Nacional **Betão Estrutural 2000**



Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

**FEUP**



Grupo Português de Betão Estrutural  
Membro da FEUP

FEUPedições

22 a 24 Novembro 2000

## INFLUÊNCIA DAS CINZAS VOLANTES NO DESEMPENHO DE BETÕES

### AIRES CAMÕES

Assistente  
UM  
Guimarães

### PATRÍCIO ROCHA

Assistente do 2º triénio  
ESTG  
Viana do Castelo

### RAIMUNDO DELGADO

Prof. Catedrático  
FEUP  
Porto

### SAID JALALI

Prof. Associado  
UM  
Guimarães

### BARROSO AGUIAR

Prof. Associado  
UM  
Guimarães

## SUMÁRIO

Alguns dos mais recentes desenvolvimentos relativos à produção de betões incidem sobre a adição de componentes que melhorem as suas características mecânicas, de trabalhabilidade e durabilidade e que, sempre que possível, contribuam para resolver problemas ambientais de uma forma simples e económica. É neste contexto que este trabalho se insere, tentando contribuir para o esclarecimento das vantagens e desvantagens do fabrico de betões com incorporação de cinzas volantes.

## 1. INTRODUÇÃO

No decorrer dos últimos anos a utilização de betões de elevado desempenho (BED) tem vindo a aumentar, bem como alargado o seu âmbito de aplicação. A crescente utilização deste material surge como resultado dos recentes avanços no conhecimento, em particular no desenvolvimento de superplastificantes e aplicação de adições activas.

Este tipo de material – BED – tem vindo a ser produzido maioritariamente recorrendo à utilização de sílica de fumo e/ou cinzas volantes (CV) 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.

Neste trabalho, pretende-se realçar a possibilidade de produção de betões de desempenho melhorado, ou mesmo de elevado desempenho, incorporando CV consideradas de baixa qualidade e agregados correntes.

No sentido de atingir os objectivos expostos, foi realizada uma campanha experimental capaz de avaliar características mecânicas, de trabalhabilidade e de durabilidade de betões, que incorporam as referidas CV. Assim, foram consideradas diferentes percentagens de

substituição de cimento (C) por CV (0, 20%, 40% e 60%) em diferentes quantidades de ligante (400, 500 e 600 kg/m<sup>3</sup>).

Para o estudo das características mecânicas foram realizados ensaios de compressão uniaxial, de compressão diametral e de flexão. A durabilidade das composições estudadas foi aferida através de ensaios de migração de cloretos em estado não estacionário, absorção de água por imersão e absorção de água por capilaridade.

A análise dos resultados aqui apresentados é consequência de uma primeira avaliação, genérica e global, não sendo intenção de, nesta comunicação, a efectuar de uma forma particular e exaustiva.

## 2. MATERIAIS UTILIZADOS, COMPOSIÇÕES E FABRICO DOS BETÕES

Todos os agregados utilizados na amassadura dos betões estudados foram obtidos a partir da britagem de rocha granítica e provenientes da mesma pedreira. Realça-se o facto de terem sido utilizadas duas areias britadas ( $D_{\max} = 2.38$  mm e  $D_{\max} = 4.76$  mm) e uma brita com máxima dimensão de 9.53 mm conforme fornecidas, i.e., sem se recorrer a qualquer tipo de tratamento prévio. O cimento utilizado foi do tipo I, classe 42.5R. As CV usadas são provenientes da central termoelétrica do Pego, com teores de inqueimados que variam entre 6% e 9%, o que excede o valor máximo sugerido pela regulamentação Europeia [1] (5% ou 7% somente quando houver acordo contratual). O superplastificante (SP) usado tem uma composição química à base de condensados de naftaleno formaldeído sulfonado. A quantidade de SP foi estimada recorrendo aos resultados de uma série de ensaios sobre pastas e argamassas, onde foi possível identificar o ponto de saturação (quantidade óptima de adição) entre valores de 0.5% a 1% do peso do ligante [2]. Por razões económicas, o valor de SP adoptado neste trabalho foi de 0.5%. Para maior conhecimento das características dos materiais utilizados sugere-se a consulta de [2-4].

Foram realizadas doze diferentes tipos de amassaduras correspondentes a três dosagens de ligante ( $L=C+CV$ ). As quantidades de ligante foram fixadas em 400 kg/m<sup>3</sup>, 500 kg/m<sup>3</sup> e 600 kg/m<sup>3</sup> e a respectiva relação água/ligante (A/L) em 0.4, 0.3 e 0.25. As dosagens dos agregados foram estimadas por intermédio da aplicação do método de Faury. As composições dos betões estudados estão apresentadas na Tabela I. Na mnemónica utilizada para referenciar os betões produzidos, o primeiro número traduz a dosagem de ligante e o número a seguir a CV representa a percentagem de substituição de cimento por cinzas volantes. As razões A/L utilizadas foram escolhidas recorrendo a amassaduras experimentais (400CV40; 500CV40; 600CV40), tendo como objectivo a obtenção de abaixamentos superiores a 200 mm.

Para avaliar a resistência à compressão ao longo do tempo foram moldados provetes cúbicos de 100 mm de aresta e provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. A determinação da resistência à tracção por compressão diametral das diferentes composições foi aferida através de provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e cerca de 96.5 mm de altura. O comportamento em flexão foi avaliado por intermédio de ensaios em prismas de

850×100×100 mm<sup>3</sup>, com 800 mm de vão. Em relação à avaliação deste aspecto, não são apresentados resultados e respectiva análise, encontrando-se este assunto descrito em [5].

Tabela 1 – Composição dos betões.

| Betão   | A/L  | C<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | CV<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Areia 1<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Areia 2<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Brita<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|---------|------|---------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 400CV0  | 0.4  | 400                       | 0                          | 613.56                          | 233.55                          | 857.45                        |
| 400CV20 | 0.4  | 320                       | 80                         | 591.96                          | 262.38                          | 878.58                        |
| 400CV40 | 0.4  | 240                       | 160                        | 552.99                          | 284.75                          | 875.65                        |
| 400CV60 | 0.4  | 160                       | 240                        | 503.44                          | 300.96                          | 855.01                        |
| 500CV0  | 0.3  | 500                       | 0                          | 502.92                          | 308.43                          | 865.61                        |
| 500CV20 | 0.3  | 400                       | 100                        | 461.85                          | 334.01                          | 869.82                        |
| 500CV40 | 0.3  | 300                       | 200                        | 406.91                          | 349.01                          | 847.11                        |
| 500CV60 | 0.3  | 200                       | 300                        | 364.24                          | 373.70                          | 848.70                        |
| 600CV0  | 0.25 | 600                       | 0                          | 377.30                          | 367.85                          | 850.73                        |
| 600CV20 | 0.25 | 480                       | 120                        | 326.57                          | 399.51                          | 856.01                        |
| 600CV40 | 0.25 | 360                       | 240                        | 271.28                          | 407.93                          | 832.76                        |
| 600CV60 | 0.25 | 240                       | 360                        | 223.26                          | 421.23                          | 824.23                        |

Após a realização das amassaduras, os provetes foram conservados em câmara húmida a uma temperatura de 21°C e humidade relativa de 80%. Um dia após a betonagem procedeu-se à desmoldagem dos provetes e sua imersão em água, onde permaneceram até à data da realização dos ensaios. Nessa data, e antes da realização dos ensaios, foi necessário proceder-se à preparação dos provetes: capeamento da face de betonagem com pasta à base de enxofre dos cilindros a ensaiar à compressão; divisão por corte húmido em 3 porções, com dimensões aproximadamente iguais, dos cilindros a testar à compressão diametral; realização de um entalhe nos prismas sujeitos ao ensaio de flexão [5]. As amostras utilizadas nos ensaios de durabilidade, resultaram do aproveitamento dos meios prismas com aproximadamente 100x100x422.5 mm<sup>3</sup>, provenientes do ensaio de flexão. Para cada composição foram preparados, por corte, 6 provetes com cerca de 100x100x50 mm<sup>3</sup> para o ensaio de migração de cloretos no estado não estacionário e 3 provetes aproximadamente cúbicos com 100 mm de aresta, para os ensaios de absorção de água por imersão e absorção de água por capilaridade.

### 3. PROPRIEDADES DO BETÃO FRESCO

Tendo como objectivo avaliar a trabalhabilidade das misturas efectuadas procedeu-se à determinação da respectiva consistência através da realização do ensaio do abaixamento no cone de Abrams, (NP87) e do ensaio de espalhamento (BS1881: Part 105).

Nas Figuras 1 e 2 apresentam-se, respectivamente, a variação do abaixamento e do espalhamento registados, com a %CV. São, também, ilustradas as classes de abaixamento e as classes de espalhamento indicadas na NP ENV206. Os resultados apresentados resultam da média dos valores obtidos nas diferentes amassaduras.

Da análise dessas figuras é possível observar que:

- a incorporação de CV favorece significativamente a trabalhabilidade, permitindo, inclusivamente, passar betões da classe de abaixamento S1 para S4 ou da classe de espalhamento F1 para F4;
- o efeito favorável das CV é menos visível nas composições com  $400 \text{ kg/m}^3$  de ligante. Este aspecto pode ser justificado pela maior razão A/L presente nos betões com  $400 \text{ kg/m}^3$  de ligante;
- a acção favorável das CV é menos significativa em composições com %CV superiores a 40%. Justificação para este facto pode ser encontrada devido à preponderância da maior exigência de água das CV, que influenciam negativamente a trabalhabilidade, em oposição ao efeito benéfico provocado pela sua forma aproximadamente esférica;
- as diferenças de consistência das composições com  $500 \text{ kg/m}^3$  e  $600 \text{ kg/m}^3$  de ligante podem ser consideradas marginais;
- o efeito simultâneo do aumento da razão A/L e da diminuição da quantidade de ligante é mais relevante na melhoria da consistência das composições até %CV de 20%. A consistência das misturas com 40% e 60% de CV é praticamente independente da razão A/L e correspondente quantidade de ligante.

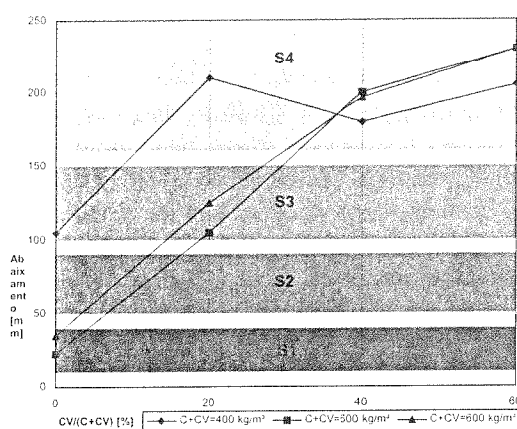


Figura 1 – Relação entre o abaixamento e a percentagem de substituição de CV.

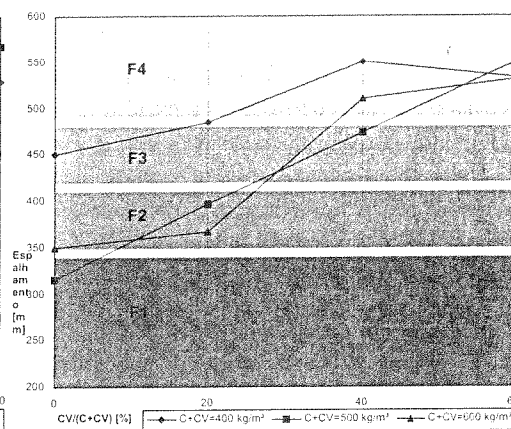


Figura 2 – Relação entre o espalhamento e a percentagem de substituição de CV.

#### 4. CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

##### 4.1 Resistência à compressão

O efeito da incorporação de CV na resistência à compressão uniaxial foi avaliado recorrendo a ensaios com controlo de deslocamento, utilizando um transdutor de 5 mm de campo e 0.09% de precisão e empregue uma velocidade de deslocamento de 0.36 mm/minuto.

A evolução da resistência à compressão ao longo do tempo das composições com  $500 \text{ kg/m}^3$  e  $600 \text{ kg/m}^3$  de ligante, avaliada em cilindros  $150 \times 300 \text{ mm}^3$ , é apresentada nas Figuras 3 e 4. As

curvas correspondem à aplicação de um modelo numérico de previsão da variação da resistência à compressão com o tempo, proposto por Jalali [6].

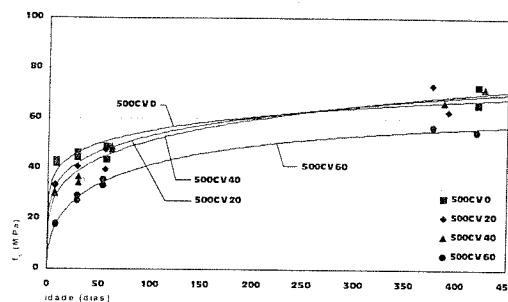


Figura 3 – Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo ( $L=500 \text{ kg/m}^3$ ).

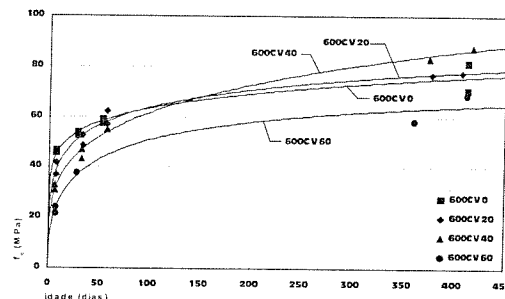


Figura 4 – Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo ( $L=600 \text{ kg/m}^3$ ).

Os resultados expressos na Figuras 3 e 4 permitem constatar:

- os ganhos de resistência nos betões com maiores % de substituição de C por CV é mais lento nas primeiras idades;
- %CV até 40% influenciam positivamente a resistência à compressão, quando considerada em idades a partir de aproximadamente 150 a 200 dias;
- as composições com 60% de CV apresentam um comportamento marcadamente inferior às restantes. Contudo, em termos absolutos, atingem valores de apreciável resistência à compressão (aproximadamente 60 MPa), tendo em conta a reduzida quantidade de cimento empregue ( $200 \text{ kg/m}^3$  na composição 500CV0);
- aos 90 dias é possível produzir betões com %CV inferiores a 40% e com resistência à compressão em cilindros  $150 \times 300 \text{ mm}^3$  com valores na ordem dos 55 MPa ( $L = 500 \text{ kg/m}^3$ ) e 60 MPa ( $L = 600 \text{ kg/m}^3$ );

As observações referidas são também válidas para os resultados obtidos em provetes cúbicos de 100 mm de aresta. Foi ainda possível verificar que a resistência em cilindros é cerca de 80% da obtida em cubos.

Para as composições com  $400 \text{ kg/m}^3$  de ligante, verificou-se que os valores da resistência à compressão são aproximadamente iguais a 70% dos registados para betões com  $L = 500 \text{ kg/m}^3$ .

#### 4.2 Módulo de elasticidade em compressão

O módulo de elasticidade em compressão ( $E_c$ ) das diversas composições foi determinado a partir dos ensaios de compressão uniaxial em cilindros  $150 \times 300 \text{ mm}^3$ . Para tal, procedeu-se à colocação de um transdutor de deslocamentos com 5 mm de campo e 0.05% de precisão na zona central do provete, de modo a registar a sua variação de comprimento segundo a sua direcção axial, relativamente a uma base de medida de 60 mm. Nas Figuras 5 e 6 apresentam-se as evoluções do  $E_c$  ao longo do tempo para as misturas estudadas. Cada curva representa a média ( $E_{cm}$ ) registada em dois provetes.

A análise das Figuras 5 e 6 permite a obtenção das seguintes notas:

- as composições sem CV apresentam uma variação marginal do  $E_{cm}$  a partir dos 56 dias;
- atingida a idade de cerca de 425 dias os  $E_{cm}$  de todas as composições são semelhantes (aproximadamente 32 GPa para  $L = 500 \text{ kg/m}^3$  e cerca de 36 GPa para  $L = 600 \text{ kg/m}^3$ ), excepto nas misturas 500CV40 e 600CV20, que, por comparação com os restantes resultados, apresentam valores superiores aos esperados;
- apesar de tenderem para o mesmo valor, os  $E_{cm}$  desenvolvem-se mais lentamente à medida que aumenta a percentagem de substituição de C por CV;
- a um acréscimo de ligante de 20% ( $500 \text{ kg/m}^3$  para  $600 \text{ kg/m}^3$ ) corresponde um aumento de cerca de 14% do valor do  $E_{cm}$  aos 425 dias.

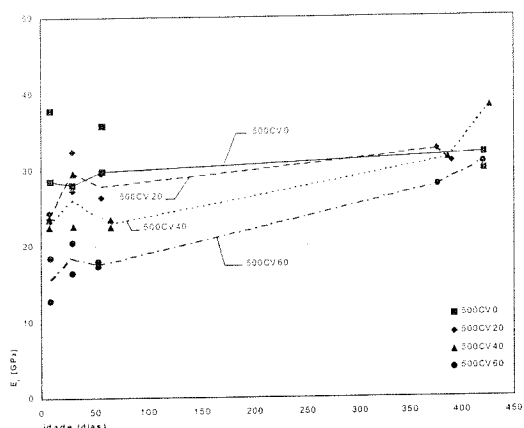


Figura 5 – Variação de  $E_c$  com o tempo.

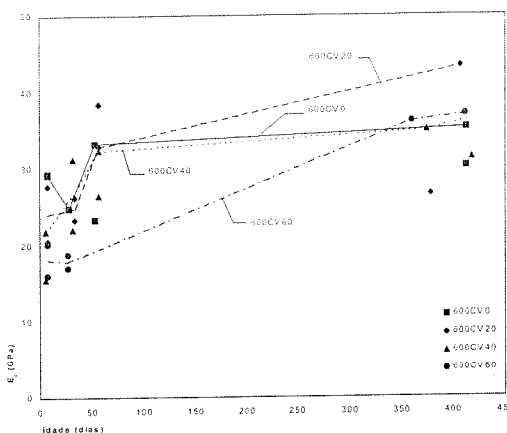


Figura 6 – Variação de  $E_c$  com o tempo.

O  $E_c$  do betão é controlado pelo módulo de elasticidade dos seus componentes, i.e., da pasta hidratada e dos agregados. O  $E_c$  do betão pode ser estimado a partir de relações empíricas, em função da resistência à compressão do betão. Tal é justificado tendo em conta a influência do módulo de elasticidade da pasta, que depende da porosidade capilar de forma semelhante à sua resistência à compressão [7]. Neste contexto, apresentam-se nas Figuras 7 e 8 as relações obtidas entre a resistência à compressão média determinada em cilindros ( $f_{cm}$ ) e respectivo  $E_{cm}$ . São apresentadas, também, as curvas resultantes da aplicação das expressões sugeridas pelo ACI 363 [8], pelo CEB-FIP (1999) [7] e pela regulamentação nacional [9]. A relação proposta pelo comité ACI 363 é restringida a betões com resistências à compressão compreendidas entre 21 MPa e 83 MPa, a expressão proposta pelo CEB-FIP (1999) é aplicável qualquer que seja o  $f_{cm}$  do betão e o REBAP prevê, apenas, resistências características até 50 MPa (a que corresponde um  $f_{cm}$  de aproximadamente 58 MPa).

Conforme se pode observar, os valores de  $E_{cm}$  determinados são, de uma forma geral, reduzidos, quando comparados com os obtidos através da utilização das expressões regulamentares. Assim, para as misturas produzidas, a aplicação das expressões propostas quer pelo ACI 363, quer pelo CEB-FIP (1999), quer pelo REBAP, sobre-estima o valor de  $E_{cm}$ , sendo a que mais se aproxima dos resultados experimentais a proposta pelo ACI 363. Contudo, o CEB-FIP propõe a adopção de um coeficiente que traduza a influência dos agregados.

os 56 dias;  
semelhantes  
600 kg/m<sup>3</sup>),  
os restantes  
entamente à

um aumento

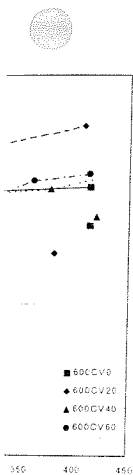


Figura 7 – Relação entre  $f_{cm}$  e  $E_{cm}$   
( $L = 400 \text{ kg/m}^3$  e  $L = 500 \text{ kg/m}^3$ ).

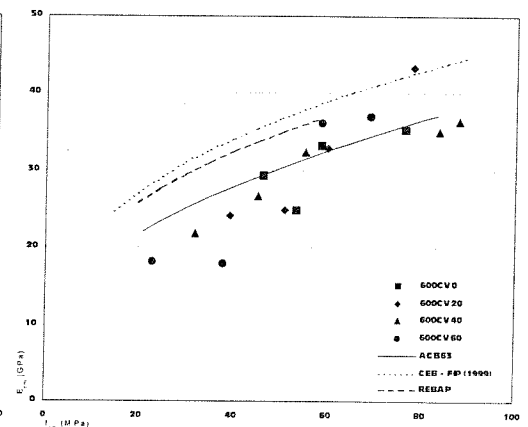


Figura 8 – Relação entre  $f_{cm}$  e  $E_{cm}$   
( $L = 600 \text{ kg/m}^3$ ).

#### 4.3 Resistência à tracção por compressão diametral

As Figuras 9 e 10 mostram os resultados obtidos, representados pela resistência à tracção em compressão diametral ( $f_{ct,cd}$ ) em misturas com 500 kg/m<sup>3</sup> e 600 kg/m<sup>3</sup> de ligante. Cada curva representa a média registada em três provetes ( $f_{cm,cd}$ ).

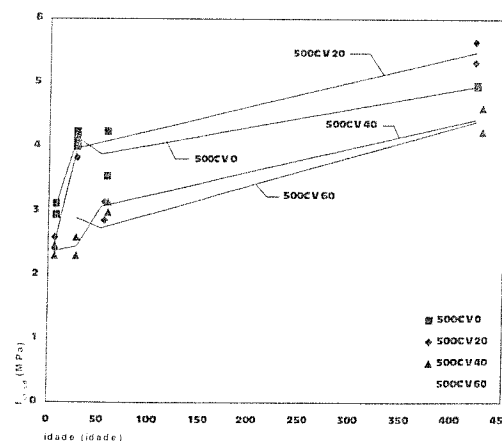


Figura 9 – Variação de  $f_{ct,cd}$  com o tempo.

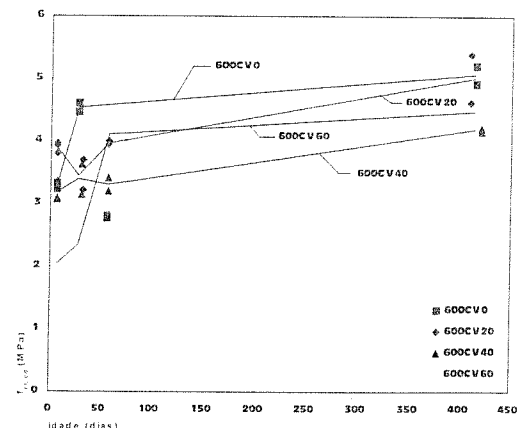


Figura 10 – Variação de  $f_{ct,cd}$  com o tempo.

Apesar da ocorrência de resultados atípicos, o que dificulta a sua análise, as Figuras 9 e 10 permitem evidenciar as seguintes tendências:

- genericamente, a partir da idade de cerca de 56 dias, o aumento da quantidade de ligante não parece influenciar significativamente a  $f_{cm, ed}$ ;
- em betões com incorporação de CV, para idades inferiores a 56 dias, o aumento da quantidade de ligante provoca uma evolução mais lenta da  $f_{cm, ed}$ .

## 5. DURABILIDADE

### 5.1 Coeficiente de difusão de cloretos

A caracterização da resistência à migração de cloretos foi realizada através de ensaios em regime não estacionário baseados no procedimento desenvolvido por Tang [10] (*CTH rapid method*). O ensaio consistiu em submeter provetes  $100 \times 100 \times 50 \text{ mm}^3$ , com cerca de um ano de idade, a uma diferença de potencial de  $40 \pm 0.2 \text{ V}$ , durante um intervalo de tempo, fixado em função da intensidade de corrente inicial, conforme sugerido pelo mesmo autor. O coeficiente de difusão foi obtido através da determinação da profundidade de penetração de cloretos, recorrendo a um processo colorimétrico [10]. Apresentam-se, nas Figuras 11 e 12, os resultados do coeficiente de difusão de cloretos ( $D$ ), e respectivos valores médios, determinados a partir de 6 ensaios ( $D_m$ ).

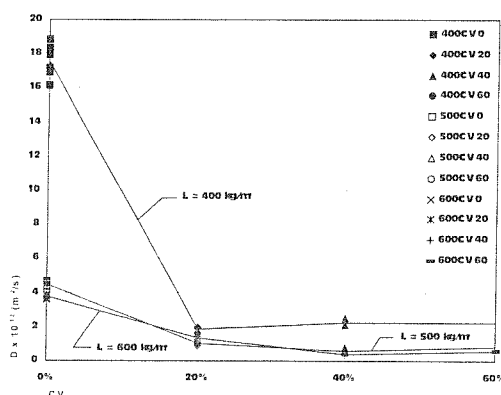


Figura 11 - Relação entre  $D$  e %CV.

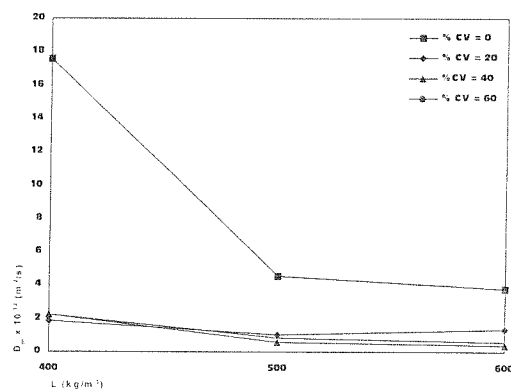


Figura 12 - Relação entre  $D$  e  $L$ .

O efeito favorável da incorporação de CV é particularmente visível através da análise dos resultados obtidos, nomeadamente:

- todas as composições com adição de CV apresentaram  $D_m$  inferiores às composições sem CV, independentemente da quantidade de ligante e respectiva razão A/L;
- mesmo para a composição mais pobre em ligante e cimento, 400CV0.6, o  $D_m$  obtido é inferior ao da mistura 600CV0;
- o efeito favorável do aumento da quantidade de ligante é marginal a partir de  $L = 500 \text{ kg/m}^3$ , e, mais evidente em composições sem CV.

## 5.2 Absorção de Água por Capilaridade e Imersão

Os ensaios de absorção de água por capilaridade foram realizados com base na especificação do LNEC E393-1993 [11]. Apresentam-se nas Figuras 13 e 14 os valores dos coeficientes de absorção capilar ( $S$ ) correspondentes ao gradiente das curvas de absorção nas primeiras quatro horas de ensaio [12] para as diferentes composições estudadas.

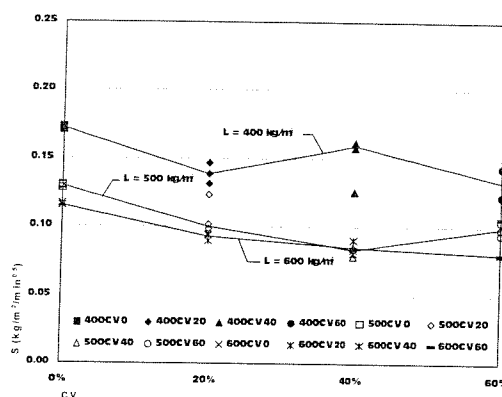


Figura 13 – Relação entre  $S$  e %CV.

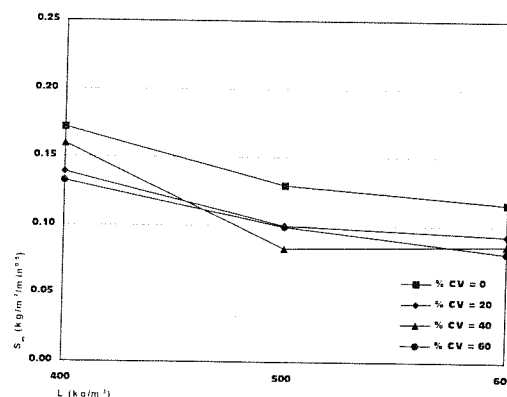


Figura 14 – Relação entre  $S$  e  $L$ .

Os resultados expressos nas Figuras 13 e 14 permitem observar que:

- a adição de CV provoca a diminuição, eventualmente pouco relevante, do  $S$ ;
- o aumento da quantidade de ligante associado à redução da razão  $A/L$ , conduz à diminuição de  $S$ , de forma muito mais evidente até  $L = 500 \text{ kg/m}^3$ ;
- para quantidades de ligante entre  $500 \text{ kg/m}^3$  e  $600 \text{ kg/m}^3$ , os respectivos  $S$  não parecem ter diferenças significativas.

Foram, também, efectuados ensaios de absorção de água por imersão, com base na especificação do LNEC, E394-1993 [13], que conduziram a tendências idênticas às indicadas.

## 6. CONCLUSÕES

Para este tipo de betões, as composições com  $L = 500 \text{ kg/m}^3$  foram as que revelaram melhor potencial, uma vez que apresentaram ganhos importantes de desempenho quando comparados com  $L = 400 \text{ kg/m}^3$  e pouco significativos relativamente a  $L = 600 \text{ kg/m}^3$ .

Em termos gerais, composições com CV até 40% parecem favorecer todos os aspectos estudados, excepto nas primeiras idades. Assim, tendo em atenção o factor económico, a composição com 40% de CV é a que apresenta melhor desempenho.

A adição de CV = 60% conduz à obtenção de betões com características mecânicas substancialmente inferiores aos restantes. No entanto, considerando a reduzida quantidade de C presente na mistura, estes podem ser encarados como betões com bom desempenho económico.

Avaliando a durabilidade de um betão através do coeficiente de difusão de cloretos, coeficiente de absorção capilar e absorção de água por imersão, a incorporação de CV é benéfica, resultando um betão mais durável. Este efeito é particularmente notório na substancial diminuição registada no coeficiente de difusão de cloretos, indiciando sua especial aptidão em ambientes sujeitos a este tipo de agressividade.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] NP EN450 1995, *Cinzas volantes para betão, definições, exigências e controlo da qualidade*, Instituto Português da Qualidade, Fevereiro 1996.
- [2] Rocha, P., *Betões de elevado desempenho com recurso a materiais e processos correntes*, Tese de Mestrado, UM, Outubro de 1999.
- [3] Camões, A. et al., "Low cost high performance concrete using low quality fly ash", *ERMCO98, 12<sup>th</sup> european ready mixed concrete congress*, Lisboa, June 1998, p.478-486.
- [4] Camões, A. et al., "Caracterização mecânica de betões de elevado desempenho com cinzas volantes", *JPEE98, Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, Lisboa, 25 a 28 de Novembro de 1998, p. 517-525.
- [5] Camões, A., Barros, J., Aguiar, B., Comportamento à tracção de em flexão de betões de desempenho melhorado", *BE2000, Encontro Nacional Betão Estrutural 2000*, Porto, 22 a 24 de Novembro de 2000 (sumário aceite para publicação).
- [6] 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.
- [7] CEB-FIP, *Structural concrete. Textbook on behaviour, design and performance*, Updated knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990, Volume 1, July, 1999.
- [8] *State-of-the-Art Report on High Strength Concrete*, Reported by Committee 363, American Concrete Institute, 1992.
- [9] *Regulamento de Estruturas de betão Armado e Pré-Esforçado*, Imprensa Nacional da Casa da Moeda, E.P., Lisboa, 1986.
- [10] Tang, L., *Chloride transport in concrete – measurement and prediction*, Doctoral Thesis, Chalmers University of Technology, Gotemborg, Sweden, 1996.
- [11] E393-1993, *Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade*, LNEC, 1993.
- [12] Coutinho, J. S., *Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem*, Tese de Doutoramento, FEUP, 1998.
- [13] E394-1993, *Betões. Determinação da absorção de água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica*, LNEC, 1993.