

MELHORIA DA DURABILIDADE DO BETÃO COM CINZAS VOLANTES

Aires Camões
Assistente
Departamento de Engenharia Civil
Universidade do Minho

SUMÁRIO

A procura da melhoria do desempenho dos betões recorrendo à incorporação de componentes que, sempre que possível, contribuam para resolver problemas ambientais de uma forma simples e económica, tem sido um dos impulsionadores das recentes inovações relativas à produção deste material, enquadrado-o numa perspectiva de desenvolvimento sustentável. 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 e agregados britados. Desta forma, é possível reduzir significativamente o consumo de cimento e preservar os recursos naturais existentes, bem como diminuir as consequências adversas associadas à extracção de agregados, designadamente de areias, do leito dos rios, estuários e costa marítima.

1. INTRODUÇÃO

Actualmente, o ecossistema mundial tem vindo a ser confrontado com um problema de importância crescente e que está associado aos níveis de CO_2 emitidos para a atmosfera. É do conhecimento público que a produção de cada tonelada de cimento Portland acarreta a libertação de cerca de uma tonelada de CO_2 . Com o objectivo de reduzir os níveis de CO_2 afectos ao fabrico do cimento, urge reduzir a quantidade deste material empregue na indústria da construção, sem comprometer o necessário desempenho das estruturas de betão.

A emissão de CO_2 é apenas um dos problemas a ter em consideração pela indústria da construção. O acréscimo substancial do volume de construção, verificado nas últimas décadas, resultou numa apreciável diminuição dos recursos naturais existentes. Como estes recursos não são infinitos, é imperioso contribuir para a sustentabilidade da construção.

Nos últimos anos, a quantidade de betão de elevado desempenho (BED) empregue na construção, tem vindo a aumentar e tem sido alargado o seu âmbito de aplicação. No entanto, este tipo de material tem vindo a ser produzido recorrendo à utilização de sílica de fumo e/ou cinzas volantes de elevada qualidade e agregados convenientemente seleccionados. Assim, o custo inicial dos BED, quando comparado com o dos betões convencionais, vem substancialmente agravado, o que tem, praticamente, confinado a sua utilização a obras especiais.

Contudo, o emprego de betões convencionais, mesmo em determinadas obras correntes, tem-se revelado, em muitas situações, economicamente inadequado, uma vez que, nas últimas décadas, a experiência tem demonstrado que as estruturas de betão armado se degradam, o que pode originar elevados custos de manutenção e reparação e, nalguns casos, diminuir drasticamente o período de vida útil do edificado.

Nestas circunstâncias, é de esperar que a indústria da construção evolua no sentido de generalizar a aplicação de betões de maior qualidade, com desempenho melhorado, ou mesmo com elevado desempenho.

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 utilizando agregados britados correntemente disponíveis no mercado.

A utilização de materiais correntes para a fabricação de betões de desempenho melhorado é justificada como sendo uma forma de tornar o produto competitivo, nomeadamente em termos de custos iniciais. Em Portugal, o custo da sílica de fumo é cerca de 10 vezes o do cimento. Para uma dosagem corrente (10% da massa de cimento), a adição de sílica de fumo implicaria elevar o custo do material cimentício para o dobro. De modo a permitir reduzir os custos de produção, analisaram-se composições com dosagens elevadas de CV (até 60%), o que permite, também, o escoamento deste subproduto industrial e contribui para minimizar um problema ambiental.

Com o intuito de cumprir os objectivos acima descritos, foi realizada uma campanha experimental, que permitiu avaliar as características mecânicas e a durabilidade das composições de betão estudadas, que foram produzidas com 400 kg/m³, 500 kg/m³ e 600 kg/m³ de ligante e com quantidades de substituição de cimento por CV de 0%, 20%, 40% e 60%.

2. MATERIAIS, COMPOSIÇÕES, FABRICO E CONSERVAÇÃO

2.1. Materiais

O cimento (C) utilizado no fabrico dos betões foi 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 CV que satisfazem os requisitos impostos na NP EN450.

Na Tabela 1 apresenta-se, para o cimento e as CV utilizadas, a composição química e as principais propriedades físicas. A partir das percentagens dos óxidos elementares do cimento, foram determinados os componentes potenciais do cimento de acordo com as expressões de Bogue [4], que constituem a Tabela 2.

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

		C	CV
composição química	SiO ₂ (%)	19.71	42.16 – 58.46
	Al ₂ O ₃ (%)	5.41	21.04 – 32.65
	Fe ₂ O ₃ (%)	3.34	3.51 – 9.13
	CaO total (%)	61.49	1.67 – 9.18
	MgO (%)	2.58	0.65 – 2.59
	SO ₃ (%)	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	—
propriedades físicas	massa específica (kg/m ³)	3150	2360
	superfície específica de Blaine (m ² /kg)	358.4	387.9
	finura (%)	(> 90 μm) 1.7	(> 45 μm) 14.1 – 31.6
	exigência de água	28.0	29.7

Tabela 2 – Componentes potenciais do C

C ₃ S (%)	61.61
C ₂ S (%)	4.55
C ₃ A (%)	8.69
C ₄ AF (%)	10.15
C \bar{S} (%)	5.47

Tabela 3 – Características dos agregados

Característica / ensaio	Areia fina	Areia grossa	Brita
resistência mecânica / resistência à compressão (MPa)	145.84		
resistência mecânica / resistência ao esmagamento (%)	–	–	25
resistência mecânica / desgaste de Los Angeles (%)	–	–	26
módulo de elasticidade (GPa)	50.38		
absorção de água (%)	0.51	1.88	2.35
peso específico das partículas secas (kg/m ³)	2610	2530	2390
massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/m ³)	2650	2650	2530
massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/m ³)	2630	2570	2440
coeficiente de forma – índice volumétrico	–	–	0.21
teor de partículas finas e matérias solúveis (%)	3.5	1.52	0.54
classe granulométrica [5]	2.5/0.16	5/1.25	10/2.5
máxima dimensão (mm)	2.38	4.76	9.53
módulo de finura	2.47	4.54	5.93

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, enquadra-se no intervalo compreendido entre 0.5% e 1.0% da massa de ligante. Pelas razões económicas subjacentes a este trabalho e referidas anteriormente, adoptou-se a dosagem de 0.5%.

Todas as amassaduras foram realizadas recorrendo à mistura de três agregados britados, provenientes da mesma pedra granítica: areia fina; areia grossa; brita. Os agregados foram utilizados conforme recebidos, i.e., sem se proceder a qualquer lavagem ou outro tipo de tratamento prévio. As principais propriedades dos agregados apresentam-se na Tabela 3.

2.2. Composições, fabrico e conservação

Foram realizadas doze amassaduras correspondentes a três dosagens de ligante ($L = C + CV$) distintas. As quantidades de L foram fixas em 400 kg/m^3 , 500 kg/m^3 e 600 kg/m^3 e a respectiva relação água/ligante (A/L) em 0.4, 0.3 e 0.25. As razões A/L adoptadas resultaram de amassaduras experimentais com 40% de substituição de C por CV, realizadas com o intuito de obter abaixamentos no cone de Abrams de cerca de 200 mm. As quantidades dos agregados foram estimadas por intermédio da aplicação do método de Faury [6]. As composições dos betões produzidos apresentam-se na Tabela 4, bem como os resultados dos ensaios de abaixamento (SL) e espalhamento (F), e foram designadas de forma a serem facilmente identificadas. Na mnemónica utilizada, o primeiro número traduz a dosagem de ligante e o número a seguir a CV representa a percentagem de substituição de C por CV.

Tabela 4 – Composição e trabalhabilidade dos betões

Betão	C (kg/m^3)	CV (kg/m^3)	Areia fina (kg/m^3)	Areia grossa (kg/m^3)	Brita (kg/m^3)	SL (mm)	F (mm)
400CV0	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	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	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

Das composições realizadas foram fabricados provetes com o objectivo de cumprir um programa experimental que permitiu caracterizar os betões produzidos de forma abrangente, incidindo na avaliação do comportamento mecânico e na durabilidade. Assim, de cada composição, foram moldados provetes cúbicos de 100 mm de aresta, cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura e prismáticos com $100 \times 100 \times 850 \text{ mm}^3$, para avaliar o desenvolvimento ao longo do tempo da resistência à compressão uniaxial, do módulo de elasticidade, da resistência à tracção por compressão diametral, da resistência ao corte e do comportamento em flexão [7, 8, 9]. Neste trabalho, apenas serão apresentados e analisados os resultados referentes à resistência à compressão em provetes cúbicos e aos ensaios relacionados com a durabilidade (absorção de água por imersão e por capilaridade, migração de cloretos em estado não estacionário e resistividade eléctrica).

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 de realização dos ensaios. Nessa data, procedeu-se à necessária preparação dos provetes: realização de um entalhe nos prismas a ensaiar à flexão.

As amostras empregues nos ensaios de durabilidade resultaram do aproveitamento dos meios prismas provenientes do ensaio de flexão. Através de corte por via húmida, os provetes foram acertados dimensionalmente e originaram as amostras designadas por a_1 , a_2 e a_3 , a usar nos ensaios de absorção de água e as amostras b_1 , b_2 , b_3 , b_4 , b_5 e b_6 a sujeitar ao ensaio de penetração de cloretos, conforme ilustrado na Figura 1. O provete a_4 , funcionou como reserva, para o caso de ser necessário proceder à repetição de qualquer dos ensaios, ou para prevenir a hipótese da necessidade de proceder a uma eventual substituição se algum deles se danificar durante o processo de corte.

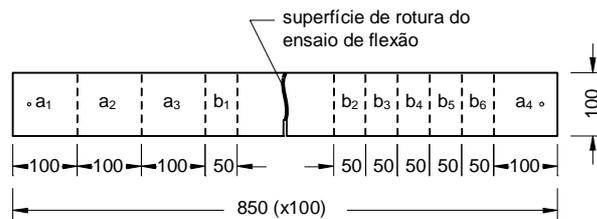


Figura 1 – Provetes para ensaios de durabilidade (dimensões em mm)

3. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

3.1. Resistência à compressão

Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados sob controlo de deslocamentos quando alcançada a idade de 3, 7, 28, 56, 90 e uma idade compreendida entre os 180 e os 216 dias. Para cada composição foram ensaiados 3 provetes em cada idade e todos os ensaios foram realizados impondo uma velocidade de deslocamento do prato móvel da prensa constante de $6.0 \mu\text{m/s}$. Na Figura 2, é possível observar uma foto de um ensaio em curso.



Figura 2 – Ensaio de compressão uniaxial de provetes cúbicos

3.2. Absorção de água por imersão

De cada composição realizada foram ensaiados três provetes, respeitando os procedimentos descritos na especificação do LNEC E394 [10], referente à determinação da absorção de água por imersão à pressão atmosférica.

3.3. Absorção de água por capilaridade

Os provetes de betão, após terem sido sujeitos ao ensaio de absorção de água por imersão foram submetidos ao ensaio de absorção de água por capilaridade à pressão atmosférica. Os procedimentos de ensaio foram efectuados com base no disposto na especificação do LNEC E393 [11].

A Figura 3 ilustra um ensaio em curso, onde é possível observar em (a) uma perspectiva geral e em (b), mais em detalhe, os provetes submetidos a ensaio.

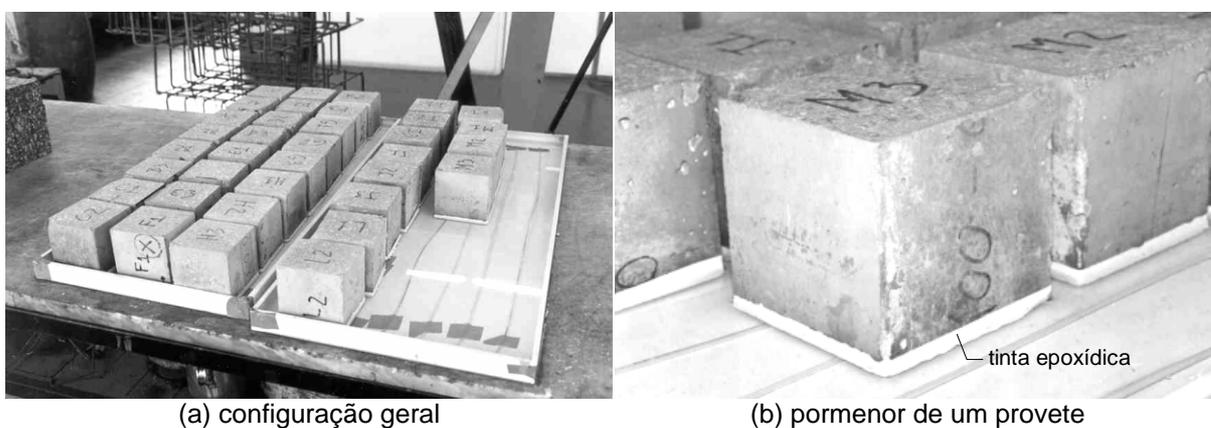


Figura 3 – Ensaio de absorção de água por capilaridade à pressão atmosférica

A quantificação da água absorvida foi consumada através da realização de sucessivas pesagens dos provetes. Essas pesagens foram realizadas de acordo com um plano de estabelecido, perfazendo 29 dias e com início no primeiro contacto dos provetes com a água. As sucessivas pesagens foram sempre efectuadas depois de escorrida a água superficial.

Os resultados obtidos permitiram determinar, para cada instante de tempo, a respectiva absorção capilar, calculada através da divisão do aumento da massa registado pela área da superfície inferior do provete que esteve em contacto com a água. Este procedimento permitiu elaborar diagramas representativos da cinética de absorção capilar, expressando a absorção capilar em função da raiz quadrada do tempo.

Também foi realizada uma avaliação dos resultados considerando apenas as primeiras quatro horas de ensaio, em relação aos quais se procedeu ao cálculo dos coeficientes de absorção capilar (S) de cada composição, correspondentes ao gradiente das curvas de absorção capilar, obtido por aplicação de uma regressão linear com base no método dos mínimos quadráticos aos pontos obtidos. Este parâmetro, S , pode ser considerado como caracterizador da durabilidade das misturas, uma vez que reflecte o período de absorção capilar em relação ao qual se realiza o preenchimento dos poros de maior diâmetro, principais responsáveis pela penetração de fluidos gasosos e líquidos nos betões.

3.4. Migração de cloretos em estado não estacionário

A caracterização da resistência à migração de cloretos foi realizada através de ensaios em regime não estacionário, baseados no procedimento desenvolvido por Luping (*CTH rapid method*) [12].

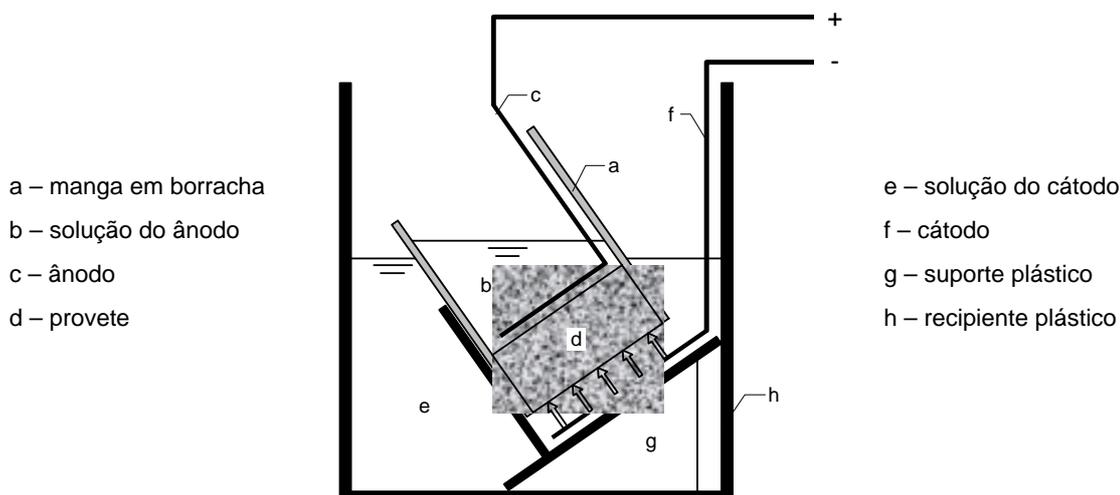


Figura 4 – Ensaio de migração de cloretos em estado não estacionário: *CTH rapid method*

Luping sugere que seja aplicada uma diferença de potencial de 10 a 60 V (em função da qualidade do betão) a um provete de 50 mm de espessura e de secção circular com um diâmetro de cerca de 100 mm durante um período de tempo pré-estabelecido, de acordo com o esquema representado na Figura 4. Decorrido este período de tempo, o provete é dividido axialmente em duas porções e é medida a profundidade de penetração (x_d) por intermédio de um processo colorimétrico, recorrendo à pulverização das superfícies de fractura com uma solução de nitrato de prata.

O coeficiente de difusão em regime não estacionário (D_{ns}) é calculado recorrendo à seguinte expressão [12]:

$$D_{ns} = \frac{RTL}{ZF\Delta E} \left(\frac{x_d - \alpha\sqrt{x_d}}{t} \right) \quad (1)$$

Sendo:

$$\alpha = 2\sqrt{\frac{RTL}{ZF\Delta E}} \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right) \quad (2)$$

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, $c_d \approx 0.07$ N;
- c_0 – concentração de cloro na célula a montante, N.

Os ensaios realizados envolveram provetes prismáticos $100 \times 100 \times 50$ mm³, em detrimento dos cilíndricos propostos por Luping, e, através de uma ligação em paralelo, foi possível submeter a ensaio, simultaneamente, até 18 provetes diferentes, sendo ensaiados 6 de cada composição com uma idade de cerca de 1 ano.

A diferença de potencial imposta foi de 40.0 ± 0.2 V, aplicada com recurso a uma fonte de alimentação de corrente contínua com capacidade máxima de 60 V e 3.0 A e a duração do ensaio foi determinada em função da leitura inicial da intensidade de corrente, satisfazendo o preconizado por Luping, de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 – Duração do ensaio *CTH rapid method* [12]

Intensidade de corrente inicial, I_0 (mA)	Duração do ensaio, t_{CTH} (horas)
$I_0 < 5$	168
$5 \leq I_0 < 10$	96
$10 \leq I_0 < 30$	48
$30 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 120$	8
$120 \leq I_0 < 240$	4
$I_0 > 240$	2

Na Figura 5 é possível observar um ensaio de migração de cloretos em curso e na Figura 6 (b) um provete após ter sido dividido em duas porções, onde é possível visualizar a frente de penetração de cloretos, identificável pela coloração mais clara

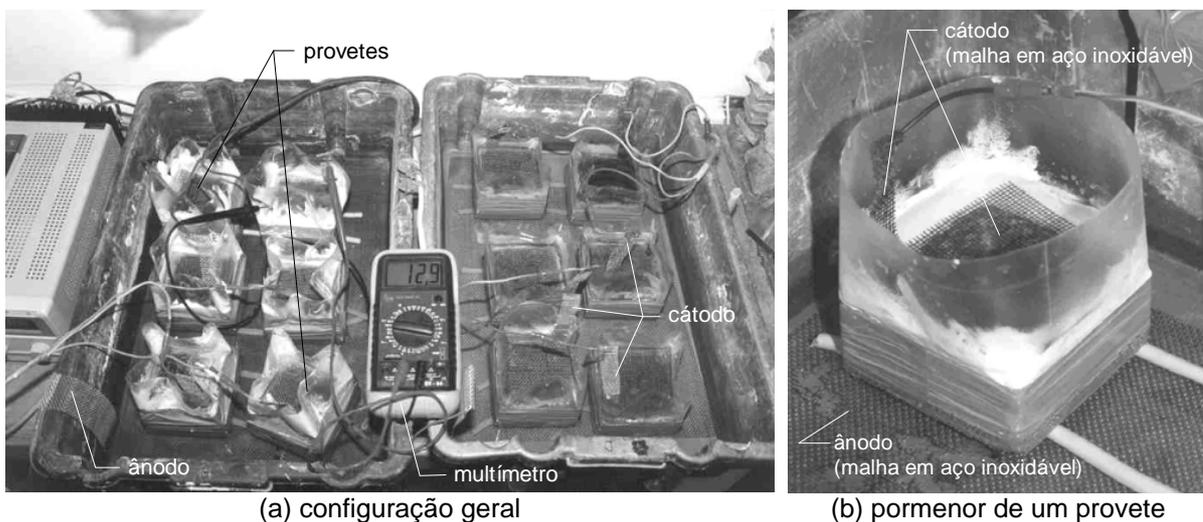


Figura 5 – Ensaio de penetração de cloretos



(a) provetes a submeter à acção da solução de nitrato de prata



(b) frente de penetração de cloretos

Figura 6 – Avaliação da profundidade de penetração de cloretos

3.5. Resistividade eléctrica

No ensaio *CTH* de penetração acelerada de cloretos é efectuada uma leitura inicial da intensidade de corrente com o intuito de estabelecer a duração do ensaio. Recorrendo a essas leituras, é possível determinar a resistividade eléctrica dos betões sujeitos a ensaio.

Assim, nos provetes sujeitos à aplicação de uma diferença de potencial de 40 ± 0.5 V, foi registada a respectiva intensidade de corrente inicial, recorrendo à primeira leitura do ensaio anterior.

Por aplicação da Lei de Ohm é possível determinar a resistividade eléctrica (ρ) oferecida pelos provetes:

$$R = \frac{\Delta E}{I_0} \quad (3)$$

Sabendo que:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (4)$$

É possível concluir que:

$$\rho = \frac{\Delta E A}{L I_0} \quad (5)$$

Em que:

- ρ – resistividade eléctrica, $\Omega \cdot m$;
- R – resistência eléctrica, Ω ;
- ΔE – valor absoluto da diferença de potencial, V;
- A – área da superfície do provete, m^2 ;
- L – espessura do provete, m;
- I_0 – intensidade de corrente inicial, A.

O procedimento utilizado na avaliação de ρ é parte integrante do ensaio *CTH*. Neste sentido e à semelhança dos ensaios efectuados para determinação do D_{ns} , a resistividade do betão foi aferida em seis provetes de cada uma das amassadura efectuadas.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

4.1. Resistência à compressão

O efeito da inclusão de CV nas propriedades mecânicas dos betões produzidos ao longo do tempo é aqui representado através dos resultados da resistência média à compressão uniaxial ($f_{cm,cubo}$) que se apresentam nas Figuras 7 a 9. Nestas Figuras também se apresentam as curvas representativas do ajuste dos resultados obtidos recorrendo à equação hiperbólica (6), proposta por Carino [13] e Knudsen [14].

$$f_c = f_{m\acute{a}x} \frac{k(t - t_0)}{1 + k(t - t_0)} \quad (6)$$

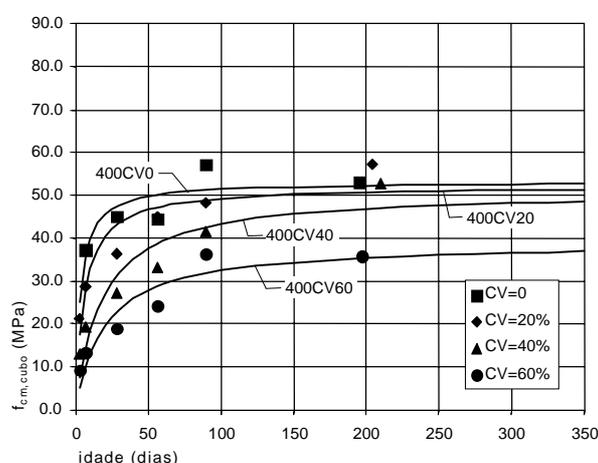


Figura 7 – Resistência à compressão média
(L = 400 kg/m³)

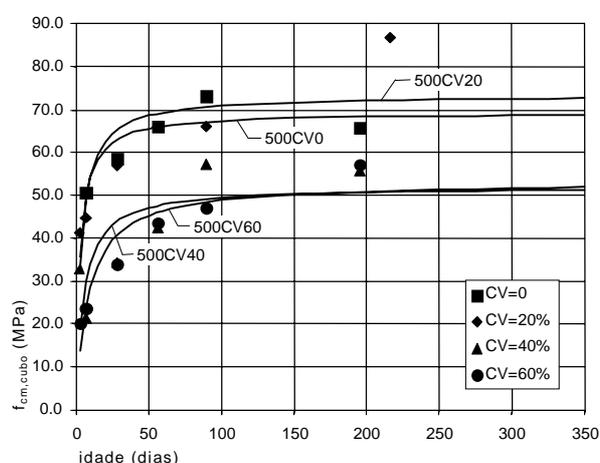


Figura 8 – Resistência à compressão média
(L = 500 kg/m³)

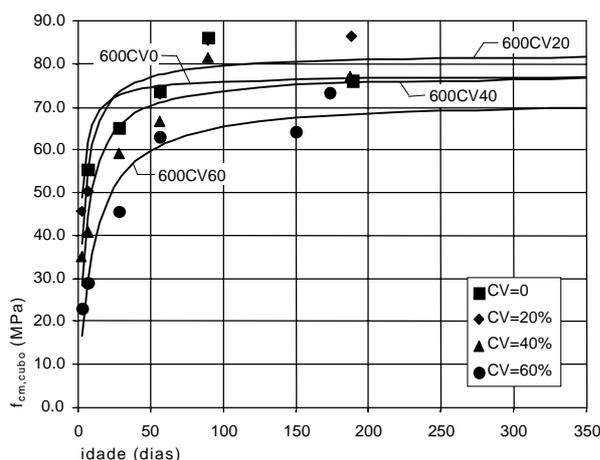


Figura 9 – Resistência à compressão média
(L = 600 kg/m³)

Através da análise das Figuras 8.3 a 8.5 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 kg/m³.

Aumentando a quantidade de L para 600 kg/m^3 , o $f_{\text{cm,cubo}}$ 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 da resistência à compressão inferiores e os valores máximos foram alcançados nas misturas de controlo, sem inclusão de CV (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 conduzir à obtenção de valores médios da resistência à compressão com a mesma ordem de grandeza e o comportamento das composições com 60% de CV é marcadamente inferior ao das restantes;
- as composições com 60% de substituição de C por CV, apesar das reduzidas resistências verificadas nas idades mais jovens, permitem produzir betões com apreciável resistência à compressão em idades mais avançadas, atendendo à 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 $L = 600 \text{ kg/m}^3$ ($C = 240 \text{ kg/m}^3$);
- o ganho de resistência à compressão dos betões nas primeiras idades é tanto mais lento 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 $f_{\text{cm,cubo}}$ 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, nomeadamente o ensaio de resistência à compressão 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.

4.2. Absorção de água por capilaridade

A cinética da absorção capilar pode ser representada pela variação da quantidade de água absorvida por unidade de superfície do betão em contacto com a água em função da raiz quadrada do tempo. Nas Figuras 10 a 12 representam-se as curvas de absorção capilar registadas correspondentes aos valores médios da absorção capilar (A_{cm}) obtidos no ensaio de três provetes.

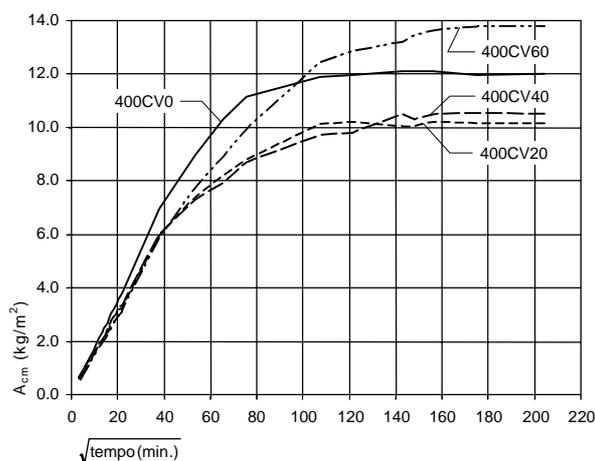


Figura 10 – Curvas de absorção capilar ($L = 400 \text{ kg/m}^3$)

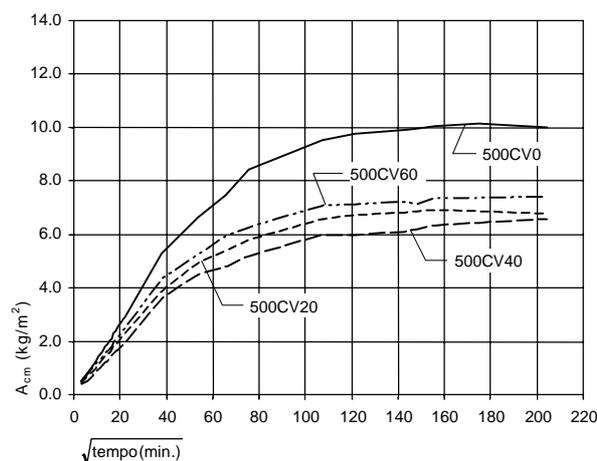


Figura 11 – Curvas de absorção capilar ($L = 500 \text{ kg/m}^3$)

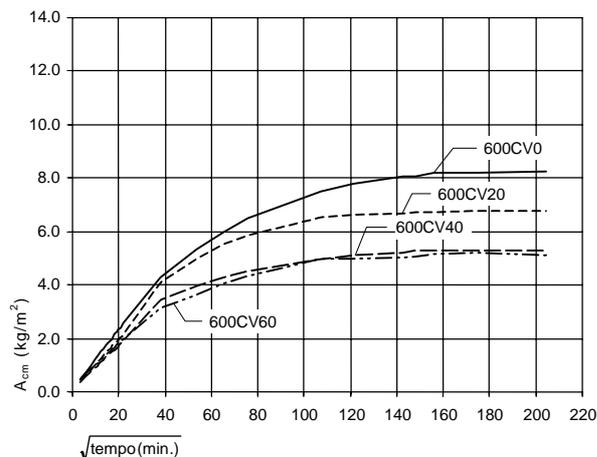


Figura 12 – Curvas de absorção capilar ($L = 500 \text{ kg/m}^3$)

As curvas de absorção capilar apresentam um desenvolvimento de acordo com o esperado, apresentando uma inclinação decrescente ao longo do tempo, indicando que são os capilares mais estreitos que vão sendo preenchidos pela água até à ascensão máxima e reflectindo a existência de três comportamentos distintos: a primeira parte da curva, correspondente à maior inclinação, representa o preenchimento com água dos capilares de maior diâmetro e decorre ao longo de cerca de 1 a 2 horas; seguidamente processa-se, mais lentamente, o preenchimento dos capilares mais finos; a terceira e última fase corresponde à estabilização da água absorvida devido ao preenchimento da rede capilar.

As curvas de absorção capilar obtidas demonstram que aumentando a quantidade de ligante diminui a rede de poros capilares, que esse decréscimo é mais acentuado aquando da passagem de $L = 400 \text{ kg/m}^3$ para $L = 500 \text{ kg/m}^3$ e que, em geral, a inclusão de CV contribui, também, para a diminuição da porosidade capilar.

Nas composições com 400 kg/m^3 de ligante as curvas de absorção correspondentes à incorporação de 20% e de 40% de CV apresentam desenvolvimentos semelhantes e mostram que a quantidade de água absorvida por capilaridade atingiu níveis inferiores à da composição de controlo (400CV0). O comportamento da mistura 400CV60 afastou-se significativamente das restantes composições constituídas com CV. Para esta quantidade de ligante e de CV, a absorção capilar revelou-se inferior à da mistura de controlo até próximo dos 7 dias de idade de ensaio ($\sqrt{\text{tempo (min.)}} \approx 100$). Para idades superiores, este comportamento alterou-se, passando a absorção capilar da composição 400CV60 a superar a da composição de controlo, indiciando que a inclusão de 60% de CV reduz o diâmetro dos poros capilares, mas é incapaz de diminuir a porosidade capilar total. Para este nível de ligante e de substituição de C por CV, a quantidade de hidróxido de cálcio disponibilizada pela hidratação do cimento parece ser insuficiente para promover a reacção pozolânica de grande parte das CV, passando estas a comportar-se de modo semelhante a uma areia fina.

Aumentando a dosagem de L para 500 kg/m^3 , a introdução de CV revelou-se vantajosa para todas as quantidades de substituição de C por CV estudadas. Mesmo para a composição 500CV60, a quantidade de água absorvida por capilaridade é claramente inferior à da mistura de controlo, revelando-se contudo, superior à das composições 500CV20 e 500CV40.

Nas composições com $L = 600 \text{ kg/m}^3$, a quantidade de hidróxido de cálcio disponibilizada pela hidratação do cimento aparenta ser já suficiente para promover as reacções pozolânicas de grande parte das CV, passando a ser a quantidade de 60% de CV aquela que apresenta um melhor desempenho, praticamente igual mas ligeiramente melhor do que a composição 600CV40.

Admitindo que no final do ensaio a rede capilar se encontra preenchida, foi possível constatar que os resultados obtidos foram concordantes com os provenientes dos ensaios de absorção de água por imersão. Assim, face aos resultados obtidos, o ensaio de absorção de água por imersão parece ser dispensável, caso se assegure a manutenção do ensaio de absorção de água por capilaridade durante tempo suficiente para permitir a estabilização da quantidade de água absorvida, facto indicador do preenchimento da rede capilar, e os seus resultados não são aqui apresentados. Para as composições ensaiadas, a manutenção do ensaio durante cerca de 18 dias ($\sqrt{\text{tempo (min.)}} \approx 160$) parece ser suficiente para atingir a condição referida.

A análise dos valores obtidos da absorção de água por capilaridade após 29 dias de ensaio e representados na Figura 13 permite evidenciar que:

- os resultados revelam grande sensibilidade relativamente ao acréscimo da quantidade de L de 400 kg/m^3 para 500 kg/m^3 , diminuindo significativamente o valor da A_{cm} das composições. Aumentando a quantidade de L para 600 kg/m^3 , a variação da A_{cm} não é tão acentuada, mantendo a tendência para a sua diminuição;
- a adição de CV beneficia o comportamento das composições, constatando-se que apenas a composição 400CV60 originou a obtenção de um valor da A_{cm} superior ao da mistura de controlo, sem adição de CV (400CV0);

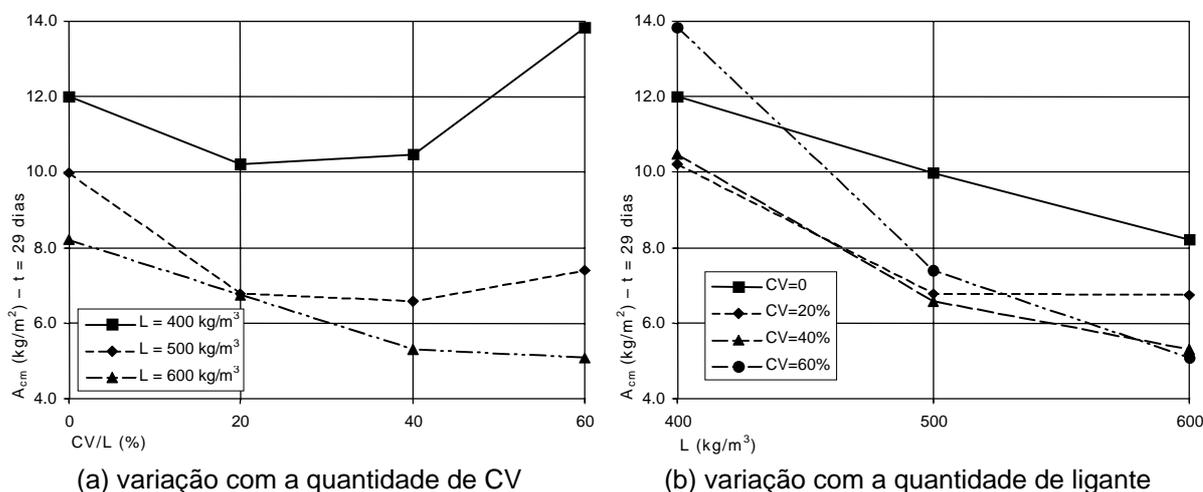


Figura 13 – Absorção de água por capilaridade após 29 dias de ensaio

Conforme se pode constatar por intermédio da observação da Figura 14, ilustrativa dos coeficientes de absorção capilar médios (S_m) determinados, a inclusão de CV provoca a sua diminuição. Este efeito é mais pronunciado quando comparados os S_m correspondentes às composições de controlo e às 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.

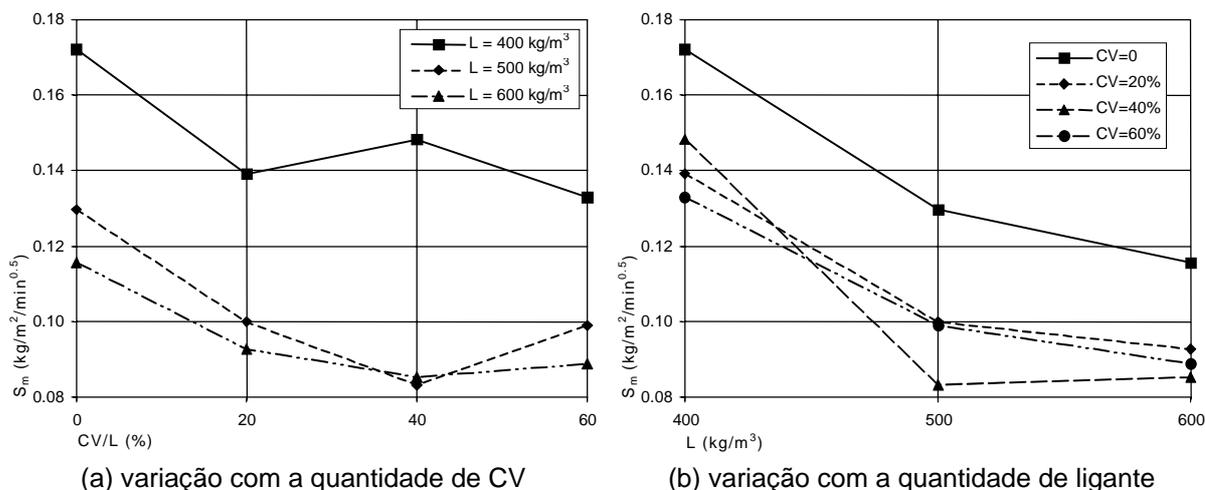


Figura 14 – Coeficiente de absorção de água por capilaridade

Relativamente ao efeito afecto ao acréscimo da quantidade de L associado à redução da respectiva razão A/L, a Figura 14 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, evidenciando, para estas composições, semelhanças na cinética de absorção de água pelos poros capilares de maior diâmetro.

Recorrendo à classificação proposta por Browne [15], 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 ligante, desde que adicionadas CV nas amassaduras, se conseguem betões de qualidade elevada.

4.3. Migração de cloretos em estado não estacionário

A Figura 15 evidencia os efeitos da adição de CV, da dosagem de L e da respectiva razão A/L no valor médio do coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário (D_{nsm}) determinado.

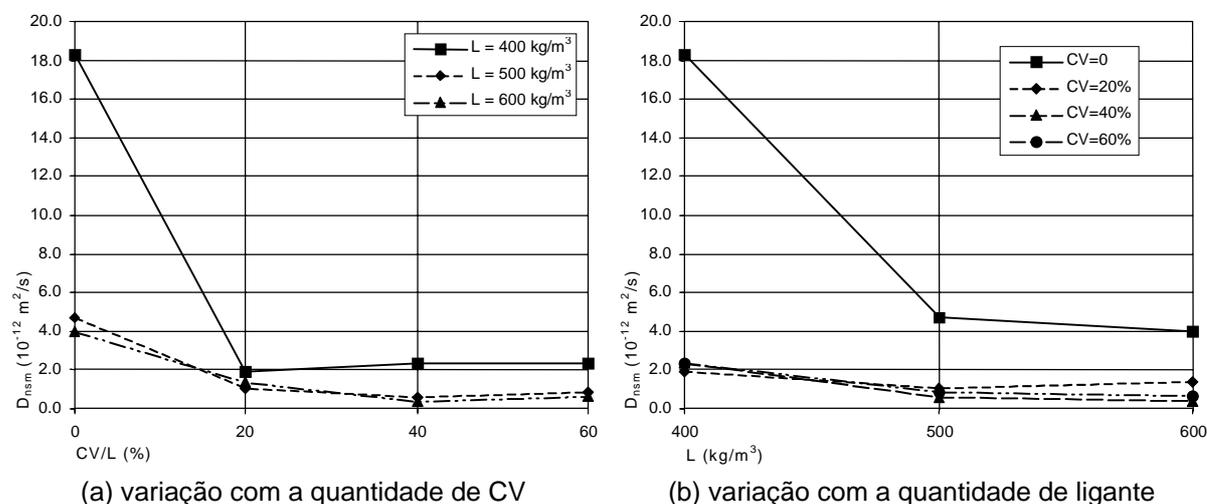


Figura 15 – Coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário

Os resultados obtidos demonstram que, para as composições testadas, a inclusão de CV é particularmente vantajosa, permitindo elevar substancialmente a resistência dos betões à migração de iões de cloro. Mesmo para a composição mais pobre em ligante e cimento (400CV60: C = 160 kg/m³; CV = 240 kg/m³), o D_{ns_m} obtido foi inferior ao da mistura sem incorporação de CV e com 600 kg/m³ de cimento (600CV0).

Comparando o sucedido nas misturas de controlo com as elaboradas com 20% de CV, é possível constatar que estas últimas apresentam um D_{ns_m} substancialmente inferior. Esta redução do D_{ns_m} é mais notória nas composições com L = 400 kg/m³, sendo a substituição de 20% de C por CV capaz de provocar uma redução do D_{ns_m}, de cerca de 90%. Para dosagens de ligante superiores o efeito não é tão marcante, correspondendo a uma diminuição de aproximadamente 77% (L = 500 kg/m³) e 65% (L = 600 kg/m³).

Para dosagens de CV superiores a 20%, o D_{ns_m} varia de modo marginal, evidenciando que a incorporação de CV até 60%, aparentemente, não afecta de forma prejudicial a resistência dos betões ao ataque dos iões de cloro. Através da análise dos resultados obtidos é mesmo possível verificar que as composições com 40% de CV e quantidade de L superior a 400 kg/m³ foram aquelas que apresentaram um menor valor do D_{ns_m}, indiciando que a quantidade óptima de substituição de C por CV deverá ser próxima de 40%.

O ensaio de migração de iões de cloro em estado não estacionário revelou-se mais sensível à presença ou não de CV nas misturas do que à variação da quantidade de ligante e razão A/L associada. Apenas foi registada uma redução substancial do D_{ns_m}, aquando da passagem de 400 kg/m³ para 500 kg/m³ de L nas composições sem CV. Para as composições com CV, o efeito provocado pela quantidade de ligante não é tão acentuado. No entanto, a Figura 15 permite observar a existência de uma melhoria do comportamento das misturas associada ao acréscimo de L de 400 kg/m³ para 500 kg/m³. O acréscimo de L para 600 kg/m³ parece ser inconsequente, apresentando estas composições valores de D_{ns_m} semelhantes ao das produzidas com 500 kg/m³.

A migração dos iões de cloro através dos betões está condicionada pela porosidade das respectivas matrizes. Assim, é de esperar que o D_{ns_m} diminua com o aumento da quantidade de L e com a o decréscimo da relação A/L. Para as composições estudadas, verifica-se que o volume de pasta ligante hidratado correspondente a dosagens de ligante superiores a 400 kg/m³ parece ser suficiente para o preenchimento dos poros, não sendo visíveis grandes vantagens na subida desta quantidade para além dos 500 kg/m³.

Face aos resultados obtidos, a principal diferença de comportamento registada deve estar relacionada com a inclusão ou não de CV nas composições. A maior quantidade de aluminatos proporcionada pela substituição de C por CV, pode estar na origem do melhor desempenho das composições com CV, comprovando o descrito por Alonso *et al.* [16]. Os aluminatos apresentam a capacidade de reagirem quimicamente com os iões de cloro, fixando-os e reduzindo a quantidade de cloretos livres, capazes de migrarem através do betão, provocando a diminuição dos respectivos valores do D_{ns_m}. Este aparenta ser o efeito predominante, sendo a inclusão de 20% de CV capaz de reduzir substancialmente a quantidade de cloretos livres no betão.

Os resultados verificados traduzem, também, os efeitos relacionados com a quantidade de ligante e com a pozolanicidade das CV, de forma semelhante ao referido para os outros ensaios identificadores de parâmetros de durabilidade aqui apresentados (absorção de água por imersão e por capilaridade). O comportamento dos betões em estudo deverá reflectir a ocorrência simultânea dos efeitos referidos, parecendo ser fundamental a capacidade de redução da quantidade dos iões de cloro livres, proporcionada pela presença de CV.

Com base na classificação proposta por Gjrv [17], 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/m³ 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.

4.4. Resistividade eléctrica

Os resultados determinados e apresentados na Figura 16 mostram que a substituição de C por CV provoca o acréscimo da resistividade média (ρ_m) dos betões estudados e que este efeito é tanto mais relevante quanto maior for a dosagem de L.

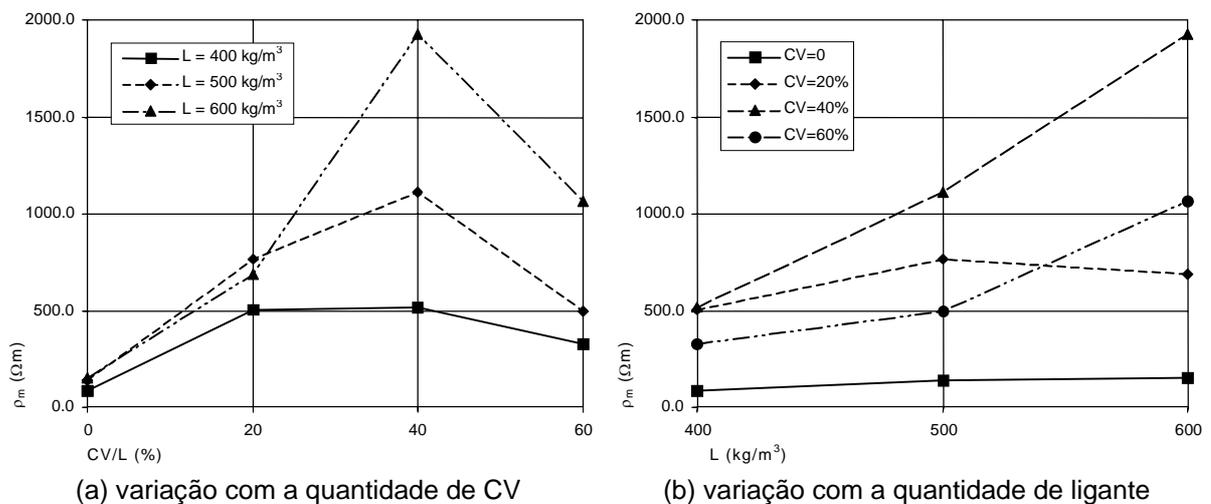


Figura 16 – Resistividade eléctrica

Para os betões fabricados com 500 kg/m³ e 600 kg/m³ de L a inclusão de CV até 40% aumenta substancialmente a ρ_m dos betões, sendo visível um decréscimo apreciável para maiores quantidades de CV.

Nos betões produzidos com 400 kg/m³ de ligante o mesmo efeito é também sentido, mas de forma menos acentuada. Para estes betões, constituídos com 20% e 40% de CV, a diferença registada na respectiva ρ_m não é significativa. Contudo, a inclusão de 40% de CV provoca um ligeiro acréscimo do valor da ρ_m (de cerca de 2%), permitindo generalizar que, para as composições estudadas, a incorporação de 40% de CV corresponde à dosagem óptima, independentemente da quantidade de ligante utilizada. A existência desta quantidade óptima pode ser justificada devido ao facto de, para maiores dosagens de CV, a quantidade de hidróxido de cálcio disponibilizada pela hidratação do cimento não ser

suficiente para permitir a participação de elevadas quantidades de CV nas reacções pozolânicas. Nestas condições, a quantidade total de CV não reactivas tendem a aumentar.

A resistividade dos betões produzidos recorrendo à substituição de C por 60% de CV, atingiu valores inferiores aos obtidos com 40% de CV, mas sempre superiores ao das composições de controlo revelando o bom desempenho das CV, mesmo para quantidades tão elevadas deste material.

Os resultados obtidos evidenciam que o aumento da quantidade de ligante provoca um acréscimo da ρ_m dos betões, sendo este efeito praticamente imperceptível nas composições fabricadas sem adição de CV e mais marcante nas compostas com 40% de CV.

5. CONCLUSÕES

Atendendo aos resultados obtidos, é possível produzir betões de elevado desempenho, recorrendo à adição de materiais correntes de baixo custo conforme recebidos, nomeadamente CV consideradas de qualidade reduzida e areias britadas.

As resistências à compressão atingiram 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.

Adições de CV até 40% e dosagens de L superiores a 400 kg/m^3 resulta na obtenção de resistências à compressão com a mesma ordem de grandeza para idades superiores a cerca de 56 dias.

A substituição de 60% de C por CV conduz à obtenção de betões com características mecânicas marcadamente inferiores aos restantes. Contudo, considerando a reduzida quantidade de C presente na mistura, estes podem ser encarados como betões com bom desempenho económico.

Todos os parâmetros de durabilidade aferidos indicam que a presença de CV nas misturas é benéfica, resultando num betão mais durável. Este efeito é mais relevante relativamente à penetração de cloretos, indiciando que a inclusão de CV em betões localizados em ambientes sujeitos a este tipo de agressividade é particularmente favorável.

A utilização de CV provenientes da Central Termoeléctrica do Pego, não conformes com a NP EN450, mesmo em quantidades elevadas, proporcionou melhorias significativas nos parâmetros de durabilidade determinados e mostrou-se adequada em relação à resistência à compressão, caso não seja condicionante a obtenção de elevados níveis de resistência nas primeiras idades, uma vez que as CV atrasam o desenvolvimento das mesmas, devido à morosidade associada à efectivação das reacções pozolânicas. Assim, o critério de conformidade adoptado pela generalidade das especificações normativas, que impõem a rejeição de CV tendo em conta, exclusivamente, o seu teor de inqueimados aparenta ser inadequado e antieconómico.

6. 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.

7. 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] LNEC E355, *Inertes para argamassas e betões – classes granulométricas*, Documentação normativa, especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Novembro de 1990;
- [6] Faury, J., *Le Béton*, Editions Dunod, Paris, 1958;
- [7] Camões, A. et al., *Influência das cinzas volantes no desempenho de betões*, Encontro Nacional Betão Estrutural 2000, Porto, Novembro de 2000, p.105-114;
- [8] Camões, A. et al., *Comportamento à tracção em flexão de betões de desempenho melhorado*, Encontro Nacional Betão Estrutural 2000, Porto, Novembro de 2000, p.151-160;
- [9] Camões, A. et al., *Módulo de elasticidade de betões de elevado desempenho com cinzas volantes*, Análise Experimental de Tensões e Mecânica Experimental, 4^o Encontro Nacional, Bragança, Outubro de 2001;
- [10] LNEC 394, *Betões – determinação da absorção de água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica*, Documentação normativa, especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Maio de 1993;
- [11] LNEC 393, *Betões – determinação da absorção de água por capilaridade*, Documentação normativa, especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Maio de 1993;
- [12] Luping, T., *Chloride Transport in Concrete – Measurement and Prediction*, Tese de Doutoramento, Chalmers University of Technology, Gotemburgo, Suécia, 1996;
- [13] Carino, N. J., *The maturity method: theory and application*, Cement, Concrete and Aggregates, ASTM, Volume 6, Number 2, Winter 1984, p.61-67;
- [14] 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;
- [15] Browne, R. D., *Field investigations: site & laboratory tests: maintenance repair and rehabilitation of concrete structures*, CEEC, Lisboa, 1991;
- [16] Alonso et al., *Incidencia de la adición de cenizas volantes en la durabilidad de las estructuras de hormigón armado*, Hormigón y Acero, Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural, N.º 194, 1994, p.43-52;
- [17] Gjorv, Odd E., *Service life of concrete structures and performance-based quality control*, International Workshop on Innovations in Concrete Materials, Whistler, Canada, Junho 2001.