

CONTRIBUIÇÃO DA ADIÇÃO DE CINZAS VOLANTES PARA A DURABILIDADE DO BETÃO

A. CAMÕES

Assistente
UM
Guimarães

P. ROCHA

Assistente
ESTG
Viana do Castelo

B. AGUIAR

Prof. Associado
UM
Guimarães

S. JALALI

Prof. Associado
UM
Guimarães

R. DELGADO

Prof. Catedrático
FEUP
Porto

SUMÁRIO

Esta comunicação pretende demonstrar que recorrendo a materiais correntes e à substituição de cimento por cinzas volantes é possível produzir betões de elevado desempenho, sem prejuízo das suas características de durabilidade. Através da adição de cinzas volantes é possível reduzir significativamente o consumo de cimento e com a utilização de agregados britados, designadamente areias, contribuir para a preservação dos recursos naturais não renováveis existentes.

1. INTRODUÇÃO

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 à utilização de agregados britados, correntemente disponíveis no mercado nacional.

Com o intuito de cumprir os objectivos acima descritos, foi realizada uma campanha experimental que permitiu avaliar a trabalhabilidade e as características mecânicas e de durabilidade das composições estudadas, produzidas com 400 kg/m^3 , 500 kg/m^3 e 600 kg/m^3 de ligante ($L = C + CV$) e com percentagens de substituição de cimento por CV de 0%, 20%, 40% e 60%. Esta comunicação incidirá sobre as características de durabilidade das aludidas composições.

2. MATERIAIS, FABRICO E CONSERVAÇÃO

2.1. Materiais

O cimento (C) utilizado no fabrico dos betões foi o cimento Portland do tipo CEM I 42.5R.

As CV foram fornecidas pela Central Termoeléctrica do Pego e utilizadas conforme recebidas. Apresentavam um teor de inqueimados elevado, entre 6% e 9%, o que excede o recomendado pela NP EN450. Segundo esta norma, o valor máximo do teor de inqueimados não deve ser superior a 5% e só excepcionalmente superado até ao valor de 7%, quando existam normativas nacionais que o permitam.

Em todas as amassaduras realizadas recorreu-se à mistura de três agregados graníticos britados, provenientes da mesma pedreira: areia fina ($D_{\text{máx}} = 2.38$ mm); areia grossa ($D_{\text{máx}} = 4.76$ mm); brita ($D_{\text{máx}} = 9.53$ mm). Os agregados foram utilizados conforme recebidos, i.e., sem se proceder a qualquer lavagem ou outro tipo de tratamento prévio.

Também foi utilizado um superplastificante com composição química à base de condensados de naftaleno formaldeído sulfonado. Em trabalho prévio realizado [1,2], constatou-se que a quantidade óptima de superplastificante a introduzir na mistura enquadra-se no intervalo compreendido entre 0.5% e 1.0% da massa de ligante. Por razões económicas adoptou-se a dosagem de 0.5%.

2.2. 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 . As razões A/L adoptadas resultaram de amassaduras experimentais com 40% de substituição de C por CV e para todas as quantidades de ligante em estudo, realizadas com o intuito de obter abaixamentos no cone de Abrams de cerca de 200 mm. Esta avaliação permitiu fixar as razões A/L em: 0.40 para 400 kg/m^3 ; 0.30 para 500 kg/m^3 ; e 0.25 para 600 kg/m^3 . As quantidades dos agregados foram estimadas por intermédio da aplicação do método de Faury. As composições dos betões produzidos apresentam-se na Tabela 1, bem como os resultados dos ensaios de abaixamento (SL), espalhamento (F) e resistência à compressão média em três provetes cúbicos de 100 mm de aresta (f_{cm}) aos 7, 28, 56 e 90 dias de idade.

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 sua desmoldagem e imersão em água, onde permaneceram até à data de realização dos ensaios. Das composições realizadas foram moldados 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 [3, 4].

Neste trabalho, apenas serão apresentados e analisados os resultados referentes aos ensaios relacionados com a durabilidade (absorção de água por imersão e por capilaridade, migração de

cloretos em estado não estacionário e resistividade eléctrica) em amostras com cerca de 1 ano de idade.

Tabela 1 – Composição, trabalhabilidade e resistência à compressão dos betões

Betão	C (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	AF (kg/m ³)	AG (kg/m ³)	B (kg/m ³)	SL mm	F mm	f _{cm} (MPa)			
								7 dias	28 dias	56 dias	90 dias
400CV0	400	0	613.6	233.6	857.4	105	450	37.3	45.0	44.5	57.0
400CV20	320	80	592.0	262.4	878.6	210	485	28.8	36.5	45.1	48.2
400CV40	240	160	553.0	284.8	875.6	180	550	19.2	27.1	33.2	41.6
400CV60	160	240	503.4	301.0	855.0	205	535	13.3	19.0	24.3	36.4
500CV0	500	0	502.9	308.4	865.6	25	315	50.7	58.5	65.9	73.1
500CV20	400	100	461.8	334.0	869.8	105	395	44.6	56.8	65.9	66.0
500CV40	300	200	406.9	349.0	847.1	205	474	21.3	34.5	42.3	57.3
500CV60	200	300	364.2	373.7	848.7	230	550	23.7	34.0	43.6	47.2
600CV0	600	0	377.3	367.8	850.7	35	350	55.5	65.1	73.6	86.2
600CV20	480	120	326.6	399.5	856.0	125	365	50.2	65.2	73.2	85.5
600CV40	360	240	271.3	407.9	832.8	200	510	40.8	59.1	66.6	81.5
600CV60	240	360	223.3	421.2	824.2	230	530	29.0	45.6	63.0	64.4

3. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

3.1. 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.

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, onde são expressos os valores da absorção capilar em função da raiz quadrada do tempo, durante o período de realização dos ensaios, que decorreram durante 29 dias.

Também foi realizada uma avaliação dos resultados considerando apenas as primeiras quatro horas de ensaio. Neste caso, os coeficientes de absorção capilar (S) de cada composição, correspondentes ao gradiente das curvas de absorção capilar, foram determinados por aplicação de uma regressão linear com base no método dos mínimos quadráticos.

3.2. Migração de cloretos em estado não estacionário

A resistência à migração de cloretos foi avaliada através de ensaios em regime não estacionário, baseados nos procedimentos desenvolvidos por Luping (*CTH rapid method*) [5].

Para tal, foram submetidos a ensaio 6 provetes prismáticos de $100 \times 100 \times 50 \text{ mm}^3$ de cada uma das composições realizadas. A diferença de potencial imposta foi de $40.0 \pm 0.2 \text{ V}$ e a duração do ensaio foi determinada em função da leitura inicial da intensidade de corrente [5]. Decorrido este período de tempo, os provetes foram divididos axialmente em duas porções e foi 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}) foi calculado recorrendo à seguinte expressão:

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

Sendo:

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

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, $c_d = 0.07 \text{ N}$;

c_0 : concentração de cloro na célula a montante, N.

3.3. Resistividade eléctrica

No ensaio *CTH* de penetração acelerada de cloretos foi efectuada uma leitura inicial da intensidade de corrente com o intuito de estabelecer a duração do ensaio. Recorrendo a essas leituras e por aplicação da Lei de Ohm é possível determinar a resistividade eléctrica (ρ) oferecida pelos provetes:

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

ρ : resistividade eléctrica, $\Omega.m$;

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.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

4.1. 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. Na Figura 1 representam-se as curvas de absorção capilar registadas, correspondentes aos valores médios da absorção capilar (A_{cm}) obtidos no ensaio de três provetes.

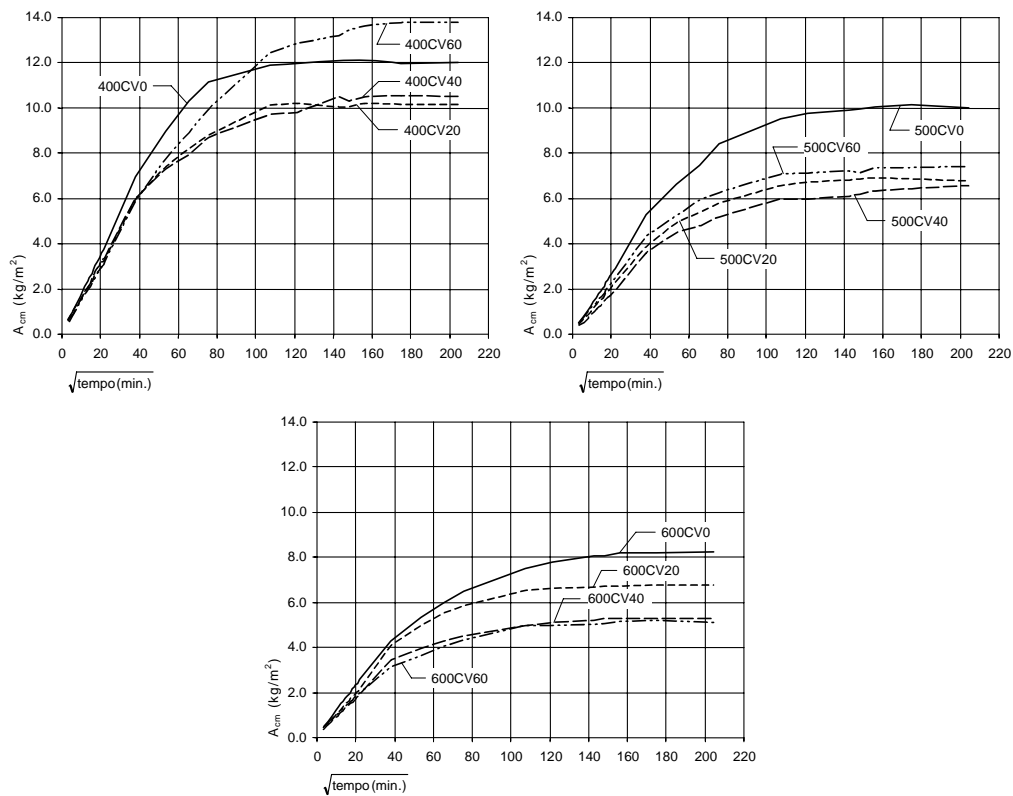


Figura 1: Curvas de absorção capilar

As curvas de absorção capilar apresentam um desenvolvimento de acordo com o esperado, ou seja, uma inclinação decrescente ao longo do tempo que indica serem os capilares mais estreitos que vão sendo preenchidos pela água até à ascensão máxima. Este comportamento reflecte a existência de três fases distintas: a primeira parte da curva, correspondente à maior inclinação, representa o preenchimento dos capilares com maior diâmetro e decorre ao longo

de cerca de 1 a 2 horas; seguidamente o processo realiza-se mais lentamente e corresponde ao preenchimento dos capilares de menor dimensão; a terceira e última fase corresponde à estabilização da água absorvida devido ao preenchimento de toda a 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 produzidas com CV. Para esta quantidade de ligante e de CV, a absorção capilar revelou-se inferior à da mistura de controlo até próximo do 7º dia de ensaio ($\sqrt{\text{tempo}(\text{min.})} \cong 100$). Para idades superiores, este comportamento alterou-se, passando a absorção capilar da composição 400CV60 a superar a da composição de controlo, iniciando que a inclusão de 60% de CV reduz o diâmetro dos poros capilares, mas é incapaz de diminuir a porosidade capilar total.

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 foi claramente inferior à da mistura de controlo 500CV0, mas 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 com grande parte das CV, passando a ser a quantidade de 60% de CV aquela que apresenta um melhor desempenho, praticamente igual mas ligeiramente superior ao da composição 600CV40.

Foram também realizados ensaios de absorção de água por imersão de acordo com a especificação E394 do LNEC. Os resultados obtidos nestes ensaios foram concordantes com os referentes ao final do ensaio de absorção de água por capilaridade. Assim, para os betões ensaiados, 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. Para as composições ensaiadas, a manutenção do ensaio durante cerca de 18 dias ($\sqrt{\text{tempo}(\text{min.})} \cong 160$) parece ser suficiente para atingir a condição referida. Nestas circunstâncias, optou-se por não apresentar os resultados da absorção de água por imersão uma vez que nada acrescentariam à avaliação de desempenho que se pretende realizar.

A análise dos valores da absorção de água por capilaridade, obtidos após 29 dias de ensaio (ver Figura 2) permite evidenciar que:

- os resultados revelaram 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 foi 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 (400CV0).

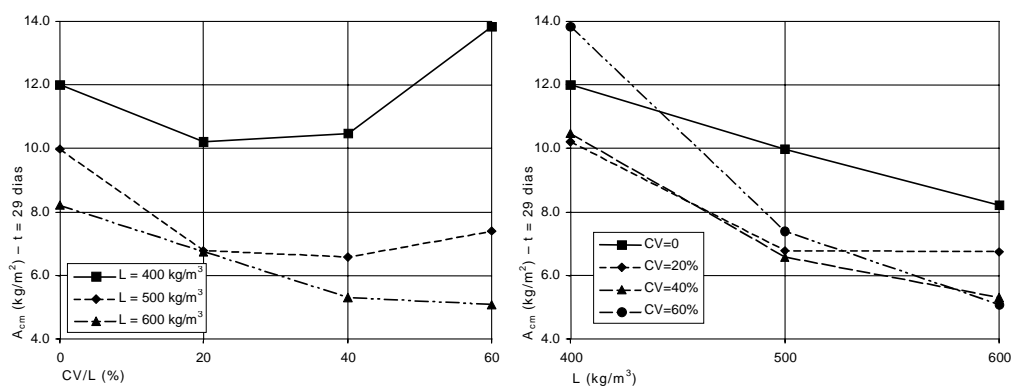


Figura 2: Absorção de água por capilaridade após 29 dias de ensaio

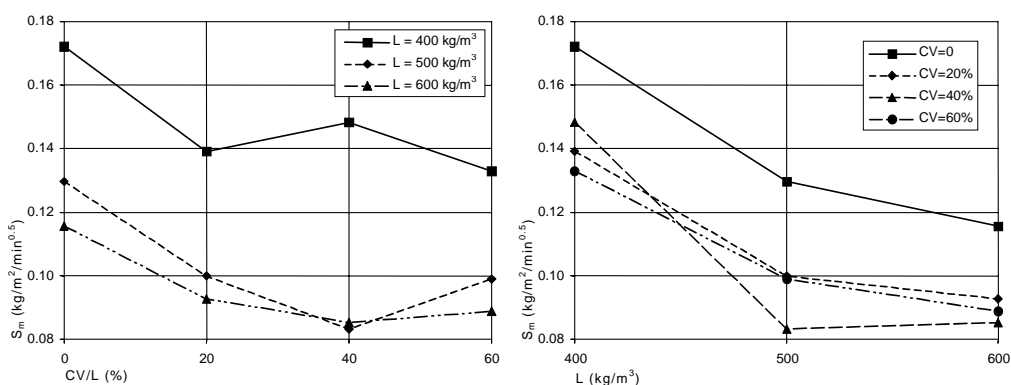


Figura 3: Coeficiente de absorção de água por capilaridade

Conforme se pode constatar por intermédio da observação da Figura 3, 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 das composições de controlo com os das fabricadas com CV = 20%. Para quantidades superiores de CV, a evolução do S_m é menos clara, evidenciando tendência para uma menor variação.

Relativamente ao efeito do acréscimo da quantidade de L associado à redução da respectiva razão A/L, a Figura 3 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.

4.2. Migração de cloretos em estado não estacionário

A Figura 4 evidencia os efeitos da adição de CV, da dosagem de L e respectiva razão A/L no valor médio do coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário (D_{nsm}).

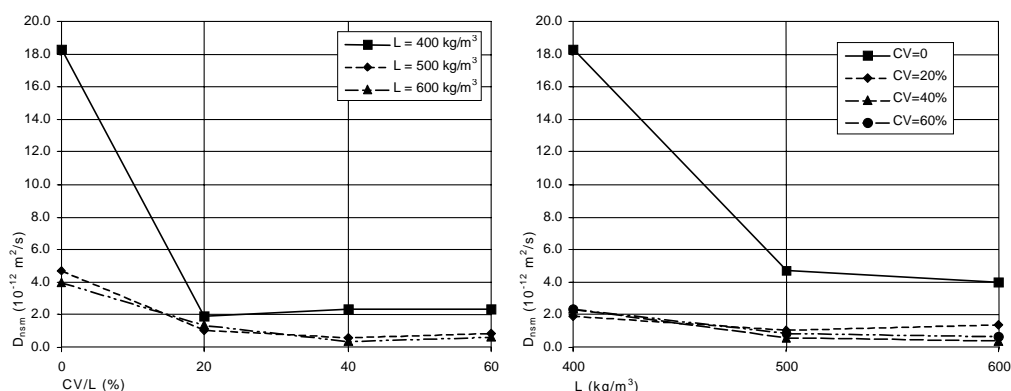


Figura 4: Coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário

Os resultados obtidos demonstram que, para as composições testadas, a inclusão de CV foi 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_{nsm} 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 fabricadas com 20% de CV, é possível constatar que estas últimas apresentam um D_{nsm} substancialmente inferior. Esta redução do D_{nsm} 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_{nsm} de cerca de 90%. Para dosagens de ligante superiores este efeito, apesar de substancial, não é tão marcante e corresponde a uma diminuição de aproximadamente 77% (L = 500 kg/m³) ou 65% (L = 600 kg/m³).

Para dosagens de CV superiores a 20%, o D_{nsm} varia de modo marginal, evidenciando que a incorporação de CV até 60%, aparentemente, não prejudica a resistência dos betões ao ataque dos iões de cloro.

O ensaio de migração de iões de cloro em estado não estacionário revelou-se mais sensível à presença das CV do que à variação da quantidade de ligante e razão A/L associada. Foi registada uma redução substancial do D_{nsm} , aquando da passagem de 400 kg/m³ para 500 kg/m³ de L nas composições sem CV. Para as composições com CV, a influência da quantidade de ligante não foi tão acentuada. No entanto, a Figura 4 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, uma vez que os respectivos valores de D_{nsm} foram semelhantes aos obtidos com L = 500 kg/m³.

Face aos resultados obtidos, a principal diferença de comportamento registada deve estar relacionada com a presença 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, o que confirma a opinião expressa por Alonso *et al.* [6]. Os aluminatos reagem quimicamente com os iões de cloro fixando-os e reduzindo a quantidade de cloretos livres capazes de migrarem através do betão. Este aparenta ser o efeito predominante, sendo a inclusão de 20% de CV capaz de reduzir substancialmente a quantidade de cloretos livres no betão.

4.3. Resistividade eléctrica

Os resultados determinados e apresentados na Figura 5 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.

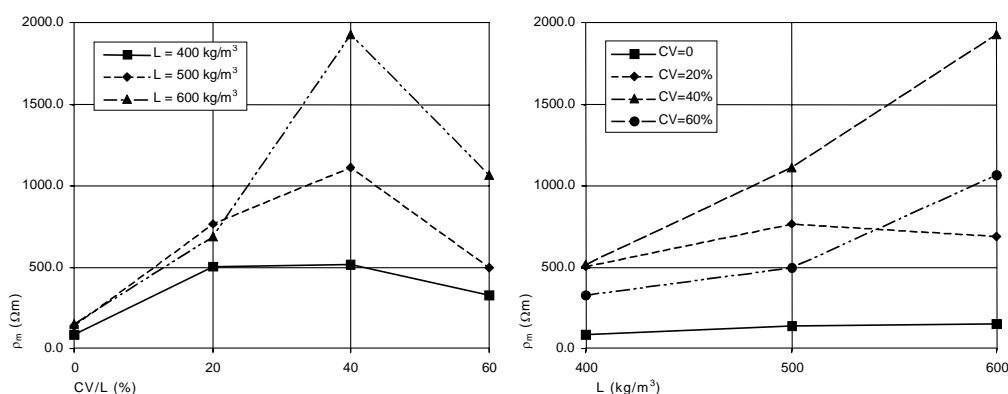


Figura 5: Resistividade eléctrica

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 resistividade dos betões com CV = 60%, atingiu valores inferiores aos obtidos com CV = 40%, mas sempre superiores ao das composições de controlo o que revela 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

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que a substituição de elevadas quantidades de cimento por CV consideradas de qualidade reduzida (até 60%) não prejudica a durabilidade dos betões desde que seja assegurada uma cura e conservação adequadas. Pelo contrário, todos os parâmetros de durabilidade aferidos indicam que a presença das CV nas misturas é benéfica e resulta num betão mais durável. Este efeito é mais relevante relativamente à penetração de cloretos, o que indicia que a inclusão de CV em betões localizados em ambientes sujeitos a este tipo de agressividade seja 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. Assim, o critério de conformidade adoptado pela generalidade das especificações normativas, que impõem a rejeição de CV tendo em conta o seu teor de inqueimados aparenta ser inadequado e antieconómico.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Camões, A. *et al.*, “Low cost high performance concrete using low quality fly ash”, *ERMCO98, 12th European Ready Mixed Concrete Congress*, Lisboa, 1998, p.478-486;
- [2] Rocha, P., “Betões de elevado desempenho com recurso a materiais e processos correntes”, Tese de Mestrado, UM, 1999;
- [3] Camões, A. *et al.*, “Comportamento à tracção em flexão de betões de desempenho melhorado”, *Encontro Nacional Betão Estrutural 2000*, Porto, 2000, p.151-160;
- [4] Camões, A. *et al.*, “Módulo de elasticidade de betões de elevado desempenho com cinzas volantes”, *Análise Experimental de Tensões e Mecânica Experimental*, 4º Encontro Nacional, Bragança, 2001;
- [5] Luping, T., *Chloride Transport in Concrete – Measurement and Prediction*, Tese de Doutoramento, Chalmers University of Technology, Gotemburgo, Suécia, 1996;
- [6] 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.