

## **Durabilidade e resistência a longo prazo de betões fabricados com cinzas de fundo de centrais termoeléctricas a carvão**



**Isabel M. Martins<sup>1</sup>**



**Arlindo  
Gonçalves<sup>2</sup>**

### **RESUMO**

Em 2005 foram produzidos na Europa cerca de 65 milhões de toneladas de produtos de combustão de carvão, dos quais aproximadamente 6 milhões de toneladas correspondem a cinzas de fundo. A utilização destas cinzas de fundo no sector da construção situa-se nos 45%, sendo que a aplicação como adição para betão é muito reduzida.

Neste estudo, caracterizam-se as cinzas de fundo de uma central termoeléctrica a carvão do nosso país, tendo como referência a norma NP 4220-Pozolanas para betão, e avalia-se a sua influência nas propriedades do betão fresco e endurecido. Efectuaram-se determinações da consistência, resistência à compressão, porosidade, resistência à penetração de cloretos, resistência à carbonatação acelerada, absorção capilar e permeabilidade ao oxigénio, comparando os resultados com os de betões produzidos com cinzas volantes da mesma central termoeléctrica.

A utilização deste resíduo na fabrico de betões considera-se bastante promissora, por as cinzas de fundo apresentarem desempenho semelhante ao das cinzas volantes, apesar de ser necessário controlar a perda de trabalhabilidade que em geral se observa com aquelas cinzas.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Durabilidade, betão, cinzas de fundo, cinzas volantes

<sup>1</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Materiais, Núcleo de Betões, 1700-066 Lisboa, Portugal. [imartins@lnec.pt](mailto:imartins@lnec.pt)

<sup>2</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Materiais, Núcleo de Betões, 1700-066 Lisboa, Portugal. [arlindo@lnec.pt](mailto:arlindo@lnec.pt)

## **1. INTRODUÇÃO**

Na combustão do carvão em centrais termoeléctricas produzem-se diversos resíduos sólidos entre os quais se contam as cinzas volantes e as cinzas de fundo. As cinzas volantes são constituídas por partículas arrastadas com os gases de combustão e recolhidas principalmente em filtros por precipitação electrostática. As cinzas de fundo são formadas por partículas que se depositam nas paredes da caldeira ou que caem e se acumulam no seu fundo.

De acordo com os dados da Associação Europeia para a Utilização de Produtos de Combustão do Carvão, ECOBA, na Europa dos 15 a produção total de produtos de combustão do carvão foi de 65 milhões de toneladas, em 2005, sendo 66,9% cinzas volantes e 9,6% cinzas de fundo [1]. Esta fileira de resíduos constitui actualmente cerca de 3,5% do total de resíduos produzidos na Europa.

A utilização dos produtos de combustão do carvão nos diversos países da União Europeia é muito variável. No que respeita às cinzas volantes as suas principais aplicações são no fabrico de betão e de cimento e na construção de pavimentos, enquanto que as cinzas de fundo são sobretudo utilizadas em blocos para betão e na construção de pavimentos.

Cherif analisou as propriedades pozolânicas de cinzas de fundo tendo verificado que o índice de actividade, determinado de acordo com a norma europeia EN 450, permitia a utilização destas cinzas em betão e que ocorria um aumento considerável deste índice com um tempo de moagem de 6 horas [2].

Jaturapitakkul avaliou a substituição de cimento por cinzas de fundo, em argamassas e betões e comprovou a importância da moagem nas propriedades do produto final: argamassas contendo 20 % a 30% de cinzas de fundo apresentavam menores resistências à compressão que uma argamassa de cimento em todas as idades, mas, pelo contrário, quando se utilizavam cinzas de fundo moídas havia uma melhoria da resistência à compressão a partir dos 60 dias. Em betão, a substituição de 20% do cimento por cinzas de fundo moídas resultou no aumento da resistência à compressão, especialmente em betões com maior dosagem de ligante, verificando-se que para dosagens de cimento de 260 e 440 kg/m<sup>3</sup> foram atingidas resistências à compressão mais elevadas, relativamente a um betão sem cinzas, ao fim de 60 e 14 dias, respectivamente, demonstrando assim que as cinzas de fundo moídas podem ser utilizadas como um material pozolânico [3].

Nesta comunicação apresentam-se os resultados de um estudo visando a utilização de cinzas de fundo no fabrico de betões, como adição tipo II. Para o efeito procedeu-se à sua caracterização físico-química, conforme previsto na norma portuguesa relativa à utilização de pozolanas em betão, NP 4220 [4], e à avaliação do desempenho relativo de betões fabricados com estas cinzas e com cinzas volantes, de uma mesma central térmica a carvão

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

As cinzas de fundo, CF, foram avaliadas em termos da sua conformidade com a norma portuguesa NP 4220, sendo a sua finura caracterizada através do resíduo no peneiro 45 µm e da superfície específica Blaine e a composição química determinada por fluorescência de raios X. Foram realizados ensaios de lixiviação, de acordo com a norma europeia EN 12457-4 [5], tendo sido analisados nos lixiviados os teores de: cádmio, chumbo, cobre, crómio, níquel e zinco, e comparados com os limites indicados na Decisão do Conselho Europeu 2003/33/CE [6] para a deposição de resíduos em aterro. As cinzas volantes, CV, foram igualmente caracterizadas seguindo a mesma metodologia.

Foram estudados betões com 300, 350 e 400 kg/m<sup>3</sup> de ligante, constituído por cimento CEM II/A-L 42,5 R e cinzas volantes ou de fundo. A trabalhabilidade dos betões dentro de cada grupo, isto é, igual dosagem de ligante, foi mantida constante. A proporção de cinzas no ligante foi de 25 % e de 33 %,

tendo no caso das cinzas de fundo sido consideradas duas situações: uma em que a razão água/ligante, A/L, foi mantida igual à das cinzas volantes, variando a dosagem de adjuvante; outra em que a trabalhabilidade foi mantida através do aumento da razão A/L. No fabrico dos betões utilizaram-se agregados grossos calcários e areia natural siliciosa.

Os ensaios sobre betão, às idades indicadas, foram realizados de acordo com os seguintes documentos:

- Resistência à compressão (cubos de 150 mm), 7d, 28d, 180d e 365d – NP EN 12380-3 [7]
- Carbonatação acelerada (carotes extraídas de cubos de 150 mm), 28d – Especificação LNEC E 391:1993 [8]
- Difusão de cloretos (cilindros de 100 mm x 200 mm), 35d e 365d – Especificação LNEC E 463:2004 (Equivalente à norma NT Build 492:1999) [9]
- Permeabilidade ao oxigénio (cilindros de 150 mm x 300 mm), 28d – Especificação LNEC E 392: 1993 [10]
- Absorção capilar (cilindros de 150 mm x 300 mm), 28d – Especificação LNEC E 394: 1993 [11]
- Porosidade (cilindros de 150 mm x 300 mm), 28d – Especificação LNEC E 393: 1993 [12]

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização das cinzas

No Quadro 1 são apresentados os resultados relativos à caracterização da finura das cinzas: resíduo no peneiro 45  $\mu$ m e superfície específica Blaine.

Quadro 1 – Finura das cinzas

<i>Ensaio</i>	<i>Cinza de fundo</i>	<i>Cinza volante</i>
Resíduo no peneiro 45 $\mu$ m (%)	4,0	17,3
Superfície específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3480	3500

Os resultados correspondentes à conformidade das cinzas com a norma portuguesa NP 4220 e à análise química por fluorescência de raios X são apresentados nos Quadros 2 e 3.

Quadro 2 – Exigências da NP 4220

<i>Propriedade</i>	<i>Cinza de fundo</i>	<i>Cinza volante</i>	<i>Valor especificado</i>
Perda ao fogo (%) [950 $\pm$ 25°]	3,05	4,84	$\leq$ 12,0
Cloretos (%)	0,00	0,00	$\leq$ 0,10
Trióxido de enxofre (%)	0,65	0,75	$\leq$ 3,0
Total de óxidos de silício, alumínio e ferro	85,4	86,2	$\geq$ 70,0
Óxido de magnésio (%)	2,17	1,19	$\leq$ 3,0
Finura (%)	4,0	17,3	$\leq$ 40,0
Massa volúmica (g/cm <sup>3</sup> )	2,62	2,34	$\leq$ Valor declarado + 0,15
Índice de actividade 28d, 38°C (%)	109,0	–	$\geq$ 85,0
Índice de actividade 28d, 20°C (%)	84,4	83,5	$\geq$ 75,0

As cinzas de fundo, à semelhança do que sucede com as cinzas volantes, satisfazem as exigências da NP EN 4220 e cumprem também o requisito relativo ao índice de actividade a 28d e 20°C exigido na NP EN 450-1 [13].

Quadro 3 – Análise química

<i>Ensaio</i>	<i>Cinza de fundo</i>	<i>Cinza volante</i>
% P.F. a 600° C	2,94	4,44
% P.F. a 975° C	3,05	4,84
% SiO <sub>2</sub>	52,02	54,24
% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,23	27,50
% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,11	4,46
% K <sub>2</sub> O	1,14	1,01
% Na <sub>2</sub> O	0,49	0,41
% CaO	6,00	3,57
% MgO	2,17	1,19
% SO <sub>3</sub>	0,65	0,75
% CaO react.	5,81	3,06
% TiO <sub>2</sub>	1,23	1,39
% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,71	0,92
% CaO livre	6,0	0,00
% Cl <sup>-</sup>	0,00	0,00
% SiO <sub>2</sub> react.	34,37	36,23
% R.I. (KOH)	28,50	25,92

No que respeita à composição química, a sílica e a alumina constituem 75% das cinzas de fundo e cerca de 82% das cinzas volantes. Os teores de óxido de ferro, de óxido de cálcio e de óxido de magnésio nas cinzas de fundo são praticamente o dobro do das cinzas volantes.

Os teores de: cádmio, chumbo, cobre, crómio, níquel e zinco nos lixiviados das cinzas bem como os limites indicados na Decisão do Conselho Europeu 2003/33/CE para a deposição de resíduos em aterro são apresentados no Quadro 4. Apesar das diferenças nos teores de alguns metais pesados nos lixiviados, ambas as cinzas cumprem os requisitos da Decisão do Conselho para resíduos para deposição em aterros de inertes

Quadro 4 – Teores de metais pesados no lixiviado e valores-limite para a deposição de resíduos em aterros para resíduos inertes

<i>Parâmetros</i>	<i>Cinza de fundo</i>	<i>Cinza volante</i>	<i>Decisão do Conselho 2003/33/CE</i>
Cádmio, Cd (mg/kg)	< 0,62x10 <sup>-3</sup>	< 0,62x10 <sup>-3</sup>	0,04
Chumbo, Pb (mg/kg)	< 4,10x10 <sup>-3</sup>	< 4,10x10 <sup>-3</sup>	0,5
Cobre, Cu (mg/kg)	1,97x10 <sup>-3</sup>	1,21x10 <sup>-3</sup>	2
Crómio, Cr (mg/kg)	24,7x10 <sup>-3</sup>	122,4x10 <sup>-3</sup>	0,5
Níquel, Ni (mg/kg)	29,7x10 <sup>-3</sup>	< 22,4x10 <sup>-3</sup>	0,4
Zinco, Zn (mg/kg)	48,0x10 <sup>-3</sup>	71,9x10 <sup>-3</sup>	4

### 3.2 Ensaaios sobre betão

A informação relativa ao abaixamento, à razão água/ligante e à resistência à compressão, aos 7, 28, 180 e 365 dias para as diferentes composições de betão é apresentada no Quadro 5. Conforme se pode observar, as cinzas de fundo conduzem a betões com menor abaixamento, sendo necessário actuar sobre o adjuvante ou sobre a água de amassadura para se obter uma consistência semelhante à obtida com as cinzas volantes, em particular em betões com menor dosagem de ligante. Neste caso, foi necessário aumentar a razão A/L no máximo em 0,017.

De referir que nas composições se usaram as mesmas quantidades em massa de cinzas de fundo e de cinzas volantes, o que, devido à maior massa volúmica das primeiras, se traduziu neste caso num ligeiro aumento da dosagem de cimento por metro cúbico de betão e numa pequena redução da proporção volumétrica de cinzas.

Quadro 5 – Resistência à compressão

Cinza	Dosagem de ligante	Razão A/L	Abaixamento (mm)	Resistência à compressão (MPa)			
				7 dias	28 dias	180 dias	365 dias
CV	D300 (25%)	0.550	150	29.3	38.8	50.0	53.7
	D300 (33%)	0.550	150	25.5	35.2	49.2	54.7
	D350 (25%)	0.434	160	40.0	50.7	67.9	72.8
	D350 (33%)	0.431	170	36.9	48.9	66.5	69.9
	D400 (25%)	0.375	230	47.7	57.5	78.4	82.9
	D400 (33%)	0.373	240	45.6	59.0	77.2	85.8
CF (A/L)	D300 (25%)	0.550	140	30.8	39.8	51.7	55.2
	D300 (33%)	0.550	150	26.4	36.3	48.1	52.5
	D350 (25%)	0.434	170	41.9	50.8	66.0	67.8
	D350 (33%)	0.431	160	37.8	49.7	63.6	68.7
	D400 (25%)	0.375	230	48.8	57.8	75.2	83.7
	D400 (33%)	0.373	240	45.7	57.5	74.6	81.6
CF (Adj)	D300 (25%)	0.566	150	26.7	35.5	44.9	49.6
	D300 (33%)	0.567	140	23.9	32.1	43.3	47.9
	D350 (25%)	0.441	160	40.2	50.3	63.5	68.9
	D350 (33%)	0.443	170	34.7	45.3	60.1	64.6
	D400 (25%)	0.383	230	47.3	54.7	73.1	77.7
	D400 (33%)	0.383	230	42.1	55.6	72.4	75.3

Na Figura 1 resumem-se os resultados da resistência à compressão, efectuando a média das diferentes dosagens de ligante e das duas percentagens de cinzas, no sentido de comparar o desempenho das cinzas de fundo, relativamente às cinzas volantes, em diferentes idades. Como se pode constatar, a diferença nas tensões de rotura das duas cinzas é praticamente nula, quando se mantém a razão A/L, embora se possa notar uma tendência para, a médio/longo prazo, as cinzas volantes exibirem tensões de rotura ligeiramente superiores, eventualmente devido ao menor volume de cinzas de fundo nos betões.

No Quadro 6 apresentam-se os resultados médios para a resistência à carbonatação acelerada, coeficiente de difusão dos cloretos, coeficiente de permeabilidade ao oxigénio, absorção capilar e porosidade, tratando em conjunto as duas percentagens de substituição de cinzas, 25% e 33%, e, no caso das cinzas de fundo, as duas situações: igual razão água/ligante ou igual dosagem de adjuvante.

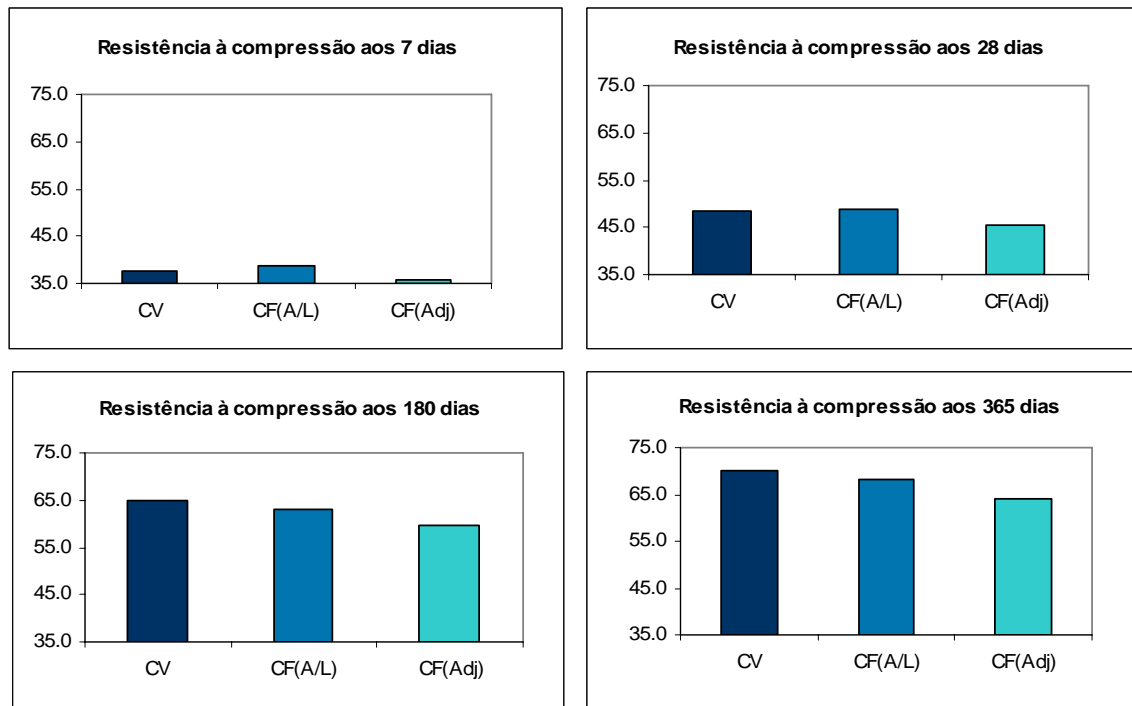


Figura 1. Resistência à compressão

Quadro 6 – Propriedades relacionadas com a durabilidade.

Cinza	Propriedade	Dosagem de ligante		
		D 300	D 350	D400
CV	R. compressão 28 d (MPa)	37	50	58
	R. carbonatação acelerada $R_{c65}$ (kg.ano/m <sup>5</sup> )	39	92	175
	Coefficiente migração Cl <sup>-</sup> 35d ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	16,0	10,5	10,4
	Coefficiente migração Cl <sup>-</sup> 365d ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	2,9	1,8	1,1
	Coefficiente de permeabilidade O <sub>2</sub> , K (m <sup>2</sup> )	6,5E-17	2,1E-17	2,3E-17
	Coefficiente de capilaridade (kg m <sup>-2</sup> h <sup>-0.5</sup> )	1,08	1,09	1,05
	Porosidade (%)	13	12	9
CF	R. compressão 28 d (MPa)	36	49	56
	R. carbonatação acelerada $R_{c65}$ (kg.ano/m <sup>5</sup> )	38	84	171
	Coefficiente migração Cl <sup>-</sup> 35d ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	17,3	12,3	9,8
	Coefficiente migração Cl <sup>-</sup> 365d ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	2,8	2,6	1,3
	Coefficiente de permeabilidade O <sub>2</sub> , K (m <sup>2</sup> )	4,5E-17	2,0E-17	1,5E-17
	Coefficiente de capilaridade (kg m <sup>-2</sup> h <sup>-0.5</sup> )	1,02	1,00	1,00
	Porosidade (%)	13	11	9

Na Figura 2 comparam-se os resultados médios do coeficiente de difusão dos cloretos e da resistência à carbonatação acelerada das duas cinzas. Como se pode observar as cinzas volantes e de fundo têm igual desempenho, quando se mantém a razão A/L.

Em relação aos resultados médios da permeabilidade ao oxigénio, os resultados obtidos seguem a mesma tendência das propriedades anteriores (Fig. 3), considerando-se que o melhor desempenho das cinzas de fundo não é significativo, embora a maior finura destas possa ter contribuído para o menor valor do coeficiente de permeabilidade.

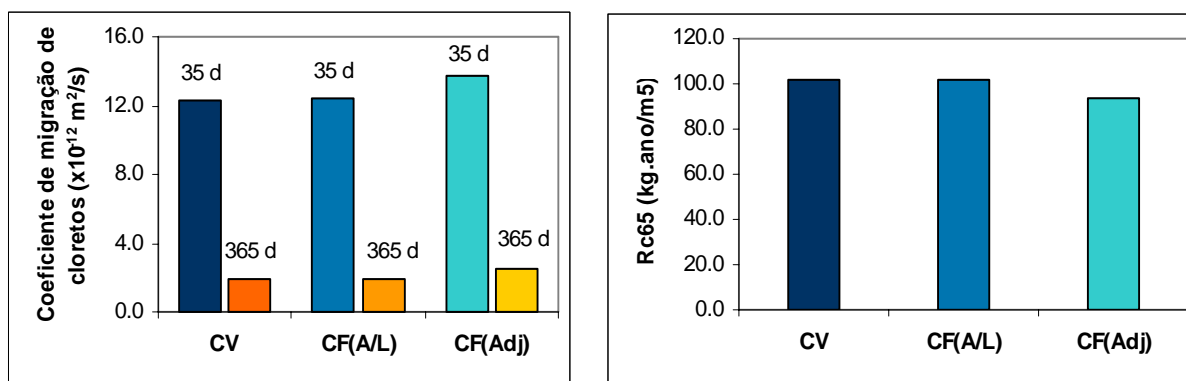


Figura 2. Difusão de cloretos e resistência à carbonatação acelerada

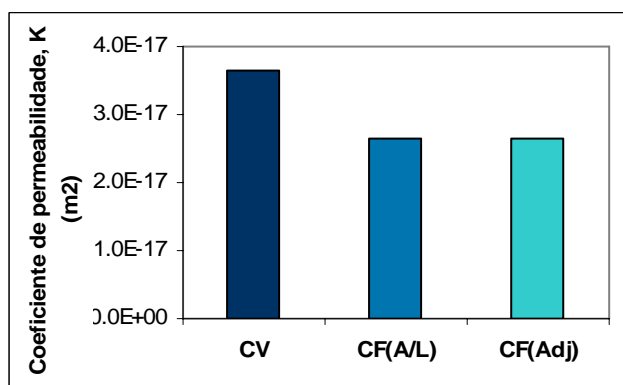


Figura 3. Permeabilidade ao oxigénio

Finalmente, no que se refere aos valores médios da absorção capilar e da porosidade (Fig. 4), verifica-se que as cinzas de fundo apresentam valores ligeiramente inferiores, em particular para a mesma razão A/L, mas dentro da mesma ordem de grandeza.

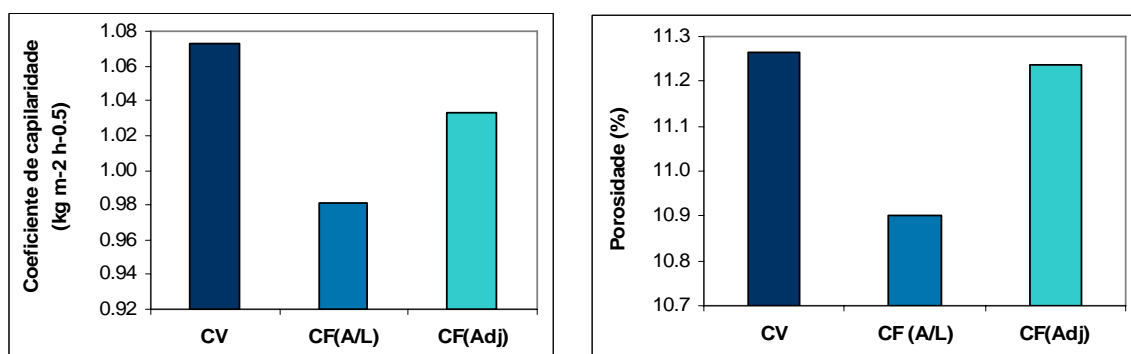


Figura 4. Absorção capilar e porosidade

De referir ainda que o melhor comportamento dos betões com cinzas de fundo em relação à permeabilidade ao oxigénio, absorção de água e porosidade pode ser devido ao facto da dosagem de cimento destes betões ter sido ligeiramente superior e as cinzas serem mais finas.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostraram que as cinzas de fundo satisfazem as exigências da NP 4220, pelo que poderão ser usadas no fabrico de betões, nas condições previstas na Especificação LNEC E464.

Por outro lado, os ensaios de lixiviação mostraram que as percentagens de metais libertados conduzem à classificação deste resíduos como passíveis de deposição em aterro para resíduos inertes.

Os ensaios em betão revelaram que as cinzas de fundo reduzem a trabalhabilidade, pelo que se torna necessário actuar ao nível dos adjuvantes, para garantir o mesmo abaixamento do cone de Abrams e manter a razão A/L, em particular para dosagens de ligante mais baixas.

Se a razão A/L se mantiver, os betões fabricados com as cinzas de fundo apresentam desempenho semelhante ao daqueles em que se usaram cinzas volantes, tanto do ponto de vista da resistência à compressão, como da resistência às acções ambientais.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradece-se às empresas Cimpor e Betão Liz S. A. a colaboração na moagem e caracterização das cinzas de fundo, na formulação e fabrico dos betões e na moldagem dos provetes para ensaio.

## **REFERÊNCIAS**

[1] ECOBA - Production and utilisation of CCPs in 2005 in Europe (EU 15). [Online]. [Consult. 6 July 2007]. Available on the WWW. <URL: <http://www.ecoba.com/ecobaccpprod.html>>

[2] CHERIAF, M. [et al.] – Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash. Cement and Concrete Research. ISSN: 0008-8846. 29:9

[3] JATURAPITAKKUL, C.; CHEERAROT, R. - Development of bottom ash as pozzolanic material. Journal of Materials in Civil Engineering. ISSN: 0899-1561. 15:1

[4] NP4220. 1993, Pozolanas para betão. Definições, especificações e verificação da conformidade. IPQ

[5] EN 12457-4. 2002, Characterization of waste – Leaching – Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges

[6] Jornal Oficial da Comunidade Europeia – Decisão do Conselho 2003/33/CE de 19 de Dezembro de 2002 que estabelece os critérios e processos de admissão de resíduos em aterros nos termos do artigo 16º e do anexo II da Directiva 1999/31/CE

[7] NP EN 12390-3.2003, Ensaios do betão endurecido. Resistência à compressão dos provetes de ensaio.

[8] Especificação LNEC E391. 1993, Betões. Determinação da resistência à carbonatação

[9] Especificação LNEC E463. 2004, Betões. Determinação do coeficiente de difusão de cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário

[10] Especificação LNEC E392. 1993, Betões. Determinação da permeabilidade ao oxigénio

[11] Especificação LNEC E394. 1993, Betões. Determinação da absorção de água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica

[12] Especificação LNEC E393. 1993, Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade



[13] NP EN 450-1. 2006, Cinzas volantes para betão - Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade. IPQ