

Resíduo Termoeléctrico em betão – Uma contribuição para sustentabilidade na construção



M. L. Garcia¹²



J. Sousa Coutinho²

RESUMO

Perante a crise energética actual são cada vez mais importantes as fontes de energia renováveis tais como a biomassa florestal. A implementação de centrais de produção de energia alimentadas por resíduos florestais encontram-se em franco crescimento, perspectivando-se para Portugal a construção de mais 15 novas centrais até 2010. A laboração de uma Central deste tipo produz resíduos constituídos essencialmente por cinzas de fundo resultantes da incineração da biomassa florestal, resíduos que presentemente não tem aplicação. Tendo sido implementado um vasto programa experimental com o objectivo global de estudar a aplicabilidade das cinzas de fundo de biomassa florestal em betão estrutural, apresenta-se neste trabalho uma fase desse programa correspondente à utilização deste resíduo como substituto parcial do cimento Portland em argamassas.

O estudo foi realizado em argamassas com 0% (controle), 10% e 20% de substituição do cimento Portland, em massa, por cinzas de fundo de biomassa (WA). Os ensaios realizados envolveram a caracterização das WA, a determinação da resistência mecânica, determinação do índice de actividade pozolânica, determinação do coeficiente de difusão de cloretos, resistência à carbonatação acelerada, determinação da resistividade e determinação da absorção capilaridade. Os resultados desta fase indicaram que é provável que este resíduo possa substituir parcialmente o cimento em percentagens baixas se a moagem for mais eficaz, encontrando-se já em curso uma nova fase de investigação com material mais fino.

PALAVRAS-CHAVE

Resíduos, cinzas de fundo de biomassa, argamassa, durabilidade.

¹ ISEP, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Departamento de Engenharia Civil, 4200-072 Porto, Portugal, mlg@isep.ipp.pt

² LABEST/ FEUP, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia do Porto, Departamento de Engenharia Civil, 4200-465 Porto, Portugal, jcouti@fe.up.pt

1. INTRODUÇÃO

O betão desempenha um papel fundamental na construção dependendo dos requisitos em termos de desempenho técnico, económico, durabilidade e sustentabilidade. Se os materiais produzidos e utilizados, e as estruturas concebidas e construídas apresentarem vantagens económicas e ambientais e desempenho satisfatório ao longo da vida útil prevista, então contribuem para o desenvolvimento sustentável [1,2].

As anomalias prematuras das estruturas de betão são devidas a elevada permeabilidade do betão, protecção insuficiente das armaduras e subestimação da agressividade do meio envolvente [3]. Esta durabilidade insuficiente pode ser mitigada por utilização de adições pozolánicas, que tornem o betão menos permeável.

Por cada tonelada de clínquer Portland produzida pela indústria cimenteira, para além do grande consumo de energia inerente, gera-se aproximadamente a mesma quantidade de gases com efeito estufa (GEE), principalmente o dióxido de carbono [4]. A produção actual de cimento no mundo é de aproximadamente dois mil milhões de toneladas/ano [5], prevendo-se um crescimento de até cerca 3,5 mil milhões de toneladas/ano em 2015 [6]. A indústria do cimento contribui com 6% de emissões de CO₂, a nível mundial, tornando assim este sector responsável por estratégias de mitigação de emissões de CO₂, daí a pressão para se aumentar a utilização de adições no cimento e betão [5,7]. De facto, a experiência em todo o mundo, tanto historicamente como durante as últimas décadas, têm demonstrado que o sistema cimento Portland/adições pozolánicas apresentará um comportamento superior ao sistema cimento Portland no que se refere à microestrutura e durabilidade. Isto implica que existem argumentos e provas científicas de peso, do ponto de vista técnico e económico, para se aumentar o grau de finura de subprodutos industriais adequados em vez da finura do cimento Portland e deste modo assegurar que se alcance durabilidade em detrimento de resistência mecânica em betão estrutural [8].

O betão deve continuar a evoluir, para satisfazer a sua crescente procura. A reutilização de resíduos e subprodutos industriais, em betão é necessário para se poder produzir betão “ecológico” [8]. A reciclagem de subprodutos industriais adequados transformando-os em adições para betão é um método “amigo do ambiente” pois são aproveitadas grandes quantidades de materiais que de outra forma poluiriam a terra, água, e a atmosfera [6]. O uso de cinzas volantes, cinzas de casca de arroz, cinzas de madeira, escórias de alto-forno, sílica de fumo e de outros materiais semelhantes com características pozolánicas, reduz a utilização de clínquer e simultaneamente conduz a betão mais durável [5]. Consequentemente este betão “ecológico” melhora a qualidade do ar, minimiza a quantidade de resíduos sólidos e contribui para a sustentabilidade das indústrias do cimento e betão [9].

A biomassa de madeira é constituída por matéria orgânica vegetal, correspondendo a um recurso reciclável muito heterogéneo e quimicamente complexo [12]. As cinzas de biomassa de madeira são os resíduos gerados nas caldeiras de combustão, a partir da queima da casca e nós de madeira, aparas das fábricas de celulose e da serração de madeira, restos de madeira da construção civil, demolição e resíduos florestais [7]. As cinzas de biomassa de madeira são constituídas por cinzas fundo e cinzas volantes [13].

Em Portugal a utilização dos resíduos de biomassa de madeira, concretamente de biomassa florestal, para a produção de energia eléctrica e térmica reflecte-se de forma positiva em aspectos económicos, sociais, regionais e ambientais, pelo facto de contribuir para a criação de emprego, permitir a melhoria de qualidade de vida das populações rurais e contribuir para o desenvolvimento das regiões do interior do país mais desfavorecidas. Gera-se por ano, cerca de 6 milhões de toneladas de resíduos, cuja recolha permitiria reduzir significativamente o risco de incêndios, e produzir o equivalente a 3,5 TWh de electricidade. Este tipo de electricidade renovável, representou cerca de 8% do consumo de electricidade em 2005. Contrariamente às centrais eólicas e solares, as centrais termo-eléctricas de biomassa proporcionam uma capacidade firme e previsível para satisfazer os consumos, o que reforça o seu valor estratégico numa expansão equilibrada de produção de electricidade renovável [14].

O governo Português pretende instalar 15 novas centrais termoeléctricas localizadas em regiões do país com elevado risco de incêndio e abundância de resíduos florestais e com um total de potência instalada de 100 MW. O governo pretende, com esta iniciativa alcançar os objectivos seguintes: garantir, até 2010 uma potência de 150 MW até ao ano 2010 atribuída a centrais de biomassa, num contributo para o compromisso europeu; garantir 22,1% do consumo nacional de electricidade com origem em fontes renováveis de energia; diminuir as emissões de gases com efeitos de estufa e diminuir os riscos de incêndio, no sentido de que, anualmente, a área de fogos florestais seja inferior a 50 mil hectares [15].

Assim, foi implementado um programa de investigação para apurar aplicações das cinzas de fundo de biomassa florestal em materiais cimentícios de construção civil. O primeiro estudo destas cinzas da central Termoeléctrica de Mortágua foi realizado para verificar a viabilidade da aplicação deste recurso reciclável como agregado leve em betão estrutural, tendo-se concluído que as propriedades das cinzas de fundo de biomassa florestal não satisfaziam os requisitos necessários. Um segundo estudo destinado a estudar a sua viabilidade como substituto parcial do cimento está actualmente em curso, sendo apresentados os primeiros resultados no presente trabalho. Na realidade, utilizar este resíduo como substituto parcial do cimento portland será um contributo para a sustentabilidade na construção.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

As cinzas de fundo de biomassa florestal utilizadas no presente trabalho foram obtidas na Central Termoeléctrica de Mortágua, onde resíduos florestais recolhidos são queimados na caldeira de biomassa com o fim de produzir energia eléctrica debitada na rede pública (EDP-Energias de Portugal, S.A.). A combustão dos resíduos produz dois tipos de materiais – cinzas volantes e cinzas de fundo de biomassa florestal por vezes designadas por escórias. As cinzas de fundo de biomassa florestal foram previamente preparadas por crivagem num peneiro de 4 mm e as partículas de dimensão inferiores a 4mm foram então moídas num moinho de rolos. Os ensaios realizados com as cinzas de fundo de biomassa florestal moídas, (WA), consistiram na determinação da análise granulométrica, análises químicas por difração de raios X e microscopia eletrónica de varrimento. Foi também avaliado o desempenho de argamassas confeccionadas com substituição parcial de cimento Portland (0%, 10% e 20%) por WA, através dos seguintes ensaios: resistência à flexão e à compressão, índice de actividade pozzolânica, determinação da do coeficiente de difusão de cloretos, determinação da carbonatação acelerada, determinação da resistividade e da absorção de água por capilaridade.

2.1 Cinzas de fundo, WA

Após a preparação descrita anteriormente, incluindo peneiração e moagem das partículas inferiores a 4mm, procedeu-se a análise granulométrica das WA, por via seca segundo os procedimentos descritos na norma na EN 933-1 [16]. Quase no final da investigação presente, foi possível obter a granulometria laser (Fig. 1) num granulómetro por difração a laser (Mastersizer 2000, Malvern), confirmando a insuficiente moagem comparada com a granulometria do cimento do tipo CEMI 42,5 R utilizado (Fig. 2).

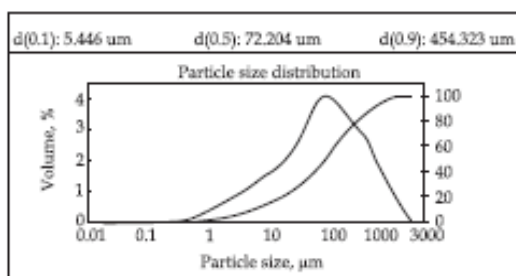


Figura 1. Granulometria laser do WA

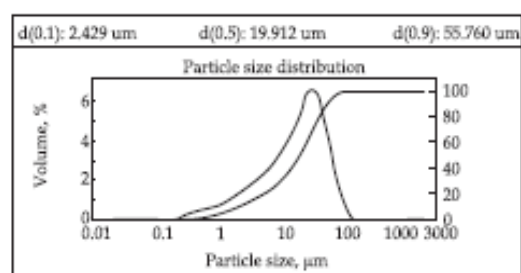


Figura 2. Granulometria laser do CEMI 42,5 R

2.2 SEM, XRD e análise química das cinzas de fundo

Foi efectuada uma análise de WA por microscopia eletrónica de varrimento (SEM) JSM-6301 F (Jeol) (Fig. 3). Os espectros obtidos mostram que as cinzas de fundo são constituídas principalmente por Si e alguns Al, Mg, Ca e Na, confirmando os resultados das análises químicas inicialmente disponibilizados pela Central Termoelétrica de Mortágua (Humidade - 29%, a perda ao fogo a 850 °C - 4,7%, Si - 359 g / kg, Ca - 53g/kg, Al - 38g/kg, K - 27g/kg, Fe - 21g / kg, Mg - 10g/kg, Mn - 2g/kg e outros componentes menores). Ensaios de Fluorescência de Raios-X (XRF) permitiram obter valores em termos de óxidos apresentados no Quadro 1, mais tarde, confirmados por análises químicas segundo os procedimentos da EN 196-2 [17], também apresentados no Quadro 1. Estes dados demonstram pozolanicidade potencial das cinzas de fundo no entanto ensaios de Difracção de raios-X (XRD) não detectaram a presença de sílica amorfa (Fig.4), comprometendo a reactividade potencial do material. Os minerais identificados por XRD foram quartzo (SiO_2), microclina (KAlSi_3O_8), safirina ($\text{Al}_3, 80\text{Mg}_{3,15}\text{Fe}_{1,05}(\text{Si}_{1,75}\text{Al}_{4,25}\text{O}_{20})$) e anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), o que está de acordo com os resultados das análises químicas.

Quadro 2. Análise química das cinzas de fundo (WA)

	EN 196-2	XRF
Perda o fogo (%)	3.59±0.42	4,4
Resíduo Insolúvel (%)	66.2±3.8	
SO ₃ (%)	<0.1	
Cl (%)	0.013±0.003	
SiO ₂ (%)	69.5±4.0	70,5
Al ₂ O ₃ (%)	4.18±0.52	8,3
Fe ₂ O ₃ (%)	1.99±0.24	3,6
CaO (%)	5.88±0.68	7,3
MgO (%)	1.24±0.14	1,3
K ₂ O (%)		3,2
NaO ₂ (%)		0,4
MnO (%)		0,1
TiO ₂ (%)		0,4

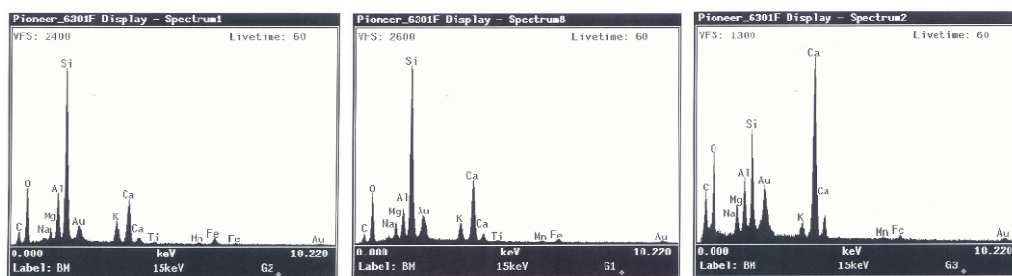


Figura 3. Espectros de análise química qualitativa por Microscópio Electrónico de Varrimento.

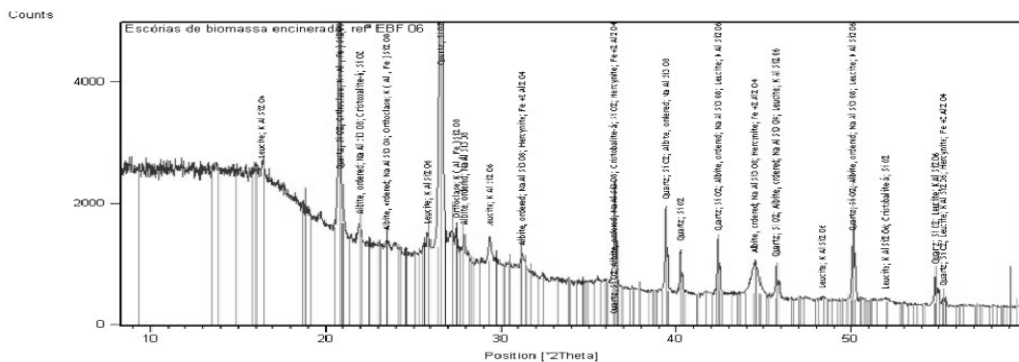


Figura 4. Difraccção de Raios-X das cinzas de fundo (WA).

2.3 Produção de argamassas

Confeccionaram-se três tipos de argamassas com composições equivalentes, Uma de controle (CTL), com 100% de cimento Portland, a segunda argamassa com 10% do cimento substituído por cinzas de fundo (WA10), e a terceira argamassa em que 20% do cimento foi substituído por cinzas de fundo (WA20). O traço em peso das três argamassas foi 1:3:0.5, a areia utilizada foi areia normalizada CEN embalada em sacos selados de 1350 gr. A trabalhabilidade foi medida através do ensaio descrito na ASTM C 109/90 [19]. Como se obteve trabalhabilidade equivalente nas três argamassas (191±1mm para CTL e WA10; 192±1mm para WA20) não foi necessário usar superplastificante. Para cada tipo de argamassa foram confeccionados provetes prismáticos normalizados (40 × 40 × 160 mm) e cilíndricos de 100 mm diâmetro e 50 mm de altura de acordo com os ensaios a realizar, tendo-se seguido o procedimento descrito, na parte aplicável, a norma NP EN 196-1 [20].

Quadro 3. Resultados das Resistência mecânica e dos ensaios durabilidade da argamassa de controle e das argamassa com 10% e 20% de substituição de cimento Portland por cinzas de fundo (WA), assim como a melhoria (+) de cada propriedade obtida nos provetes de argamassa com substituição de cimento por 10% e 20% WA versus o valor da propriedade obtida nos provetes de argamassa com apenas cimento (CTL).

<i>Propriedade</i>	<i>CTL</i>	<i>WA10</i>	<i>WA20</i>	<i>Melhoria (+) de WA10 versus CTL</i>	<i>Melhoria (+) de WA20 versus CTL</i>
Densidade (kg/m ³)	2277 ± 43	2268 ± 9	2245 ± 16	0%	-1%
σ _f ^{28d} (MPa) (cura acelerada)	8,0 ± 0,3	7,5 ± 0,3	7,6 ± 0,3	-6%	-5%
σ _c ^{28d} (MPa) (cura acelerada)	45,5 ± 2,5	42,2 ± 1,0	36,7 ± 0,9	-7%	-19%
IA (%)	-	93	81	OK	KO
Dns (×10 ⁻¹² m ² /s)	12,2 ± 0,7	14,5 ± 1,3	18,2 ± 1,0	-19%	-49%
Resistividade (Ohm.m)	49,4 ± 2,0	43,5 ± 0,5	45,7 ± 1,1	-14%	-7%
Constante de absorção (mg/(mm ² ×min ^{0,5}))	0,103 ± 0.013	0,109 ± 0,013	0,074 ± 0,018	-6%	+28%
Carbonatação Profundidade média (mm)	4,3±0,6	8,0±1,0	12,5±0,0	-86%	-191%
X _{WA} – resultado da propriedade X para a argamassa com substituição de cimento por WA X _{CTL} – resultado da propriedade X para a argamassa de controle				Melhoria = $\frac{X_{BS} - X_{CTL}}{X_{CTL}}$	

2.4 Resistências mecânicas e Índice de actividade

As resistências mecânicas aos 28 dias foram determinadas segundo o procedimento da norma NP EN 196-1 [20], no entanto para se poder determinar o IA segundo a norma NP EN 4220:1993 [19,21] foi necessário acelerar a cura dos provetes de argamassa. A cura acelerada consistiu na imersão dos provetes em água a 38 ± 2 °C após 24 h da amassadura e até 24 h antes da realização do ensaio, isto é, em banho-maria durante 26 dias. Após 28 dias cada provete foi pesado para determinação da densidade e sujeito ao ensaio de resistência à flexão e compressão apresentando-se os resultados no Quadro 3.

O índice de actividade (IA) (Quadro 3) corresponde a uma comparação das resistências mecânicas de uma argamassa produzida com uma percentagem substituição de cimento por WA com resistências mecânicas de uma argamassa de cimento sem qualquer substituição, à mesma idade, neste caso aos 28 dias, com cura acelerada e produzida exactamente nas mesmas condições. O IA obtido foi de 93% para WA10 e 81% para WA20.

2.5 Absorção por Capilaridade

As características de transporte através da camada superficial do betão desempenham um papel fundamental na durabilidade do betão armado e são controladas por três mecanismos, absorção capilar, permeabilidade e difusão [22]. Em geral o betão é tanto mais durável quanto maior resistência oferecer à penetração de agentes agressivos (água, cloretos, oxigénio e dióxido de carbono) [22].

Para avaliar a absorção por capilaridade foi adoptada, na parte aplicável, o procedimento descrito na recomendação RILEM TC116 – PCD [23] mas em provetes cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura em vez dos provetes cúbicos recomendados. Depois de curados em água a 20 °C durante 63 dias (em vez de 28 dias), foram secos numa estufa a 40 °C até massa constante. Depois de arrefecerem até 20 °C, os provetes foram colocados em contacto com uma película de 5 mm de água. Realizaram-se então, pesagens sucessivas de cada provete até às 4 ½ horas. A absorção de água por capilaridade no betão é dependente da raiz quadrada do tempo e pode ser modelada pela seguinte equação [24]:

$$A = a_0 + S.t^{0.5} \quad (1)$$

em que A (mg/mm^2) é a absorção da água por unidade de área da secção em contacto com a água, S é o coeficiente de absorção por capilaridade ($\text{mg}/(\text{mm}^2 \times \text{min.}^{0.5})$), t é o tempo passado desde o instante inicial (minutos) e a_0 é a água inicialmente absorvida pelos poros superficiais (mg/mm^2). Após o traçado das curvas de absorção (A versus $t^{0.5}$) determinaram-se por regressão linear, os coeficientes de absorção capilar, S , tendo-se verificado uma correlação superior a 0,98.

2.6 Determinação da permeabilidade aos cloretos

A permeabilidade aos cloretos foi determinada através de um método de migração em estado não estacionário, desenvolvido por Luping e baseada numa relação teórica entre os fenómenos de difusão e migração. O coeficiente de difusão no estado não estacionário (D_{ns}) é calculado após um ensaio de migração [25,26] em que se determina a profundidade de penetração de cloretos (x_d) por titulação, com uma solução de nitrato de prata nas superfícies dos provetes abertos por compressão linear. A diferença de potencial utilizada no ensaio de migração foi de 20 V, durante 24 horas, tendo os provetes de argamassa sido previamente saturados. No ensaio de migração os iões cloretos são forçados a migrar de uma solução NaCl em contacto com uma das faces do provete e submetido a uma carga negativa, através da argamassa até à outra face onde se encontra uma solução NaOH carregada positivamente, Fig. 5 O cálculo do coeficiente de difusão aparente (D_{ns}) (equação 2) é determinado a

partir da profundidade de penetração de cloretos (x_d), apresentando-se os resultados aos 63 dias no Quadro 3.

$$D_{ns} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right) \quad (2)$$

Onde, D_{ns} é o coeficiente de difusão no estado não estacionário ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$), U é o valor absoluto da voltagem aplicada (V), T é o valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica ($^{\circ}\text{C}$); L é a espessura do provete (mm), x_d é o valor médio da profundidade de penetração (mm) e t é a duração do ensaio (horas).

27 Resistividade eléctrica

A resistividade é outro parâmetro que contribui para a caracterização da durabilidade do betão. Quando a rede porosa do betão se encontra totalmente saturada, a corrente eléctrica flui com maior ou menor facilidade de acordo com a natureza e conectividade dos poros. Como nos ensaios de permeabilidade aos cloretos os provetes se encontram em condições de saturação total, a partir do conhecimento do valor da intensidade de corrente, dos parâmetros geométricos e da diferença de potencial é possível determinar a resistividade cujos resultados se apresentam no Quadro 3, pela equação 3:

$$\rho = R \times \frac{A}{L} = \frac{V \times A}{L \times I} \quad (3)$$

Onde, ρ é a resistividade eléctrica ($\Omega \cdot \text{m}$), R é a resistência eléctrica, (Ω - Ohm), I é a corrente, (Amperes), V é a diferença de potencial, (Volts), L é o comprimento do provete (m) e A é a área transversal do provete atravessado pela corrente em (m^2).

2.8 Carbonatação acelerada

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado segundo os procedimentos descritos na especificação do LNEC E 391, na parte aplicável. Três provetes ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$) de cada tipo de argamassa após cura 3 meses em água na câmara húmida, foram transferidos para uma câmara de carbonatação mais dois meses, à temperatura de aproximadamente 20°C , humidade relativa de 65% e com uma concentração de CO_2 de 5%, Fig. 5 [27]. Terminado esse período, foi cortada uma fatia de 1cm do topo de cada provete, e pulverizada com uma solução de fenolftaleína e medidas as profundidades de carbonatação, Fig. 5, no quadro 3 apresenta-se os valores médios obtidos para cada tipo de argamassa.

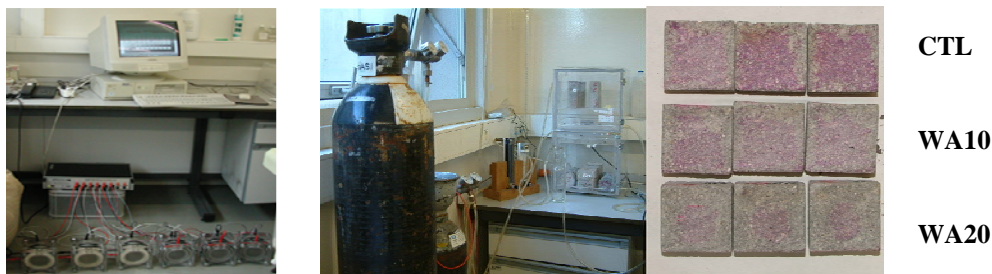


Figura 5. Equipamento para determinação D_{ns} pelo método de Luping, à esquerda e Câmara da carbonatação e profundidade de carbonatação à direita.

3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os resultados dos ensaios mecânicos e de durabilidade apresentados nas secções anteriores resumem-se no Quadro 3.

No que concerne às análises químicas das WA, apresentam-se os resultados em termos de óxidos que se comparam com os obtidos por Naik [13] e ainda com os requisitos de cinzas volantes segundo a EN 450-1 [28]. Não se apresentam os requisitos relativos à escória de alto-forno pois o total de CaO e MgO deveria ser pelo menos igual à quantidade de SiO₂, o que no caso das WA não se verifica.

Nas análises químicas das WA o teor de SiO₂ é superior ao obtido por Naik compensando a quantidade inferior de Al₂O₃ e Fe₂O₃, com um valor total dos três óxidos semelhante e superior ao limite requerido para as cinzas volantes [13]. Em WA os teores de MgO, SO₃, e Na₂O₃ são inferiores aos obtidos por Naik e estão de acordo com os requisitos para as cinzas volantes [13]. Os cloretos apresentam teores bem inferiores ao limite imposto pela EN 450-1 e a perda ao fogo apresenta valores muito abaixo do limite superior citado por Naik [13] enquadrando-se na categoria A das cinzas volantes de acordo com a EN 450-1.

Nenhum dos elementos e compostos químicos parece ser prejudicial, no entanto a análise por Difrakção de Raio-X revelou a presença das seguintes fases cristalinas (por ordem decrescente de abundância): Quartzo, Feldspato K e Plagioclase. A ausência da fase vítrea é um grande inconveniente pois compromete a actividade pozolânica e a adição desempenhará apenas um papel de filler não ser que seja moído muito finamente.

Quadro 4. Análise químicas das cinzas de fundo obtida por Naik e neste trabalho, requisitos das cinzas volantes na EU de acordo com EN 450-1 [13,28].

Compostos analisados	WA (Naik, 2004)		WA (análise química)	EN 450-1 Requisitos da cinzas volantes		
	valor %	Limites %		Categoria		
				A	B	C
Si O ₂	42,3	32,2 – 50,7	69,5 ± 4,0	>25	>25	>25
Al ₂ O ₃	17,9	15,5 – 20,3	4,18 ± 0,52			
Fe ₂ O ₃	12,6	4,7 – 20,8	1,99 ± 0,24			
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	73,8	56,9 – 93,4	75,67	>70	>70	>70
CaO	11,4	4,2 – 22,2	5,88± 0,68	<10	<10	<10
MgO	2,5	0,9 – 4,8	1,24 ± 0,14	<4	<4	<4
Cl			0.013 ± 0,003	<0,1	<0,1	<0,1
SO ₃	0,4	0,1 – 0,7	<0,1	<3	<3	<3
Na ₂ O ₃			0,4*	<5	<5	<5
Perda ao Fogo	9,9	1,4 – 33,2	3.59± 0,42	<5	2-7	4-9

* Obtido por Fluorescência de raio-X.

Por análise do Quadro 3 poder-se-á tirar as seguintes elacções:

- A massa volúmica da argamassa diminui ligeiramente (1,4% para WA20 comparado com CTL) com o aumento da percentagem de substituição.
- A resistência à flexão praticamente não sofreu alteração como esperado, considerando as baixas percentagens de substituição, tendo os ensaios sido realizados aos 28 dias com cura a 38°C durante 26 dias para acelerar as reacções.
- A resistência à compressão diminuiu com o aumento da percentagem de substituição, apresentando uma diminuição de 19% para 20% de substituição.
- O índice de actividade diminui com o aumento de percentagem de substituição, apresentando para 10% de substituição um valor de 93% e para 20% de substituição um valor de 83%, o que sugere que para uma substituição de 25% o índice de actividade será menor que o requerido para as cinzas volantes, sílica de fumo ou pozolana natural [21,28].
- O coeficiente de absorção para 10% de substituição apresentou um comportamento semelhante ao da argamassa de controle (diminuição de 6% em relação ao valor de CTL), mas para 20% substituição verificou-se um abaixamento substancial, inesperado, da absorção capilar, da ordem dos 28%.

-O coeficiente de difusão de cloretos (D_{ns}) aumentou com a percentagem de substituição como seria de esperar considerando que WA não demonstrou propriedades pozolânicas.

- A resistência à carbonatação teve um comportamento esperado, isto é, aumentou com a percentagem de substituição de WA.

Para cada propriedade (Quadro 3) foi calculada o desempenho da argamassa com substituição parcial de cimento por WA em comparação com a argamassa de controle, representando-se por um sinal positivo (+) uma melhoria e por um sinal negativo (-) um desempenho pior do que a argamassa de controle.

4. CONCLUSÕES

Fazendo uma análise global, constata-se que as argamassas com substituição parcial de cimento por cinzas de fundo não apresentam melhoria quando comparadas com argamassa de controle.

Apesar das análises químicas de WA parecerem favoráveis em termos de pozolanicidade, a Difracção por Raios-X mostrou que a sílica presente é amorfa. No caso de WA ter sido moída mais finamente os resultados provavelmente teriam conduzido a um desempenho melhorado demonstrando a possível aplicação deste resíduo como substituto parcial do cimento Portland. Na verdade adições como a cinza de casca de arroz parecem apresentar maior reactividade se forem mais moídas mesmo sendo cristalinas à partida. Este facto será confirmado num estudo em curso em que a WA foi moída mais finamente.

Por último, para além da moagem necessária também é importante o controle da combustão da biomassa florestal de modo a obter a maior quantidade possível de matéria amorfa e portanto um acréscimo da actividade pozolânica em betão.

REFERÊNCIAS

- [1] DHIR, R. - Preface to exploiting wastes in concrete, Proceedings of the international seminar exploiting wastes in concrete, University of Dundee, Editors: Ravindra K. Dhir and Trevor G. Jappy, Thomas Telford, Scotland, UK, 1999. ISBN 0-7277-2821-0
- [2] SWAMY, R.N. - Sustainable concrete for infrastructure regeneration and reconstruction, Proceedings of the international conference on sustainable construction into the next millennium: Environmentally friendly and innovative cement based materials, Editors: N.P. Barbosa, R.N. Swamy and C. Lynsdale, João Pessoa, Brasil, 2-5 November 2000, pp. 15-43.
- [3] PETRANEK, V. - Special protective coatings for concrete structures, Proceedings of the 2nd International Congress, Session 15 – Durability of concrete structures, Fédération Internationale du Béton, Naples, Italy, 5-8 June 2006.
- [4] SAMARIN, A. - Wastes in concrete: Converting liabilities into assets, Proceedings of the International Seminar Exploiting wastes in concrete, University of Dundee, Editors: Ravindra K. Dhir and Trevor G. Jappy, Thomas Telford, Scotland, UK, 1999. ISBN 0-7277-2821-0
- [5] NAIK, T.R. - Sustainability of cement and concrete industries, Proceedings of the international conference on sustainable construction materials and technology, Editors: Yoon-Moon Chun, et. al, Taylor and Francis Publishers, UK, June 2001.
- [6] MEHTA, P.K. - Mineral admixtures for concrete – An overview of recent developments, Proceedings of an engineering foundation conference advances in cement and concrete, University of New Hampshire, Durham. ASCE, 1994, pp. 243-256.
- [7] WORRELL, E. [et al.] - Carbon dioxide emissions from the global cement I, Industry, Annual review of energy and environment, C. & Meida, L. O., Vol. 26, 2001, pp. 303-329.
- [8] SWAMY, R.N. - Sustainable concrete for the 21st century – Concept of strength through durability, The Indian Concrete Journal, December 2007, Vol 81, No. 12, pp. 7-15.
- [9] NAIK, T.R. - Environmental-friendly concrete with industrial and post-consumer by-products, Report No. CBU-2004-21, REP-570, December, UWM Center for by-products utilization, Department

- of civil engineers and mechanics, University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, Wisconsin, USA, 2004.
- [10] NAIK, T.R. [et al.] - Use of industrial byproducts in cement-based materials, Proceedings of the international seminar on exploiting wastes in concrete, University of Dundee, Editors: Ravindra K. Dhir and Trevor G. Jappy, Thomas Telford, Scotland, UK, 1999. ISBN 0-7277-2821-0
- [11] UCHIKAWA, H. [et al.] - Chapter 8: Recycling of waste as an alternative raw material and fuel in cement manufacturing, Waste materials used in concrete manufacturing, Editor: Satish Chandra, Division of concrete structures, Chalmers University of technology, Goteborg, Sweden, Noyes Publications, USA, 1997.
- [12] EERE, Glossary, Information Resources, Energy Efficiency and Renewable Energy, US department of energy. Naik, T.R., Kraus R.N. and Kumar, R. Wood ash: A new source of pozzolanic material, Report No. CBU-2001-10, REP-435. UWM center for byproducts utilization department of civil engineers and mechanics, University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, Wisconsin, USA, June, 2001.
- [13] Notícias, Info-Ordem dos Engenheiros, trimestral, No. 9, July-September, 2006
- [14] Manual de boas práticas de eficiência energética. [On line]. Ed. Portuguesa, 2005. [Consult. Nov. 2005]. Available on the WWW: [URL:http://www.bcsdportugal.org/files/496.pdf](http://www.bcsdportugal.org/files/496.pdf).
- [15] NP EN 933-1:2000, Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. – Parte 1: Análise granulométrica, IPQ, Portugal. ICS: 91.100.20
- [16] NP EN 196-2:1996, Métodos de ensaio de cimentos – Parte 2: Análise química dos cimentos, IPQ, Portugal.
- [17] NP EN 196-3: 1996, Métodos de ensaio de cimentos – Parte 3: Determinação do tempo de presa e da expansibilidade, IPQ, Portugal.
- [18] ASTM C 109/90, ASTM Designation C109-90-Standard, 1990, Test method for compressive strength of hydraulic cement mortars.
- [19] NP EN 196-1:1996, Métodos de ensaio de cimentos, – Parte 1: Determinação das resistências mecânicas, IPQ, Portugal.
- [20] NP EN 4220:1993, Pozolana para betão, Definições, especificações e verificação da conformidade, IPQ, Portugal.
- [21] NEVILLE, A.M. - Properties of Concrete, Longman Publishers, UK, 1998. ISBN 0-582-23070-5
- [22] RILEM TC 116 - PCD, Permeability of concrete as a criterion of its durability, C: Determination of the capillary absorption of water of hardened concrete, Materials and Structures, No. (32), 1999, pp. 178-179.
- [23] SOUSA-COUTINHO, J. - The combined benefits of CPF and RHA in improving the durability of concrete structures, Cement & Concrete Composites, No. 25, 2003, pp. 51-59.
- [24] NT BUILD 492: 1999, Concrete, mortar and cement-based materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, NORDTEST.
- [25] LNEC E 463: 2004, Betão. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário, LNEC, Lisboa, Portugal.
- [26] LNEC E 391:1993, Betões. Determinação da resistência à carbonatação estacionário, LNEC, Lisboa, Portugal.
- [27] NP EN 450-1: 2006, Cinzas volantes para betão, Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade, IPQ, Portugal.
- [28] SOUSA-COUTINHO, J. – Melhoria da durabilidade dos betões, FEUP, Porto, Portugal, 2005. ISBN 972 752 073 1
- [29] NILSSON, L. [et al.] - High-performance repair materials for concrete structures in the port of Gothenburg, Proceedings Vol. 2, Second international conference on concrete under severe conditions, environment and loading, Editor: O. E. Gjorv, K. Sakai and N. Banthia, E. & FN Spon, 1998, pp. 1193-1198.