

*BE2010 – Encontro Nacional Betão Estrutural  
Lisboa – 10, 11 e 12 de Novembro de 2010*

## **Misturas ternárias eco-eficientes com incorporação de cinzas volantes e metacaulino**



**Rui Reis<sup>1</sup>**



**Aires Camões<sup>2</sup>**

### **RESUMO**

Com a consciencialização crescente dos problemas ambientais, nomeadamente no que concerne à eficiência energética e aos gases de efeito de estufa, a indústria da construção e do cimento tem tido um lugar de destaque, sendo esta última responsável por cerca de 7% das emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Sabendo que a produção de cimento contribui com cerca de uma tonelada de CO<sub>2</sub> por cada tonelada produzida, não deixa de ser paradoxal que o produto mais consumido pelo Homem, apenas ultrapassado pela água, não encontre um substituto credível, mais eficiente e mais ecológico. Considerando as soluções tecnológicas disponíveis, envolvendo a eficiência energética da produção, a produção intensiva ou a procura de combustíveis alternativos para o fabrico de cimento, uma solução mais simples poderá estar na racionalização dos recursos e na sua substituição por materiais alternativos. Já existe um tipo de betão (betão de elevado volume de cinzas volantes) com aplicações ainda muito restritas, mas com grandes vantagens ambientais. No entanto, as reduzidas resistências iniciais são uma das características limitativas da sua utilização. Neste contexto, foi desenvolvido um estudo experimental com misturas ternárias onde volumes significativos de cimento foram substituídos por cinzas volantes, e, também, em simultâneo, por uma outra adição, o metacaulino, funcionando esta como um factor corrector do desempenho. Neste trabalho, apresentam-se as principais vantagens e inconvenientes da utilização simultânea de duas adições, cinzas volantes e metacaulino, que poderão originar características de desempenho muito interessantes mesmo com elevados volumes de substituição. As sinergias resultantes destas misturas ternárias demonstram desempenhos muito promissores, possibilitando grandes volumes de substituição do cimento, mantendo ou melhorando os desempenhos mecânicos e de durabilidade, podendo vir a ser uma solução viável para a obtenção de um betão eco-eficiente de desempenho melhorado para uso generalizado na construção como alternativa ao betão convencional.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Betão eco-eficiente, metacaulino, cinzas volantes, durabilidade.

<sup>1</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. [ruicunhareis@gmail.com](mailto:ruicunhareis@gmail.com)

<sup>2</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. [aires@civil.uminho.pt](mailto:aires@civil.uminho.pt)

## 1. INTRODUÇÃO

Muitos factores tem estado na génese dos problemas ambientais, que têm sabido demonstrar de forma dramática a sua face. Um desses factores é o consumo de cimento. Sendo este o produto mais consumido pelo Homem, apenas ultrapassado pela água, é responsável por cerca de 7% das emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. O ritmo de construção e desenvolvimento global, a imergência meteórica da economia de países como a China e a Índia, os prazos de consumo cada vez mais acelerados, o desperdício constante na concepção rápida e pouco eficiente dos materiais de construção, bem como a visão a curto prazo dos custos ambientais, são cada vez mais um factor de degradação ecológica e social, onde é necessário um grande impulso para sair desta inércia de devastação. Caso contrário, a indústria do cimento e da construção terá de continuar a desenvolver-se de forma intensiva para acompanhar e alimentar o ritmo de dependência exponencial por este produto [1].

Além da grande dependência pela utilização do cimento, também se verifica um excesso de consumo devido à sua deficiente utilização: dosagens elevadas, má formação dos agentes envolvidos, falta de estudos de composição, etc. Este mal está há muito tempo identificado, originando patologias inesperadas ou precoces, e claro, custos de exploração dos edifícios muito mais acentuados, e que não são devidamente contabilizados aquando do projecto ou construção dos edifícios. Poderá chamar-se a estes três grandes grupos, a patologia do consumo. Estes factores são ainda ampliados pela falta de visibilidade de todos estes problemas. Sem a necessária consciencialização de todos os intervenientes, mais difícil se torna o combate a este problema.

Assim, deve-se identificar as grandes chaves para diminuir a dependência. Estas podem estar na diminuição do consumo de cimento, utilização criteriosa deste material, diminuição da relação cimento/clínquer e ainda pela utilização de misturas cada vez mais eficientes. Neste estudo estamos principalmente a tentar utilizar as duas últimas chaves: substituição do cimento e desenvolvimento tecnológico nas misturas de composição de betões.

Para o concretizar irão utilizar-se duas adições: cinzas volantes e metacaulino. A utilização de cinzas volantes para além de permitir fazer betões com menor quantidade de cimento permite vantagens acrescidas e já muito bem identificadas, tanto no estado fresco como na obra acabada [2]. Mas para ter grandes benefícios ambientais será necessário substituir a maior quantidade de cimento possível, mas tal poderá não ser possível devido às desvantagens da utilização desta adição, tais como reacções pozolânicas lentas, resistências baixas nas idades mais jovens, necessidade de cura cuidada, maior susceptibilidade ao excesso de água, etc.

É aqui que entra o metacaulino, pois permite com uma pequena percentagem de adição, mitigar ou até inverter algumas destas desvantagens, nomeadamente corrigir as baixas resistências iniciais, conseguindo-se produzir betões com grande volume de incorporação de adições e com comportamento mecânico semelhante ao de um betão convencional, ou mesmo melhorado. Relativamente à durabilidade, a incorporação destas adições proporciona, em geral, a obtenção de um betão mais denso e com desempenho também mais elevado.

De forma resumida os principais vectores que podem justificar o recurso a misturas ternárias são os seguintes:

- Fabricar betões com volumes elevados de cinzas volantes, de forma a substituir grandes volumes do ligante tradicional por este subproduto industrial, que de outro modo teria de ser armazenado em aterro, podendo também ser um foco de poluição;
- Estas cinzas vão contribuir para o aumento da compactidade e durabilidade do material, embora eventualmente o efeito só se faça sentir a longo prazo devido à reacção pozolânica ser lenta. Estas adições permitem, também, aumentar a trabalhabilidade, compensando o efeito da introdução do metacaulino, permitindo, eventualmente, substituições mais elevadas de metacaulino;
- Produzir betões com muito baixa razão A/L (0.3 ou até 0.2), sendo a trabalhabilidade controlada pelo uso de superplastificantes, originando um produto ainda mais compacto, resistente e durável;

- Introduzir metacaulino de forma a garantir as resistências iniciais necessárias para tornar este betão utilizável em construções correntes, e mitigar, eventualmente, parte da cura cuidada que as cinzas requerem. Além disto, a utilização de metacaulino pode contribuir para um aumento da resistência e durabilidade do betão devido a ser um material muito reactivo e fino (efeito filler).

Neste contexto, foi desenvolvido um programa experimental com argamassas, englobando a caracterização do desempenho de misturas ternárias, onde volumes significativos de cimento foram substituídos por cinzas volantes, e, também, em simultâneo, por uma outra adição, o metacaulino. O recurso ao ensaio de provetes de argamassa deveu-se às vantagens óbvias que estes apresentam face aos de betão (menor dispêndio de material, maior facilidade no fabrico das composições e manuseio de moldes e provetes, menor espaço ocupado pelos provetes, etc.) e que, em geral, se podem resumir numa diminuição de horas-homem necessárias à realização deste trabalho experimental. No entanto, este trabalho pretende contribuir para o conhecimento de betões eco-eficientes e não de argamassas. Aliás, esta opção foi tomada uma vez que os resultados dos provetes de argamassa podem ser extrapolados e usados para estimar o desempenho dos betões correspondentes [2, 3, 4].

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental incidiu sobre o estudo e caracterização de composições de argamassas, indicadas no Quadro 1. O cimento (C) utilizado foi o CEM II/B-L 32.5N, produzido pela CIMPOR, que foi substituído por metacaulino (MTK) MIBAL-C, cinzas volantes (CV) da central do Pego, ou pelas duas adições em simultâneo. O ligante (L) consiste na soma do cimento e das adições, A representa a água da amassadura e SP o superplastificante.

Quadro 1. Composições estudadas.

Comp.	Designação	Materiais						
		L [kg/m <sup>3</sup> ]	C [%]	MTK [%]	CV [%]	M [kg]	A/L [-]	SP [%L]
I	PADRÃO	484	100	0	0	1457.9	0.55	0
II	10%Mtk	484	90	10	0	1449.1	0.55	1.5
III	20%CV	484	80	0	20	1422.8	0.55	0
IV	40%CV	484	60	0	40	1387.6	0.55	0
V	60%CV	484	40	0	60	1352.5	0.55	0
VI	10%MTK+20%CV	484	70	10	20	1414.0	0.55	0
VII	10%MTK+40%CV	484	50	10	40	1378.8	0.55	0.4
VIII	10%MTK+60%CV	484	30	10	60	1343.6	0.55	1.5

De forma a avaliar o comportamento das argamassas no estado fresco, foram submetidas ao ensaio de espalhamento [5], após a realização de cada amassadura.

No estado endurecido, a resistência mecânica foi estudada à flexão e à compressão [6]: à flexão em séries de 3 provetes 40x40x160 mm<sup>3</sup> para cada idade (3, 7, 14, 21, 28 e 90 dias). A determinação da resistência à compressão foi efectuada com recurso ao ensaio das metades provenientes do ensaio à flexão, tendo-se utilizado uma série de 6 provetes de 40x40x(±80) mm<sup>3</sup>. Em algumas composições foi ainda possível avaliar a resistência aos 270 dias. Para avaliação dos indicadores de durabilidade realizaram-se ensaios de migração em regime não estacionário [7], com séries de 3 provetes cilíndricos de 50 mm de altura e 100 mm de diâmetro por cada amassadura, aos 28 e 90 dias de idade. Foram, também, realizados ensaios de absorção de água por capilaridade [8], utilizando-se três provetes cúbicos com 50 mm de aresta, por cada amassadura, nas idades de 7, 14, 21, 28 e 90 dias. O período de leituras foi realizado a intervalos regulares decrescentes com o tempo: 2, 4, 8, 15, 30 minutos; 1, 2, 4, 8, 16 horas; 1, 2, 4, 7 dias, e por aí adiante até chegar aos 90 dias. Para a determinação do coeficiente de absorção capilar apenas foram utilizadas as primeiras quatro horas de ensaio.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DAS ADIÇÕES

### 2.1 Metacaulino

O metacaulino é uma adição do tipo II, e é resultado da cozedura de caulino a cerca de 750/800°C. A sua reactividade pozolânica depende de 3 factores: cristalinidade de origem, granulometria e grau de amorfização [9].

O Metacaulino utilizado neste estudo foi extraído em Barqueiros, no Concelho de Barcelos, e designado Mibal-C. Este jazigo de Barcelos é provavelmente de natureza sedimentar com reservas brutas estimadas em milhões de toneladas [10]. No Quadro 2, estão representadas as suas principais características.

Quadro 2. Características do caulino utilizado (MIBAL - C) [10].

Característica		MIBAL - C	Característica		MIBAL - C
Dimensão das partículas [%]	< 30 $\mu\text{m}$	99 $\pm$ 3	Inqueimados	Perda ao Fogo [%]	12.75
	< 10 $\mu\text{m}$	93 $\pm$ 5	Humidade [%]	Inicial	32 $\pm$ 3
	< 5 $\mu\text{m}$	82 $\pm$ 5		Grânulos	18 $\pm$ 2
	< 2 $\mu\text{m}$	68 $\pm$ 6		Após secagem	< 2
Composição Química [%]	SiO <sub>2</sub>	47.0	Parâmetros após secagem	Burnout	0.09
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37.1		Resistência à flexão (110°C) [MPa]	2.45 $\pm$ 0.49
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.3		Resistência à flexão após Burnout [MPa]	13 $\pm$ 3
	K <sub>2</sub> O	2		Absorção de água [%]	10 $\pm$ 2
	Na <sub>2</sub> O	0.2	Outros	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	2.4 – 2.7
	MgO	0.15		pH da suspensão	6 – 9
	TiO <sub>2</sub>	0.3			
	CaO	0.1			

### 2.2 Cinzas volantes

As cinzas volantes são adições do tipo II, e são resultado da combustão de carvão nas centrais termoeléctricas. Neste estudo foram utilizadas cinzas volantes da central do Pego. No Quadro 3 são apresentadas as principais características das cinzas utilizadas [2]. Estas apresentam uma finura dentro dos limites das normas, mas com uma variação bastante superior. Segundo a Norma NP EN 450-1 [12], a finura não deve exceder 40% em massa e não deve variar mais de  $\pm$  10 pontos percentuais em relação ao valor declarado. Ora as cinzas utilizadas, apresentam uma média de finura de 27.3% (partículas superiores a 45  $\mu\text{m}$ ), e uma variação de cerca de 40%, o que equivale a quatro vezes o permitido.

Quadro 3. Características das cinzas volantes utilizadas [2].

Característica		PEGOP	Característica	PEGOP
Composição química	Perda ao fogo [%]	7.30	Cl [%]	0.00
	SiO <sub>2</sub> [%]	60.87	CaO livre [%]	0.00
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	20.40	Na <sub>2</sub> O [%]	0.55
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	7.82	K <sub>2</sub> O [%]	1.92
	CaO total [%]	2.72	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [%]	1,14
	MgO [%]	1.40	TiO <sub>2</sub> [%]	1.29
	SO <sub>3</sub> [%]	0.22	Total SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	89.09
Propriedade físicas	Massa volúmica [kg/cm <sup>3</sup> ]	2360	Finura > 45 $\mu\text{m}$ [%]	27.30
	Superfície específica de Blaine [m <sup>2</sup> /kg]	387.9	Humidade [%]	0.16
			Exigência de água	0.297

As cinzas volantes utilizadas são dotadas de um teor de inqueimados elevado. Segundo dados fornecidos pelo fabricante, a perda ao fogo destas cinzas volantes varia, em geral, entre 6% e 9%. O teor de inqueimados das cinzas volantes utilizadas neste programa foi determinado experimentalmente e atingiu o valor médio de 7.3%, o que permite classificar estas cinzas como não sendo de grande qualidade e enquadrar este material na categoria C da NP EN 450-1 [12].

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Trabalhabilidade

O ensaio de espalhamento, utilizado para medir a trabalhabilidade das composições, forneceu os resultados expressos na Figura 1.

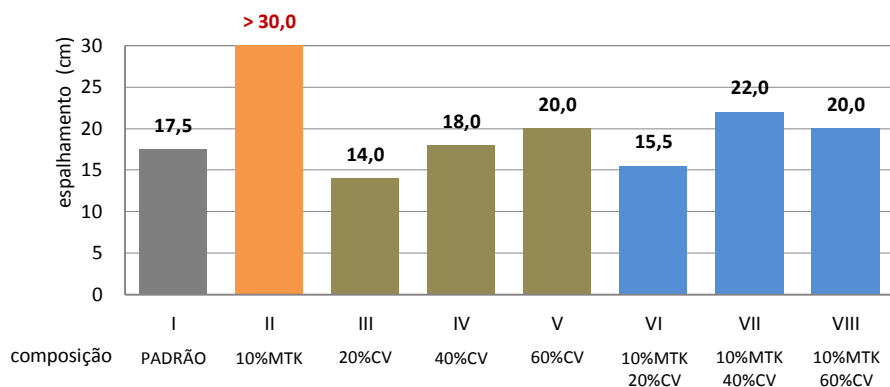


Figura 1. Trabalhabilidade – Espalhamento.

Este ensaio forneceu alguns valores atípicos porque foi utilizado superplastificante em algumas amassaduras. A utilização deste adjuvante deveu-se às dificuldades verificadas na fase inicial do processo de mistura, nas amassaduras com incorporação de metacaulino. Sabe-se que a sua presença torna as argamassas mais secas e menos moldáveis, aprisionando a água [10]. Na realidade, estas dificuldades poderão ser ultrapassadas com maior tempo de amassadura e uma mistura mais enérgica, obtendo-se no final uma pasta com consistência regular. Este facto é confirmado pelo ensaio, verificando que o superplastificante não seria necessário para a trabalhabilidade da pasta após a amassadura, sendo a exagerada plasticidade da composição II (10%MTK) bem indicativa desse facto. Em pequenas percentagens de substituição do cimento por adição simples de metacaulino (cerca de 10%) a trabalhabilidade não será tão importante ou crítica, mas à medida que esta quantidade aumenta poderemos ver comprometida a amassadura. Pelo contrário, a incorporação de cinzas volantes origina pastas de trabalhabilidade crescente em função da quantidade de cinzas. Na prática, poderá dizer-se que estas duas adições são complementares, pois as cinzas proporcionam um efeito mitigador desta grande desvantagem da utilização do metacaulino (trabalhabilidade).

### 4.2 Resistências mecânicas

Na Figura 2 apresenta-se a evolução das resistências à flexão e à compressão fornecida pelos ensaios. Estes valores foram obtidos desde os 3 aos 90 dias de idade. Os resultados do ensaio à flexão apresentam uma sensibilidade acrescida relativamente à compressão, talvez por não ser tão importante a compacidade ou a imperfeição dos provetes à compressão.

Por intermédio da observação da Figura 2 poderá verificar-se, também, um facto já conhecido e bem patente nestes resultados: o atraso que as cinzas volantes provocam na resistência, reduzindo drasticamente a tensão resistente nas primeiras idades, sendo esta redução mais elevada quanto maior a incorporação de cinzas. Isto deve-se, por uma lado, à reduzida disponibilidade de hidróxido de cálcio (proveniente da reacção do cimento) para reagir com as cinzas, e, por outro lado, pelo facto desta

reação ser muito lenta. Segundo estudos efectuados por Camões [2] verificou-se que nas composições até 40% de cinzas existe uma tendência para estabilizar a resistência dos 90 aos 290 dias, e nas composições com 60% de cinzas essa tendência não é visível, pelo menos a médio prazo. A quantidade diminuta de ensaios efectuado para esta mistura não ajuda a clarificar este fenómeno.

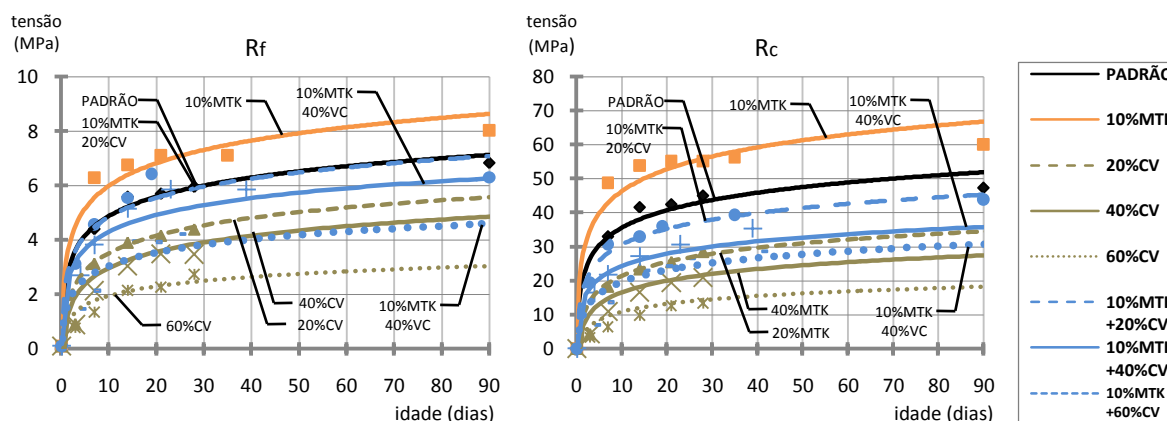


Figura 2. Evolução da resistência à flexão ( $R_f$ ) e compressão ( $R_c$ ) até aos 90 dias.

Contrariamente às cinzas, o metacaulino potencia as resistências em todas as idades, e com todas as percentagens de substituição. Este, ao contrário das cinzas, reage muito mais rapidamente com o hidróxido de cálcio e apresenta resistências iniciais elevadas, sendo a responsabilidade da resistência numa primeira fase proveniente do metacaulino, e numa fase mais adiantada, à medida que as cinzas reagem lentamente com o hidróxido de cálcio, das cinzas.

Na Figura 3, fica bem patente este facto verificando-se que, com a incorporação de 10% de metacaulino, os valores face às composições binárias (apenas com cimento e cinzas) foram substancialmente corrigidos relativamente à composição padrão. Fica, no entanto, a dúvida se a introdução de metacaulino acelera as reacções das cinzas, pois os elementos disponíveis não são suficientemente conclusivos. Sabe-se, também, que a uma maior compactidade está associada uma maior resistência, o que poderá indicar que as composições com melhor desempenho serão as mais compactas, e nesta perspectiva, o metacaulino, sendo um material muito mais fino e reactivo, poderá ter um papel predominante.

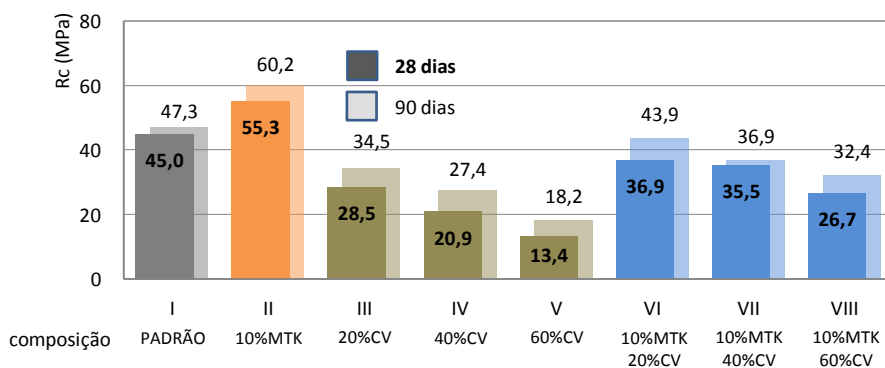


Figura 3. Resistência à compressão ( $R_c$ ) aos 28 e 90 dias.

### 4.3 Indicadores de durabilidade

Na Figura 4, apresentam-se os resultados dos ensaios da determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração (D).

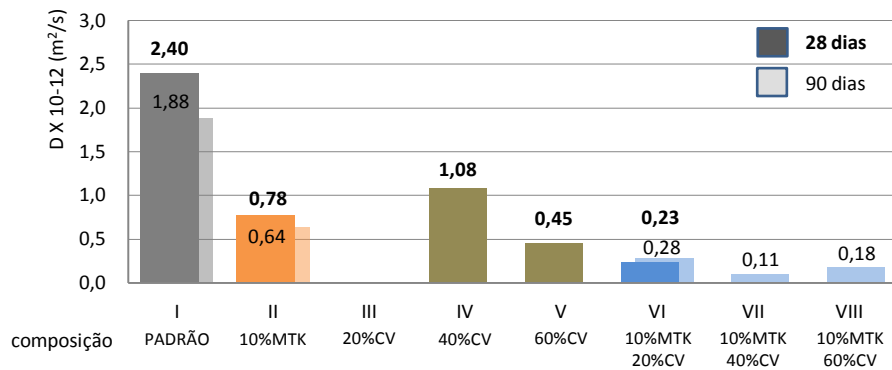


Figura 4. Coeficiente de difusão dos cloretos por migração (D).

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que todas as composições apresentam melhor comportamento do que a composição padrão, o que corresponde ao esperado uma vez que as adições com cinzas aprisionam os cloretos. Este aspecto é importante no que respeita à durabilidade, e explica-se porque no ataque com iões cloro apenas uma parte destes, presentes no betão, são efectivamente responsáveis pela corrosão. Segundo Camões [2] uma primeira parte é fixa quimicamente ficando incorporada nos produtos de hidratação do cimento. Uma outra parte é fixa fisicamente e é absorvida na superfície dos micro-poros. Apenas uma terceira parte, designada de “cloretos livres”, capazes de se movimentarem, são responsáveis pela destruição da camada passivante na superfície das armaduras. Também o aumento da quantidade de aluminatos proporcionada pelas cinzas é responsável pelo melhor desempenho das suas composições [2], pois estas reagem quimicamente com os iões cloro diminuindo a sua quantidade na fase aquosa, a tal “terceira parte” e que é a que provoca a corrosão.

Os resultados obtidos permitiram salientar o elevado potencial que 10% de metacaulino proporciona face às cinzas volantes: são necessárias substituições com mais de 40% de cinzas para se conseguir o mesmo resultado que com o metacaulino. Neste seguimento, verifica-se que as composições ternárias (VI, VII e VIII) evidenciam ganhos acrescidos pela presença do metacaulino.

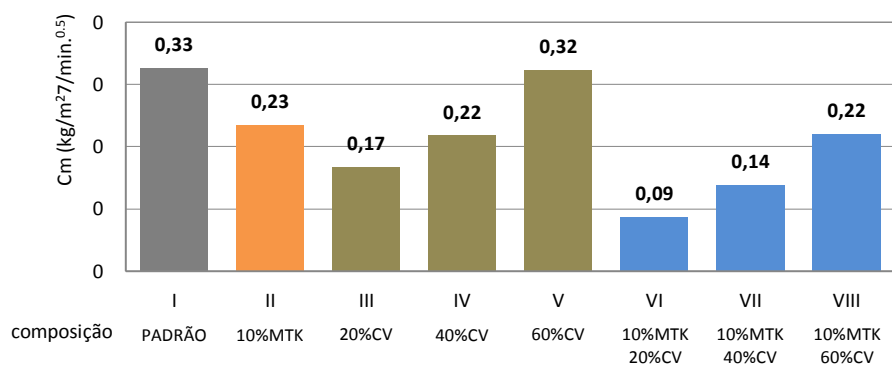


Figura 5. Coeficiente de capilaridade (C<sub>m</sub>) aos 28 dias.

No que respeita ao coeficiente de absorção capilar aos 28 dias (Figura 5), verifica-se que na composição padrão (I) atinge valores superiores para todas as misturas, o que está em consonância com o esperado. No que diz respeito às cinzas, à medida que a sua incorporação aumenta, o desempenho (medido pelo coeficiente de absorção capilar) vai diminuindo, até que com 60%, os valores são idênticos aos da composição padrão. As cinzas deverão estar a funcionar quase como filer uma vez que as reacções pozolânicas são, aparentemente, muita lentas, indiciando não haver lugar ainda à efectivação de grande parte das reacções pozolânicas. O metacaulino sendo um material muito mais fino e reactivo do que as cinzas, origina bons desempenhos devido ao efeito filer, pelo menos no

que toca a betões. Diminui o tamanho dos poros de maiores dimensões e proporciona misturas mais compactas, logo menos permeáveis.

Neste sentido, as composições ternárias apresentam valores muito mais reduzidos relativamente às composições binárias. As composições ternárias apresentam um ganho “aparente” que será aproximadamente a soma das eficiências das adições. Este efeito sinérgico do metacaulino com as cinzas resulta num material muito mais eficiente, funcionando melhor para as composição VI e VII, com substituições de cimento entre 30% e 50%.

#### 4.4 Análise de custos

Para custo das argamassas considerou-se apenas os custos dos materiais, sem considerar custos indirectos. De qualquer forma, sabe-se que o preço do cimento é actualmente competitivo, e que futuras adições que suscitem grande interesse e procura, terão também de ser competitivas ou então verão o seu preço condicionado face à conjuntura dos mercados. Os preços foram adaptados de um estudo sobre análise de argamassa sob efeitos pozolânicos com metacaulino [16], tendo considerado para o preço das cinzas volantes, um valor cerca de quatro vezes mais baixo que o cimento, e o preço do metacaulino, idêntico ao do cimento. Para o preço da areia foram utilizados os preços de um estudo recente sobre considerações económicas de betões, no mercado de carbono [17].

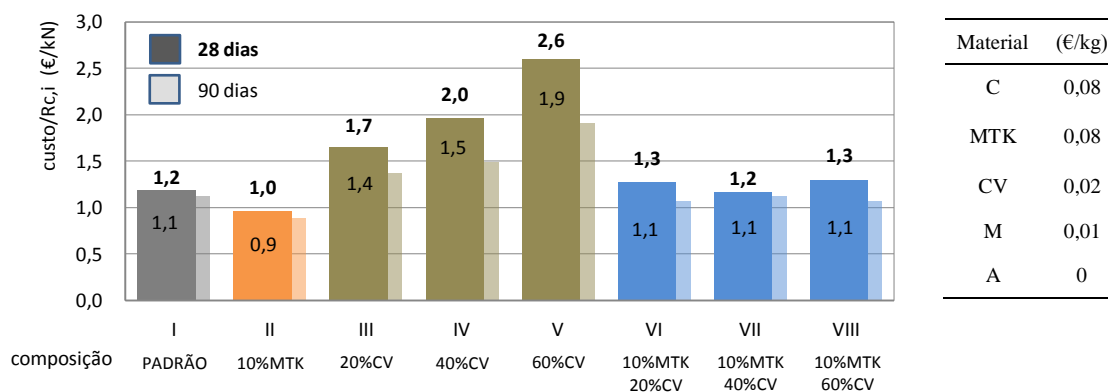


Figura 6. Custo em função da resistência à compressão, 28 e 90 dias.

Efectuou-se o cálculo dos custos de cada composição e o cálculo da relação custo/benefício em função da resistência à compressão aos 28 e 90 dias. Os resultados apresentam-se na Figura 6. Sabe-se que o custo destas composições com cinzas é menor que o da mistura padrão [18], mas numa análise qualitativa, poderá dizer-se que as cinzas apresentam um fraco desempenho custo/resistência, pelo menos em idades até aos 90 dias. Este facto era de esperar uma vez que as reacções pozolânicas das cinzas são muito lentas e deverá ser ultrapassado com o decorrer do tempo tal como verificado em [2]. O que é interessante é verificar que para incorporações de cinzas até 60% (eventualmente mais), o metacaulino corrige todas as composições binárias.

Saliente-se que a relação custo/benefício aqui apresentada é a mais gravosa para as misturas com elevada quantidade de substituição de cimento por adições. No entanto, se forem considerados os resultados obtidos nos ensaios de durabilidade, a situação inverte-se.

#### 4.5 Visão global

Como forma de obter uma visão global, foram normalizados os vários parâmetros estudados, segundo a expressão de Diaz-Balteiro, permitindo uma avaliação do tipo “melhor/pior”.  $\bar{P}_i$  representa o resultado normalizado,  $P_i$  o resultado dos nossos ensaios,  $P_{*i}$  e  $P_i^*$  são os piores e os melhores resultados, respectivamente. Com os resultados normalizados, desenvolveram-se diagramas do tipo radar, representando a cinza claro os resultados da composição padrão, e com uma linha dupla ténue e



linha simples forte, a mistura binária e ternária, respectivamente. Quanto maior o valor na escala de 0 a 1, melhor o desempenho.

$$\bar{P}_i = \frac{P_i - P_{*i}}{P_i^* - P_{*i}} \forall i \quad (1)$$

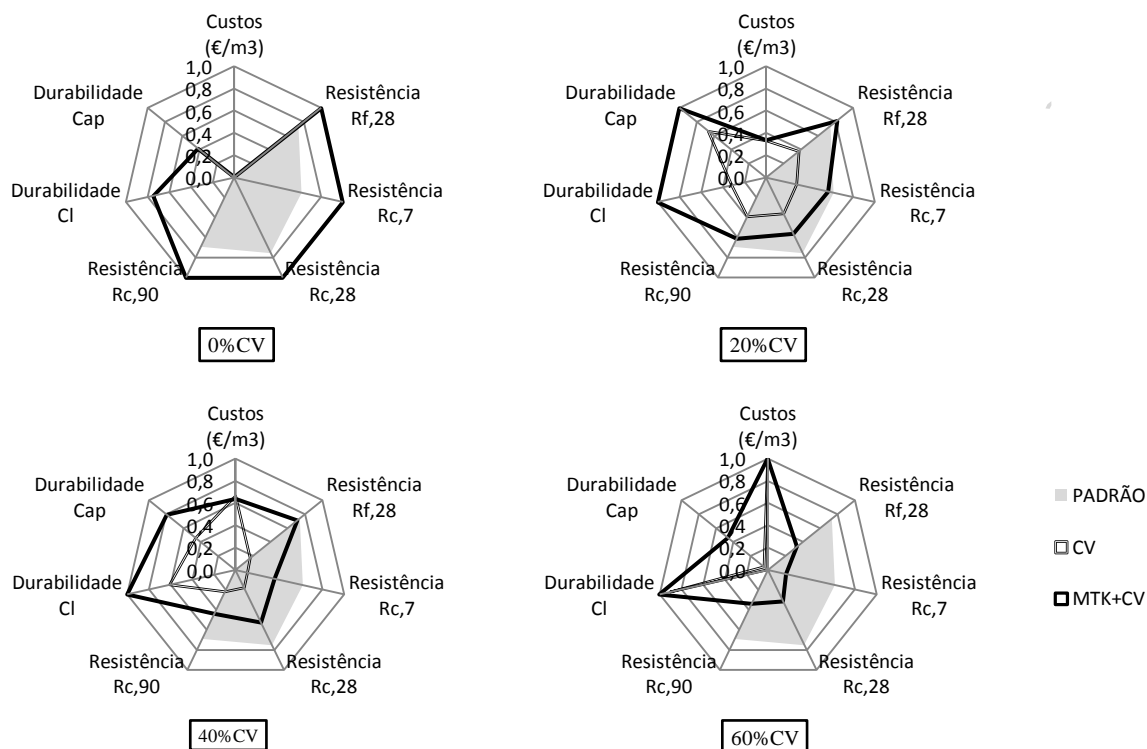


Figura 7. Diagramas de desempenho global.

Por observação da Figura 7 compreende-se que as composições ternárias apresentam, globalmente, um desempenho mais vantajoso, com custos semelhantes e para todas as quantidades de cinzas testadas.

## 5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos é possível concluir que é possível produzir betões eco-eficientes com elevados volumes de substituição de cimento por cinzas volantes, e com uma percentagem reduzida de metacaulino, capazes de contribuir para uma diminuição substancial dos impactes ambientais associados ao consumo de cimento. Este tipo de betões apresenta desempenhos mecânicos e de durabilidade tão bons ou melhores que os betões convencionais, mesmo nas idades mais jovens. O metacaulino actua como um factor corrector ou regulador do desempenho mecânico das cinzas volantes, nomeadamente nas idades mais jovens, obviando, assim, as grandes desvantagens do uso de elevados volumes de cinzas volantes em betões.

Assim, a incorporação adicional de metacaulino em betões com elevados volumes de adições poderá ser interessante numa perspectiva de correcção do comportamento mecânico, quando se está perante misturas pozolânicas de reacção lenta ou com grande volume de substituição do cimento.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] METHA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. - Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 3ª ed. IBRACON. Brazil, 2008. p. 77-234.
- [2] CAMÕES, A. - Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes. Universidade do Minho, Tese de Doutoramento, 2002.
- [3] CAMÕES, A.; AGUIAR, J.; JALALI, S. - Estimating compressive strength of concrete by mortar testing. Proceedings of INCOS 05. Portugal, 2005. p. 121-127.
- [4] DACZKO, J. - Mortar testing for estimating strength. Concrete International, ACI. 1999. p. 63-67.
- [5] EN 1015-3 - Methods of test for mortar for masonry. Part 3: determination of consistence of fresh mortar (by flow table). Brussels: CEN, 2004.
- [6] NP EN 196-1 - Métodos de ensaios de cimentos. Parte 1: determinação das resistências mecânicas. Instituto Português da Qualidade, 2006.
- [7] LNEC E 463 - Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário. LNEC, 2004.
- [8] EN 1015-18 - Methods of test for mortar for masonry. Part 18: determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. Brussels: CEN, 2002.
- [9] SAMPAIO, J.; COUTINHO, J.S.; SAMPAIO, M.N. - Melhoria do desempenho de betões por metacaulino. 43º Congresso Brasileiro do Concreto, Instituto Brasileiro do Concreto, Brasil, 2001.
- [10] PINTO, A.T. - Sistemas ligantes obtidos por activação alcalina. Universidade do Minho, Tese de Doutoramento, 2004.
- [11] FERRAZ, E.; Gomes, C.S.F.; Wyszomirski, P. - Kaoliny północno-zachodniej. MATERIAŁY CERAMICZNE 2/2008. s.l. : SUROWCE, 2008.
- [12] NP EN 450-1 - Cinzas volantes para betão. Parte 1: definições, especificações e critérios de conformidade. Instituto Português da Qualidade, 2006.
- [13] LNEC E 64 - Cimentos: determinação da massa volúmica. LNEC, 1979.
- [14] NP EN 196-6 - Métodos de ensaio de cimentos. Determinação da finura. Instituto Português da Qualidade, 1990.
- [15] NP EN 196-3 - Métodos de ensaio de cimentos. Determinação do tempo de presa e da expansibilidade. Instituto Português da Qualidade, 1990.
- [16] LOURENÇO, J.F.; FERRAZ, E.J.M.O.; COROADO, J.P.P.F. - Metodologia para a determinação das vantagens de argamassas sob efeito pozolânico de metacaulinos. 1ª Congresso Nacional de Argamassas de Construção, 2005. p. 2-3.
- [17] TORRAL, F.P.; CASTRO-GOMES, J.P.; JALALI, S. - Cimento portland versus ligantes geopoliméricos: considerações económicas sobre as implicações do mercado do carbono. Universidade da Beira Interior.
- [18] REIS, R. - Betões eco-eficientes com cinzas volantes e metacaulino. Universidade do Minho, Dissertação de Mestrado, 2009.