

# Betões eco-eficientes para uma construção sustentável

Aires Camões<sup>1</sup>

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil  
Azurém, P - 4800-058 Guimarães, Portugal*

Rui Reis<sup>2</sup>

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil  
Azurém, P - 4800-058 Guimarães, Portugal*

## RESUMO

A indústria do cimento é uma das responsáveis pela degradação ambiental, havendo por isso a necessidade de encontrar substitutos sustentáveis. 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, simultaneamente por cinzas volantes e metacaulino, funcionando este último como um fator corretor do desempenho. Apresentam-se as principais vantagens e inconvenientes da utilização simultânea destas duas adições, 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, aumentando consideravelmente a sustentabilidade da construção.

## 1. INTRODUÇÃO

Muitos fatores têm 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 segundo 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

---

<sup>1</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. aires@civil.uminho.pt

<sup>2</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. ruicunhareis@gmail.com

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 (Metha e Monteiro, 2008).

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. Todos estes factores ampliam os problemas ambientais associados à construção.

Assim, deve-se identificar os elementos chaves para diminuir a dependência. Estes 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 incidir nestes dois últimos aspetos: substituição do cimento e desenvolvimento tecnológico de misturas ternárias para incorporação em betões.

Para o concretizar utilizaram-se duas adições: cinzas volantes e metacaulino. A utilização de cinzas volantes, para além de permitir fabricar betões com menor quantidade de cimento, apresenta vantagens acrescidas e já muito bem identificadas, tanto no estado fresco como na obra acabada (Camões, 2002). Para maximizar os benefícios ambientais será necessário substituir a maior quantidade de cimento possível, mas tal poderá não ser viável devido às desvantagens da utilização desta adição, tais como reacções pozolánicas lentas, resistências baixas nas idades mais jovens, necessidade de cura mais cuidada, etc.

É aqui que entra o metacaulino, pois espera-se que permita, 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 compacidade 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 competitivo em construções correntes. 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 fíler);

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 (Camões *et al.*, 2002; Daczko, 1999).

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental incidiu sobre o estudo e caracterização das composições 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, estas foram submetidas ao ensaio de espalhamento (EN 1015-3, 2004), após a realização de cada amassadura.

No estado endurecido, a resistência mecânica foi estudada à flexão e à compressão (NP EN 196-1, 2006): 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 (LNEC E 463, 2004), 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 (EN 1015-18, 2002), 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.

### 3. CARACTERIZAÇÃO DAS ADIÇÕES

#### 3.1. Metacaulino

O metacaulino é uma adição do tipo II, resultante 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 (Sampaio *et al.*, 2001). 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 (Pinto, 2004). No Quadro 2, estão representadas as suas principais características.

Quadro 2 - Características do caulino utilizado (MIBAL - C) (adaptado de Pinto, 2004).

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					

#### 3.2. Cinzas volantes

As cinzas volantes são adições do tipo II, e resultam 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 (Camões, 2002).

Quadro 3 - Características das cinzas volantes utilizadas (adaptado de Camões, 2002).

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

Estas apresentam uma finura dentro dos limites das Normas, mas com uma variação bastante superior. Segundo a Norma NP EN 450-1 (2006), 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

µm), e uma variação de cerca de 40%, o que equivale a quatro vezes o permitido. Não será importante devido às reduzidas quantidades e à utilização de uma única remessa.

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 (2006).

## 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.

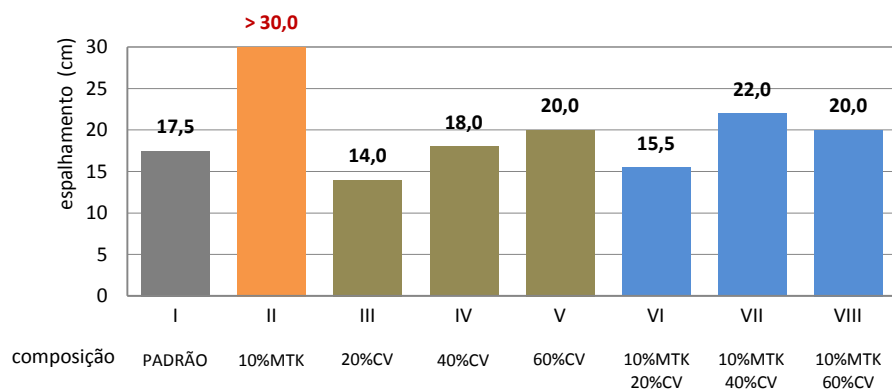


Figura 1 - Trabalhabilidade – Espalhamento.

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 (Pinto, 2004). 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.

Por intermédio da observação da Figura 2 poderá verificar-se 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 um 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 reacção ser muito lenta. Segundo estudos efectuados por Camões (2002) as composições até 40% de cinzas apresentam uma tendência para estabilizar a resistência dos 90 aos 290 dias, e nas composições com 60% de cinzas essa tendência não foi visível, pelo menos a médio prazo. A quantidade diminuta de ensaios efectuados neste trabalho, para esta mistura, não ajuda a clarificar este fenómeno.

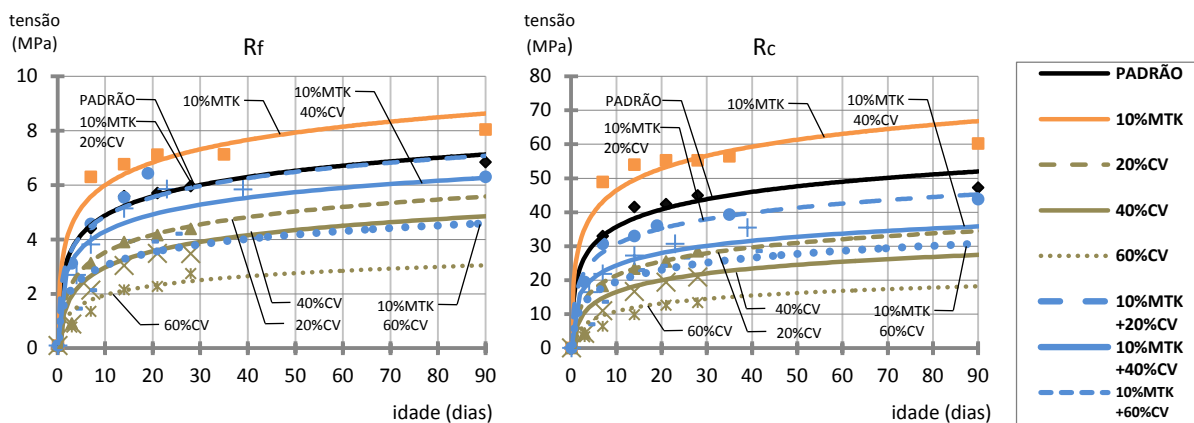


Figura 2 - Evolução da resistência à flexão ( $R_f$ ) e compressão ( $R_c$ ) até aos 90 dias.

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, aparentando a responsabilidade da resistência, numa primeira fase, ser proveniente do metacaulino, e numa fase mais adiantada, à medida que as cinzas reagem lentamente com o hidróxido de cálcio, das cinzas.

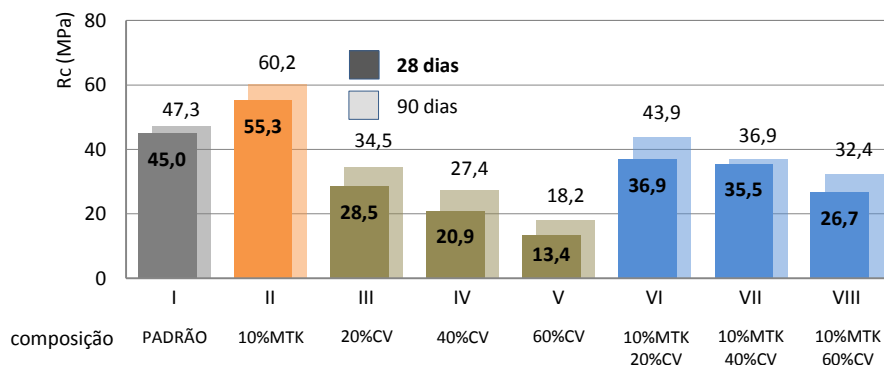


Figura 3 - Resistência à compressão ( $R_c$ ) aos 28 e 90 dias.

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. Sabe-se, também, que uma maior compactidade está associada a 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.

#### 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).

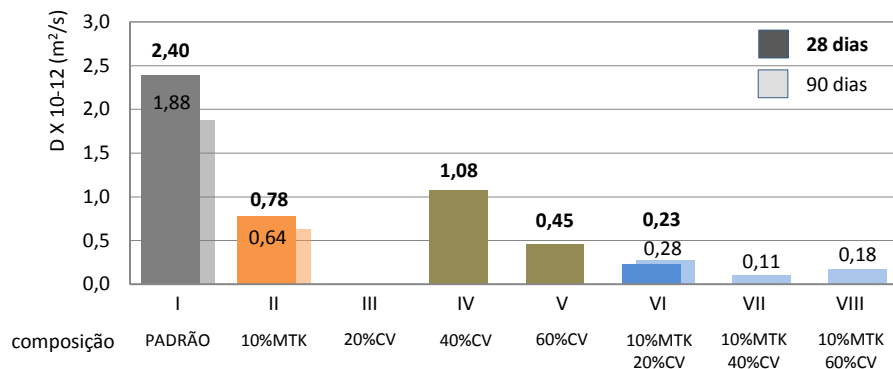


Figura 4 - Coeficiente de difusão dos cloretos por migração (D).

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que todas as composições com adições apresentam melhor comportamento do que a composição padrão, o que corresponde ao esperado uma vez que as cinzas volantes fixam 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 (2002) 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, 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.

No que respeita ao coeficiente de absorção capilar aos 28 dias (Figura 5), verifica-se que na composição padrão (I) atingiu 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 fíler uma vez que as reacções pozolânicas são, aparentemente, muito 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 fíler, 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 composições VI e VII, com substituições de cimento entre 30% e 50%.

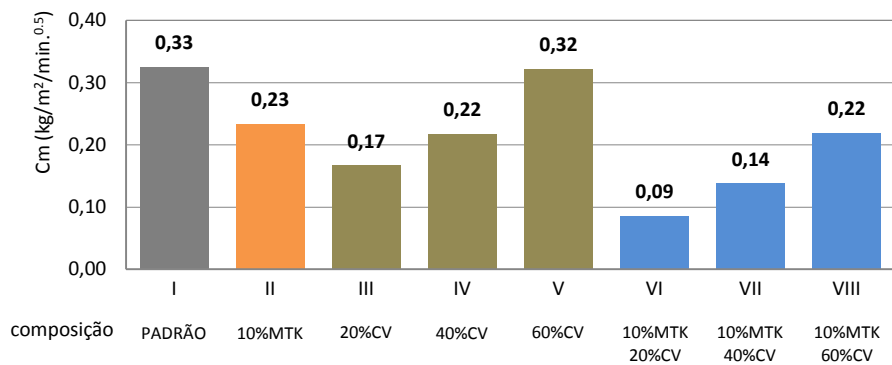


Figura 5 - Coeficiente de capilaridade ( $C_m$ ) aos 28 dias.

#### 4.4. Análise de custos

Para custo das argamassas considerou-se apenas os custos dos materiais, sem considerar custos indiretos ou de ciclo de vida. 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 (Lourenço *et al.*, 2005), 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 sobre considerações económicas de betões, no mercado de carbono (Torgal *et al.*, 2005).

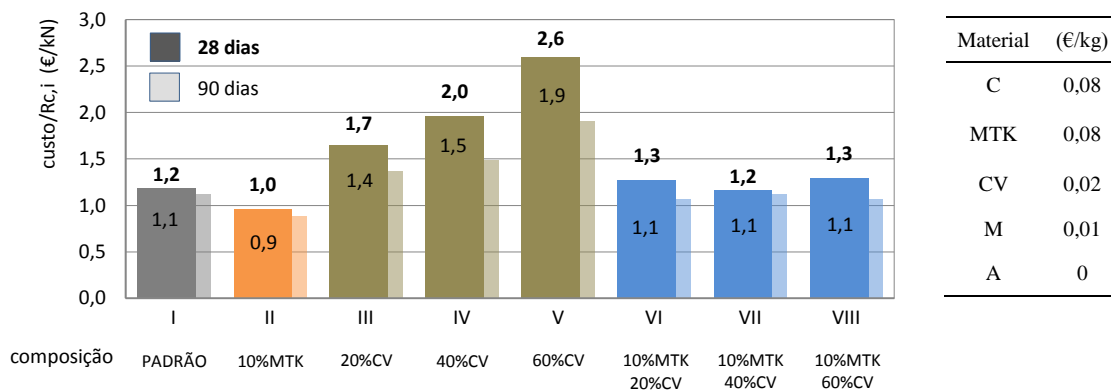


Figura 6 - Custo em função da resistência à compressão, 28 e 90 dias.



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 (Reis, 2009), 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 Camões (2002). 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. Avaliação da sustentabilidade

Como forma de analisar a sustentabilidade, foi utilizada uma metodologia de avaliação qualitativa, denominada MARS-SC. Esta consiste em avaliar o desempenho de três indicadores que, se devidamente ponderados, tornam possível quantificar a sustentabilidade das misturas estudadas, através de uma nota de sustentabilidade final (Mateus e Bragança, 2006).

Primeiro calcularam-se os parâmetros ambientais para cada composição, referentes à energia primária incorporada e ao potencial de aquecimento global, com os elementos do Quadro 4. Depois, foram normalizados os vários parâmetros estudados, segundo a expressão de Diaz-Balteiro, permitindo uma avaliação do tipo “melhor/pior”, ver eq. (1).  $\bar{P}_i$  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.

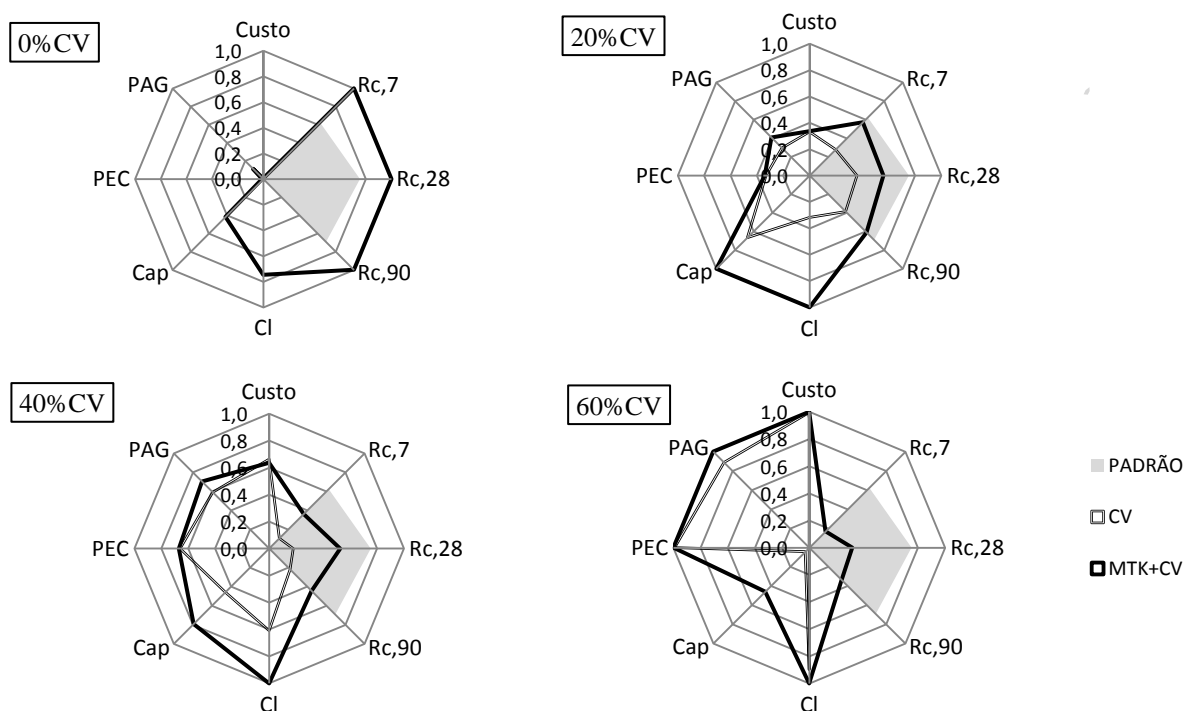


Figura 7 - Diagramas de desempenho global.

$$\bar{P}_1 = \frac{P_1 - P_{*i}}{P_i^* - P_{*i}} \forall i \quad (1)$$

Materiais	PEC		PAG	
		[kWh/kg]		[g/kg]
Clínquer (a)	1.194		1000	
Calcário (a)	0.0127		32	
MTK (b)	0.82		175	
CV (a)	0.0093		4	
M (c)	0.025		3	
A (c)	0.31		5	

(a) Jones (2011); (c) Isaia (2004)  
(b) Cassagnabère (2010)

Indicador	Parâmetro	Peso	Peso
		Parâm.	Indic.
Ambiental	Energia primária incorp. (PEC)	0.75	0.30
	Potência de aquec. global (PAG)	0.25	
Funcional	Res. compressão, 7 dias (Rc,7)	0.20	0.50
	Res. compressão, 28 dias (Rc,28)	0.25	
	Res. compressão, 90 dias (Rc,90)	0.15	
	Difusão dos cloretos (Cl)	0.20	
	Coeficiente de capilaridade (Cap)	0.20	
Económico	Custo dos materiais (Custo)	1.00	0.20

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.

Para facilitar uma análise global, combinaram-se os resultados em 3 indicadores principais: funcional, ambiental e económico, ver eq. (2) e Quadro 5. Com estes indicadores foi possível calcular notas sustentáveis, atribuindo diversos pesos  $w_{Gi}$ , de acordo com o grau de representatividade adequado para cada indicador. Na Figura 8 (esq.), apresentam-se as notas de sustentabilidade com os pesos de 30% para o ambiente, 50% para a funcionalidade e 20% para a economia. Poderá facilmente verificar-se que para estas proporções, as misturas ternárias apresentam notas de sustentabilidade (NS) elevadas.

$$NS = w_{G1} \cdot I_{funcional} + w_{G2} \cdot I_{ambiental} + w_{G3} \cdot I_{económico} \quad (2)$$

Como a ponderação apresenta sempre algumas dificuldades, poderá finalmente efectuar-se um gráfico de 3 entradas, uma para cada indicador, onde ficará realçado a composição com a melhor NS para cada combinação de pesos. Poderá verificar-se que as composições ternárias apresentam para quase todas as combinações, melhor NS, o que indicia um excelente comportamento ao nível da sustentabilidade.

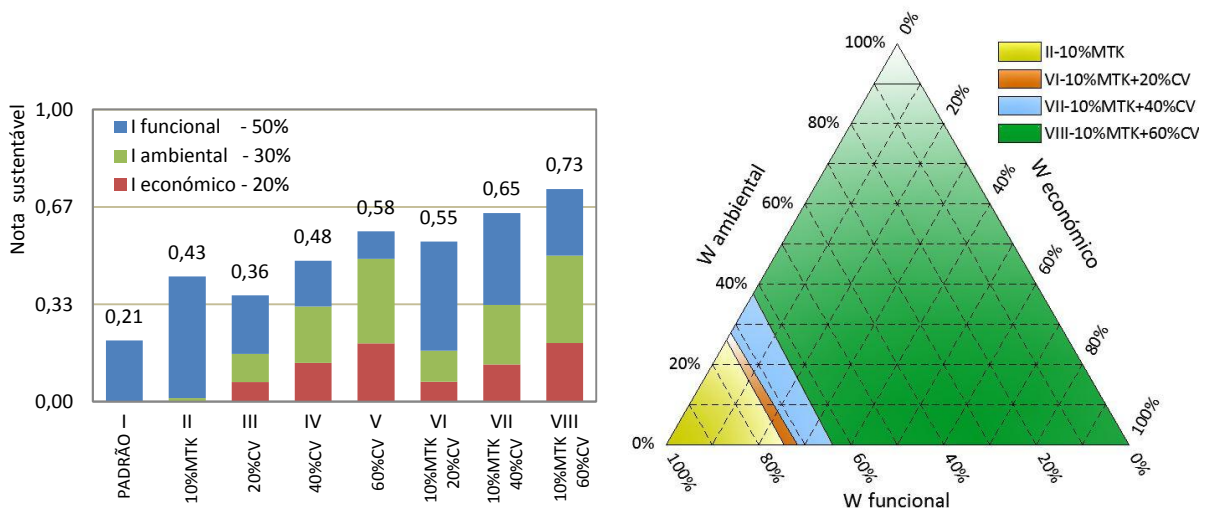


Figura 8 - Nota sustentável (esq.) e desempenho global para 50% de substituição (dir).

## 5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos conclui-se 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 incorporar ainda menos cimento nas misturas e, ao mesmo tempo, aumentar o período de vida do betão, logo potenciar uma construção mais eficiente, mais ecológica e mais sustentável.

## 5. REFERÊNCIAS

EN 1015-3 - Methods of test for mortar for masonry. Part 3: determination of consistence of fresh mortar (by flow table). Brussels: CEN, 2004.

Camões, A.; Aguiar, J.; Jalali, S. - Estimating compressive strength of concrete by mortar testing. Proceedings of INCOS 05. Portugal, 2005. p. 121-127.

Camões, A. - Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes. Universidade do Minho, Tese de Doutoramento, 2002.

Cassagnabère, F., Lachemi, M., Escadeillas, G., Mouret, M., Broilliard, P., Joorabchian, M. S., et al. (2010). Flash metakaolin/slag/cement binder: An environmental and performant alternative for steam-cured mortar for precast use. 2010 Annual Conference of the Transportation Association of Canada Halifax, Nova Scotia. Daczko, J. - Mortar testing for estimating strength. Concrete International, ACI. 1999. p. 63-67.

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.

Ferraz, E.; Gomes, C.S.F.; Wyszomirski, P. - Kaoliny północno-zachodniej. MATERIAŁY CERAMICZNE 2/2008. s.l. : SUROWCE, 2008.

Isaia, G., & Gastaldini, A. (2004). Perspectivas ambientais e económicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso. Ambiente Construído. Porto Alegre, Brasil. Jones, R., McCarthy, M., & Newslands, M. (2011). Fly ash route to low embodied CO2 and implications for concrete construction. 2011 World of Coal Ash (WOCA) Conference. Denver, CO, USA.

LNEC E 64 - Cimentos: determinação da massa volúmica. LNEC, 1979.

LNEC E 463 - Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário. LNEC, 2004.

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.

Metha, P.K.; Monteiro, P.J.M. - Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 3ª ed. IBRACON. Brazil, 2008. p. 77-234.

NP EN 196-1 - Métodos de ensaios de cimentos. Parte 1: determinação das resistências mecânicas. Instituto Português da Qualidade, 2006.

NP EN 196-3 - Métodos de ensaio de cimentos. Determinação do tempo de presa e da expansibilidade. Instituto Português da Qualidade, 1990.

NP EN 196-6 - Métodos de ensaio de cimentos. Determinação da finura. Instituto Português da Qualidade, 1990.

NP EN 450-1 - Cinzas volantes para betão. Parte1: definições, especificações e critérios de conformidade. Instituto Português da Qualidade, 2006.

Pinto, A.T. - Sistemas ligantes obtidos por activação alcalina. Universidade do Minho, Tese de Doutoramento, 2004.

Reis, R. – Betões eco-eficientes com cinzas volantes e metacaulino. Universidade do Minho, Dissertação de Mestrado, 2009.

Ricardo Mateus; Luís Bragança – Tecnologias construtivas para a sustentabilidade da construção. Edições Ecopy. Porto. 2006.

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.

Torgal, 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, 2005.