

Betão eco-eficiente com reduzido teor de cimento

Aires Camões¹

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

RESUMO

Com o objectivo de contribuir para a sustentabilidade da construção, urge reduzir a produção e o conseqüente consumo de cimento. Contudo, esta diminuição não deve comprometer o desempenho das estruturas de betão, de forma a garantir a manutenção de períodos de vida útil suficientemente alargados. Assim, a substituição de elevados volumes de cimento por adições, nomeadamente subprodutos industriais, como é o caso das cinzas volantes, será extremamente benéfica sob o ponto de vista ecológico e ambiental. No entanto, os betões com elevado volume de cinzas volantes apresentam alguns inconvenientes que têm impedido a generalização da sua utilização: desenvolvimento de resistências mais lento e reduzidas resistências em idades jovens; maior sensibilidade à cura; elevada retracção plástica; redução da resistência à carbonatação. De modo a impedir ou minimizar estes factores adversos, propõe-se incorporar no betão de elevado volume de cinzas volantes outras adições minerais que corrijam os principais inconvenientes associados à substituição dos elevados volumes de cimento por cinzas volantes.

Assim, desenvolveu-se um programa experimental com o objectivo de caracterizar o desempenho de misturas ternárias com elevado volume de cinzas volantes e incorporação de metacaulino. Neste trabalho apresentam-se as principais vantagens e inconvenientes da utilização simultânea das duas adições, cinzas volantes e metacaulino, que poderão originar características de desempenho muito interessantes mesmo com elevados volumes de substituição de cimento. A sinergia resultante destas misturas ternárias demonstrou desempenhos muito promissores, possibilitando grandes volumes de substituição de 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.

1. INTRODUÇÃO

Quer sob o ponto de vista ambiental quer sob o ponto de vista da durabilidade, o segundo material mais consumido pelo homem, só superado pela água, o betão, pode e deve ser aperfeiçoado. Para tal, composições com pouco cimento e elevado volume de adições apresentam um elevado potencial e um vasto campo de aplicação. No entanto, a normalização

¹ Professor Auxiliar (aires@civil.uminho.pt)

em vigor é conservadora e restringe o uso deste tipo de betão, capaz de ser uma importante mais-valia por poder aumentar a vida útil das estruturas e poder contribuir significativamente para a sustentabilidade da construção.

Recentemente, a União Europeia aprovou a “estratégia 2020” que prevê o cumprimento, em matéria de clima e energia, das metas 20-20-20. Entre outras medidas, pretende-se reduzir as emissões de gases com efeito de estufa em 2020 para, pelo menos, níveis 20% abaixo dos de 1990, que 20% da energia provenha de energias renováveis e que a eficiência energética seja melhorada em 20%. Neste contexto, é necessário que a indústria da construção, designadamente o sector do betão, contribua para este desiderato. Mais ainda, é sabido que o objectivo de manter o aumento da temperatura global inferior a 2 °C em comparação com os níveis pré-industriais até 2050 só poderá ser alcançado com um esforço adicional e que as metas 20-20-20 são apenas um primeiro passo para tal.

A produção anual mundial de betão é de cerca de 25.000 milhões de toneladas e o betão contém cerca de 12% de cimento, cuja produção anual mundial ronda 3.000 milhões de toneladas. Como a produção de 1 tonelada de cimento portland liberta cerca de 1 tonelada de CO₂, esta indústria contribui com cerca de 7% do total de emissões de gases com efeito de estufa. Outro impacto ambiental adverso está relacionado com o muito elevado consumo de energia no processo de fabrico do cimento, que é apenas superado pela produção de alumínio e de aço, atingindo valores próximos de cerca de 4 GJ por tonelada, (Malhotra e Mehta (2002)).

No entanto, os problemas ambientais referidos não são os únicos com que a indústria da construção se depara. O acréscimo substancial do volume de construção das últimas décadas e a insuficiente durabilidade de um número elevado de estruturas de betão armado provocou uma apreciável diminuição de recursos naturais não renováveis existentes.

Portanto, é urgente diminuir o consumo de cimento portland, promovendo a sua substituição por materiais alternativos mais amigos do ambiente e capazes de originar betões mais duráveis. Para tal, o aumento do emprego de subprodutos pozolânicos deve ser encorajado (Malhotra e Mehta (2002)).

O betão, devido à enorme quantidade utilizada, é, também, um dos veículos ideais para a incorporação segura e económica de grandes volumes de resíduos e subprodutos industriais, como é o caso das cinzas volantes (CV). Assim, a substituição de grandes quantidades de cimento por CV é altamente vantajosa sob o ponto de vista económico, da eficiência energética, da durabilidade e dos benefícios ecológicos e ambientais em geral (Malhotra e Mehta (2002)).

A produção mundial de cinzas de carvão é estimada em mais de 1200 milhões de toneladas por ano, das quais pelo menos 75% (cerca de 900 milhões de toneladas) são CV, que são adequadas e podem ser usadas como adição pozolânica em betões ou outros produtos de cimento. Infelizmente, apenas aproximadamente 20% das CV disponíveis mundialmente são utilizadas para o fabrico de cimento e de betão. Em 2020, estima-se que a produção mundial anual de CV atinja os 2.000 milhões de toneladas (Malhotra (2006)).

Portugal dispõe em funcionamento de apenas duas centrais termoeléctricas cujo combustível é o carvão: em Sines e no Pego. A produção anual de CV em Portugal no ano de 2008 atingiu cerca de 500.000 toneladas. Actualmente quase todas as CV produzidas são reutilizadas pela indústria do cimento e do betão, que chega mesmo a importar CV de Espanha. De acordo com a informação da *Tejo Energia*, a central do Pego, em 2008, produziu cerca de 152.000 toneladas de CV, das quais 91% foram reutilizadas, na sua grande maioria pela indústria do betão.

Contudo, a situação em Espanha é diferente da de Portugal. Em Espanha estão em funcionamento 19 centrais termoeléctricas a carvão, cuja produção é, actualmente, cerca de 8

milhões de toneladas, das quais aproximadamente 40% não são aproveitadas, sendo armazenadas em aterro (Catálogo de Resíduos (2009)).

Neste contexto, e de modo a assegurar um desenvolvimento sustentável da indústria do betão, o emprego de subprodutos pozolânicos e cimentícios deve ser encorajado e substancialmente aumentado (Malhotra e Mehta (2002)). Uma maior reutilização de cinzas volantes na indústria do betão, associada a uma substituição elevada da dosagem de cimento contribuirá, certamente, para a redução de um importante problema de impacte ambiental.

As características mecânicas e a durabilidade dos betões com elevado volume de CV (BEVCV) foram já parcialmente avaliadas (Malhotra e Mehta (2002), Sirivivatnanon, Tam e Ho (2003), Burden (2006) e Camões (2006)) e a bibliografia documenta alguns exemplos de aplicações práticas (Sirivivatnanon, Tam e Ho (2003), Bilodeau e Seabrook (2001) e Langley (2001)). De acordo com Camões (2006) os requisitos de projecto relacionados com as características mecânicas serão facilmente alcançados com este tipo de betão e com a sua adopção será possível construir estruturas mais duráveis, contribuindo significativamente para a sustentabilidade da construção.

Contudo, os BEVCV apresentam alguns inconvenientes: desenvolvimento de resistências mais lento e reduzidas resistências em idades jovens; maior sensibilidade à cura; elevada retracção plástica; redução da resistência à carbonatação.

Neste contexto, propõe-se incorporar no betão, para além de uma elevada quantidade de CV, outras adições minerais que impeçam ou minimizem estes factores adversos.

O metacaulino (MtK) apresenta propriedades ambientais muito interessantes e a validade da sua incorporação em betões encontra-se comprovada (Justice (2005), Badogiannisa et al (2004), Fernandes (2004), Kosmatka, Kerkhoff e Panarese (2003) e Nawy (1996)). Assim, espera-se que a adição cumulativa de MtK em BEVCV possa compensar a reduzida resistência em idades jovens. No entanto, há muito pouca informação disponível sobre BEVCV com incorporação de MtK (Xiaosheng et al (2007)).

Nestas circunstâncias, desenvolveu-se um programa experimental com o objectivo de caracterizar o desempenho de misturas ternárias com elevado volume de CV e incorporação de MtK. Os ensaios foram realizados em provetes de argamassa devido às vantagens óbvias associadas à sua utilização, e que podem ser resumidamente condensadas no decréscimo substancial de mão-de-obra necessária à realização deste trabalho experimental, e porque é possível extrapolar os resultados obtidos para betões equivalentes (Camões, Aguiar e Jalali (2005), Camões (2002) e Daczko (1999)). Assim, este trabalho pretende contribuir para um aumento do conhecimento acerca de betões eco-eficientes, e não de argamassas.

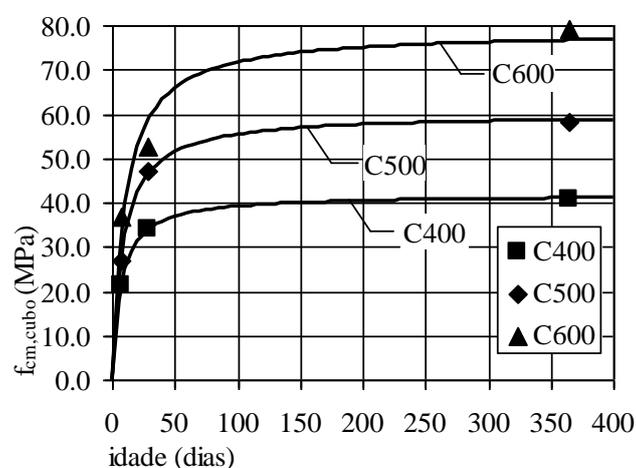
2. BETÃO DE ELEVADO VOLUME DE CINZAS VOLANTES

Segundo Malhotra (2002) um BEVCV é, em geral, caracterizado por conter: uma percentagem de substituição de cimento por CV, no mínimo, de 50 a 60% (em massa e relativa ao total de materiais cimentícios); um baixo teor de água, geralmente inferior a 130 L/m^3 ; teor de cimento não superior a 200 kg/m^3 , mas, geralmente, próximo de 150 kg/m^3 ; e baixa relação água / ligante, geralmente inferior a 0.35.

Segundo Malhotra e Ramezianpour (1994) o BEVCV é dotado de uma resistência mecânica adequada, tanto em idades iniciais como, principalmente, a longo prazo. No entanto, outros autores (Gillies (2001)) referem que determinados BEVCV desenvolvem resistências mecânicas reduzidas aos 3 e aos 7 dias de idade mas atingem, a longo prazo, resistências elevadas desde que devidamente curados e conservados. Além disso, a experiência mostra que a construção mais rápida não é sempre a menos dispendiosa; betão de má qualidade, com ninhos de brita e elevada fissuração muitas vezes requer reparações dispendiosas e resulta em litigação; estruturas mal construídas têm maior tendência a deteriorar-se mais rápido,

especialmente quando expostas em ambientes agressivos. Assim, os donos de obra devem ponderar cuidadosamente os custos associados ao garantir do tempo de vida útil da estrutura e não só os custos iniciais.

A resistência à compressão deste tipo de betão será, obviamente, diferente, dependendo dos materiais e proporções utilizadas, mas é possível generalizar, que os BEVCV aos 28 dias de idade apresentam resistências próximas de 35 MPa e aos 91 dias de cerca de 45 MPa (Burden (2006)). Resultados obtidos por Camões (2006) e apresentados na Figura 1 indicam que betão com cerca de 35 MPa de resistência à compressão aos 28 dias de idade pode ser produzido usando 160 kg/m^3 de cimento e 400 kg/m^3 de ligante, o que é suficiente para a maioria das aplicações estruturais de betão armado. Além disso, o autor salienta que este tipo de betão também pode ser usado quando é necessária maior resistência à compressão. O CANMET relata, também, que BEVCV pode ser usado para aplicações onde é requerida alta resistência (Burden (2006), Bilodeau e Seabrook (2001)).



Composição	A/L	C (kg/m^3)	CV (kg/m^3)	Areia (kg/m^3)	Brita (kg/m^3)
C400	0.27	160	240	780	1170
C500	0.23	200	300	731	1097
C600	0.20	240	360	685	1027

Figura 1 – Evolução com o tempo da resistência à compressão média ($f_{\text{cm,cubo}}$) (Camões (2006)).

Esses betões aparentam ser altamente duráveis, uma vez que mostram reduzida permeabilidade ao gás e à água, reduzida absorção capilar, elevada resistência à penetração de cloretos, baixo calor de hidratação e reduzida retracção por secagem (Burden (2006), Camões (2006) e Malhotra e Mehta (2002)). Mehta (2004) refere que a adição de grandes volumes de CV em betão reduz a exigência de água, melhora a trabalhabilidade, minimiza a fissuração associada à retracção térmica e à de secagem, aumenta a resistência à corrosão das armaduras, ao ataque por sulfatos, e diminui a expansão devida à reacção álcalis-agregado. Neste tipo de betão, espera-se que a redução da permeabilidade compense qualquer redução marginal do pH, devido à grande quantidade de adições minerais presentes na composição (Malhotra (2002), Malhotra e Mehta (2002)). No entanto, é bem conhecido e aceite que a profundidade de penetração devida à carbonatação aumenta com o acréscimo do teor de CV (Burden (2006), Jiang, Lin e Cai (2000)), porque a taxa de carbonatação do betão é uma função, entre outros, da massa de hidróxido de cálcio (CH) disponível para a reacção (Burden (2006), Joshi e Lohtia (1997)). De facto, como a permeabilidade do betão é reduzida pela adição de CV, é previsível que se torne mais difícil ao CO_2 penetrar no betão. No entanto, as CV reduzem a

permeabilidade ao reagir com o CH e esta reacção reduz a quantidade de material disponível para reagir com o CO₂. Portanto, menor quantidade de CO₂ tem de penetrar para despassivar o betão.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. Materiais, fabrico e conservação

As misturas testadas apresentam-se na Tabela 1. O cimento (C) utilizado foi um CEM II / 32.5N BL produzido pela Cimpor, o MtK (resultante da cozedura a cerca de 750/800°C de caulino extraído em Barqueiros, no Concelho de Barcelos) foi fornecido pela Mibal e as CV foram provenientes da central termoeléctrica do Pego e apresentavam um teor de inqueimados elevado. Segundo dados fornecidos pelo fabricante, a perda ao fogo destas CV varia, em geral, entre 6% e 9%. O teor de inqueimados das CV utilizadas neste trabalho foi determinado experimentalmente e atingiu o valor médio de 7.3%, o que permite enquadrar este material na categoria C da EN 450:2005.

O teor de ligante é considerado como a soma de cimento e adições minerais usados ($L = C + CV + MtK$), W representa a água adicionada e SP o superplastificante (copolímero de 3ª geração disponível comercialmente).

Tabela 1 – Composições estudadas.

Mistura	Nome	Materiais						
		L [kg/m ³]	C [%]	MtK [%]	CV [%]	M [kg]	W/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 (EN 1015-3:2004).

No estado endurecido, a resistência mecânica foi avaliada à compressão de acordo com a EN 196-1:2006. A determinação da resistência à compressão foi efectuada aos 3, 7, 14, 21, 28 e 90 dias de idade com recurso ao ensaio de metades provenientes do ensaio de flexão, tendo-se utilizado uma série de 6 provetes de 40x40x(±80) mm³. Em algumas composições foi ainda possível avaliar a resistência aos 270 dias. Para avaliação dos indicadores de durabilidade realizaram-se ensaios de migração de cloretos em regime não estacionário (LNEC E463:2004), 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, para cada amassadura, nas idades de 7, 14, 21, 28 e 90 dias. O período de leituras foi realizado a intervalos regulares crescentes 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 atingir os 90 dias. Para a determinação do coeficiente de absorção capilar apenas foram utilizadas as primeiras quatro horas de ensaio.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1. Trabalhabilidade

O ensaio de espalhamento, utilizado para medir a trabalhabilidade das composições, forneceu os resultados expressos na Figura 2.

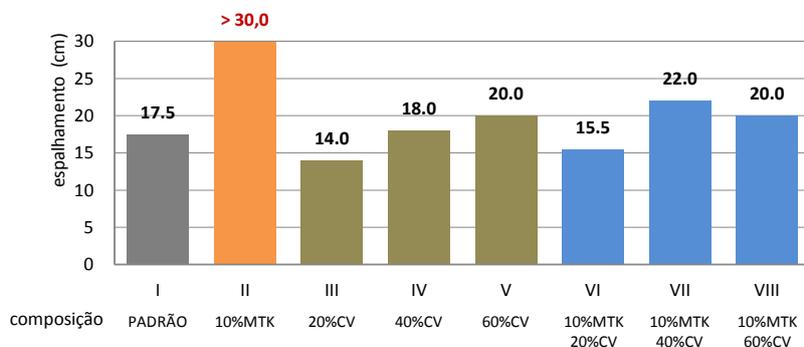


Figura 2 – Trabalhabilidade: resultados dos ensaios de espalhamento.

Este ensaio forneceu alguns valores atípicos para as composições com MtK porque foi necessário recorrer à utilização de um superplastificante em algumas dessas amassaduras. A utilização deste adjuvante deveu-se às dificuldades verificadas na fase inicial do processo de mistura. Sabe-se que a presença de MtK torna, em geral, as misturas mais secas e menos moldáveis, devido à maior superfície específica e, conseqüentemente maior consumo de água (Pinto (2004)). No entanto, esta dificuldade pode, e foi, facilmente contornada com o recurso à incorporação de um superplastificante, levando até, no caso concreto, a um espalhamento muito elevado na composição II (10%MtK).

Em pequenas percentagens de substituição do cimento por adição de MtK (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 CV origina pastas de trabalhabilidade crescente em função da quantidade de CV. Na prática, poderá dizer-se que estas duas adições são complementares, pois as CV proporcionam um efeito mitigador desta grande desvantagem da utilização do MtK (trabalhabilidade).

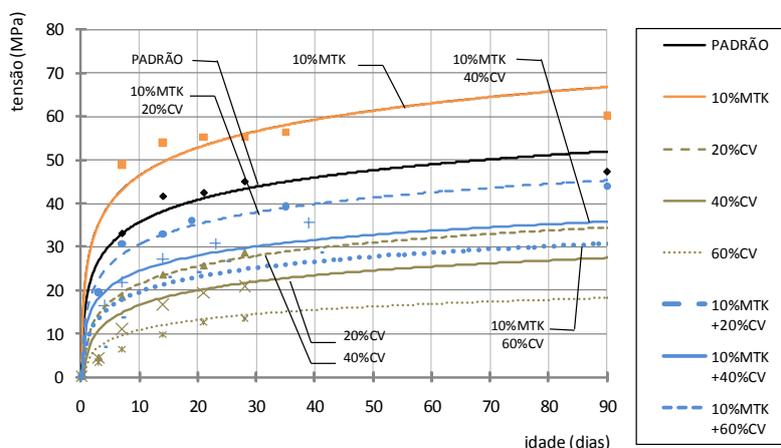


Figura 3 – Evolução da resistência à compressão até aos 90 dias.

4.2. Resistência à compressão

Na Figura 3 apresenta-se a evolução da resistência à compressão obtida nos ensaios realizados, desde os 3 aos 90 dias de idade.

Contrariamente às CV, o MtK potencia as resistências em todas as idades. Este, ao contrário das CV, reage muito mais rapidamente com o CH proveniente da reacção de hidratação do cimento e conduz a resistências iniciais elevadas. Perante os resultados obtidos, a responsabilidade da resistência, numa primeira fase, aparenta ser do MtK, e, numa fase mais adiantada, à medida que as CV reagem lentamente com o CH, das CV.

Na Figura 4, ilustrativa da resistência à compressão obtida aos 28 e 90 dias de idade, fica bem patente este facto verificando-se que, com a incorporação de 10% de MtK, os valores face às composições binárias (apenas com cimento e CV) foram substancialmente corrigidos relativamente à composição padrão. Fica, no entanto, a dúvida se a introdução de MtK acelera as reacções das CV, 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 MtK, sendo um material muito mais fino e reactivo, poderá, também, ter um papel predominante.

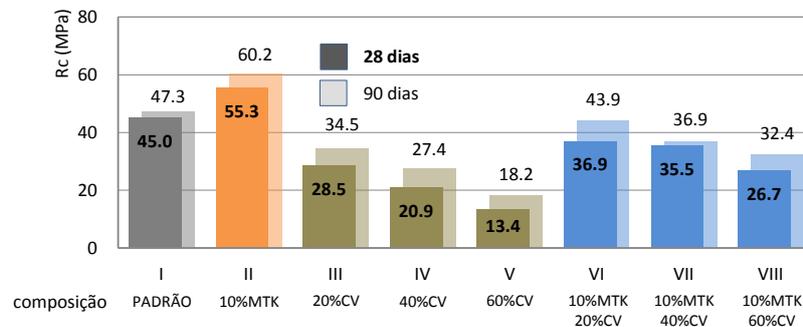


Figura 4 – Resistência à compressão aos 28 e 90 dias de idade.

4.3. Indicadores de durabilidade

Na Figura 5, apresentam-se os resultados dos ensaios de determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração.

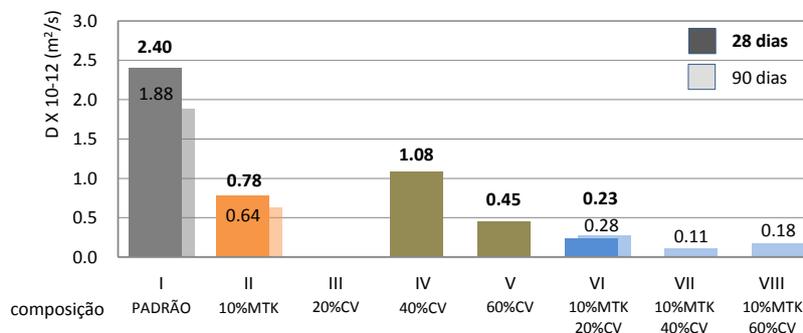


Figura 5 – Coeficiente de difusão dos cloretos por migração (D).

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que a composição padrão é a que apresenta pior comportamento, o que corresponde ao esperado uma vez que as CV diminuem

a quantidade de cloretos livres (Camões (2002)). Os resultados obtidos permitiram salientar o elevado potencial que a incorporação de MtK proporciona face às CV: são necessárias substituições com mais de 40% de CV para se conseguir um resultado semelhante ao determinado nas misturas com MtK. Neste seguimento, verifica-se que as composições ternárias (VI, VII e VIII) evidenciam ganhos acrescidos pela presença do MtK.

No que concerne ao coeficiente de absorção capilar aos 28 dias (Figura 6), verifica-se que a composição padrão (I) atinge valores superiores ao das restantes, o que está de acordo com o esperado. No que diz respeito às composições com CV, 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. Grande parte das CV 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 delas. O MtK sendo um material muito mais fino e reactivo do que as CV, 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 que será aproximadamente a soma das eficiências das adições. Este efeito sinérgico do MtK com as CV resulta num material muito mais eficiente.

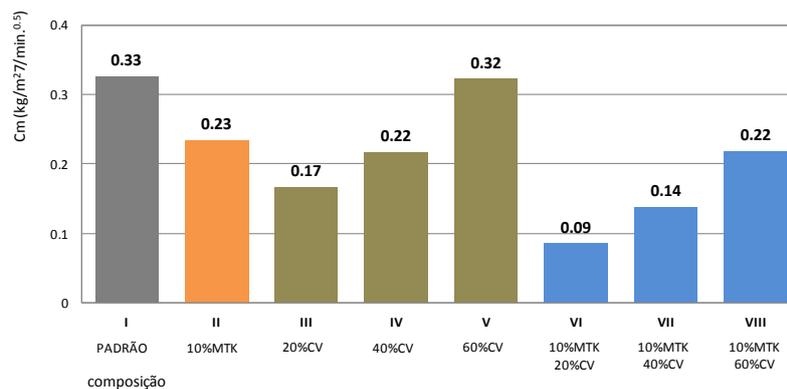


Figura 6 – Coeficiente de absorção capilar (C_m) aos 28 dias de idade.

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 MtK (Lourenço, Ferraz e Coroadó (2005)), tendo considerado para o preço das CV, um valor cerca de quatro vezes mais baixo que o cimento, e o preço do MtK idêntico ao do cimento. Para a areia foi utilizado o preço constante de um estudo sobre considerações económicas de betões no mercado de carbono (Torgal, Castro-Gomes e Jalali (2005)).

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 e os resultados apresentam-se na Figura 7. Sabe-se que o custo destas composições com CV é menor que o da mistura padrão (Reis (2009)), mas numa análise qualitativa, poderá dizer-se que as CV apresentam um fraco desempenho custo/resistência, pelo menos em idades até aos 90 dias. Este facto era de esperar uma vez que a reactividade das CV se revelou reduzida e muito

lenta, mas poderá ser compensado com o decorrer do tempo tal como o verificado por Camões (2002). O que é interessante é verificar que para incorporações de CV até 60%, o MtK corrigiu todas as composições binárias estudadas.

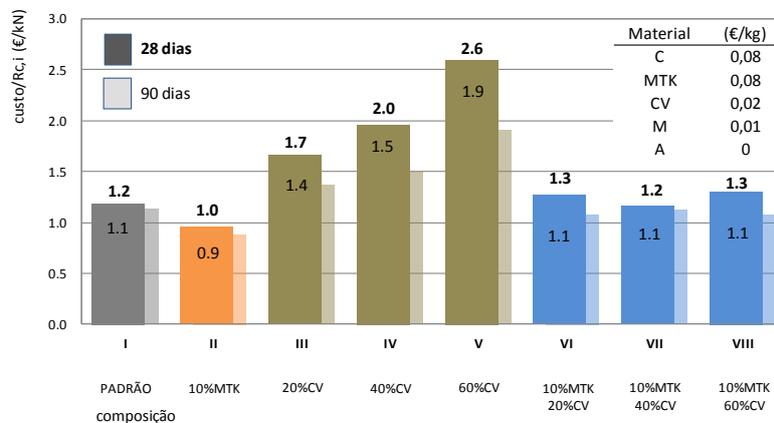


Figura 7 – Análise custo/benefício em função da resistência à compressão aos 28 e 90 dias.

Saliente-se que a relação custo/benefício aqui apresentada é a mais gravosa para as misturas com elevado volume de adições. Isto porque, se forem considerados os indicadores de durabilidade, a diferença acentua-se significativamente a favor das adições.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos conclui-se que é possível produzir betões eco-eficientes com elevados volumes de substituição de cimento por CV, e com incorporação de MtK, 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 MtK actua como um factor corrector ou regulador do desempenho mecânico das CV, nomeadamente nas idades mais jovens, obviando, assim, as grandes desvantagens do uso de elevados volumes de CV em betões.

Assim, a incorporação de MtK poderá ser particularmente interessante numa perspectiva de correcção do comportamento mecânico, quando se está perante elevadas substituições de cimento por outras adições pozolânicas pouco reactivas.

6. REFERÊNCIAS

- Badogiannisa, E., Papadakis, V.G., Chaniotakis, E. e Tsvivilis, S., Exploitation of Poor Greek Kaolins: Strength Development of Metakaolin Concrete and Evaluation by Means of k-value, *Cement and Concrete Research*, 34, 1035–1041 (2004).
- Bilodeau e Seabrook, P. T., *Recent Applications of High-Volume Fly Ash Concrete in Canada*, MTL/CANMET internal report (2001).
- Burden, D., *The Durability of Concrete Containing High Levels of Fly Ash*, MSc Thesis, University of New Brunswick, PCA R&D Serial No. 2989, U.S.A. (2006).
- Camões, A., Aguiar, J. e Jalali, S. Estimating Compressive Strength of Concrete by Mortar Testing, *Proceedings of INCOS 05*, 121-127, Portugal (2005).
- Camões, A., Durability of High Volume Fly Ash Concrete, *International RILEM Workshop*, Madrid, Spain, 311-318 (2006).

- Camões, A., *Betões de Elevado Desempenho com Incorporação de Cinzas Volantes*, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Portugal (2002).
- Catálogo de Resíduos, *Cenizas Volantes de Carbón y Cenizas de Hogar o Escórias*, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Ministerio de Fomento, Ministerio de Medio Ambiente, España (2009).
- Daczko, J., Mortar Testing for Estimating Strength, *Concrete International*, ACI: 63-67 (1999).
- Fernandes, J.M., *Betão Eco-eficiente de Elevado Desempenho Incorporando Metacaulino*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Portugal (2004).
- Gillies, V., *The EcoSmart Concrete Project: Results from the Case Studies*. Report prepared for the EcoSmart Concrete Project Steering committee (2001).
- Jiang, L., Lin, B. e Cai, Y., A Model for Predicting Carbonation of High-Volume Fly Ash Concrete, *Cement and Concrete Research*, 30: 699-702 (2000).
- Joshi, R.C., e Lohtia, R.P., Fly Ash in Concrete – Production, Properties and Uses, *Advances in Concrete Technology*, Volume 2 (1997).
- Justice, J.M., *Evaluation of Metakaolins for Use as Supplementary Cementitious Materials*, MSc Thesis, Georgia Institute of Technology, U.S.A. (2005).
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B. e Panarese, W., Design and Control of Concrete Mixtures, *Portland Cement Association*, U.S.A. (2003), in CD-rom.
- Langlely, Practical Uses of HVFAC Utilizing a Low Calcium Fly Ash, *Seminar on Durability and Sustainability of Concrete Through The Use of Fly Ash, Silica Fume and Superplasticizers*, Texas, U.S.A. (2001).
- Lourenço, J.F., Ferraz, E.J.M.O. e Coroado, J.P.P.F., Metodologia para a Determinação das Vantagens de Argamassas sob efeito Pozolânico de Metacaulinos, *1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção*, p. 2-3, (2005).
- Malhotra, V.M., Role of Fly Ash in Reducing Greenhouse Gas Emissions During the Manufacturing of Portland Cement Clinker, *Advances in Concrete Technologies in The Middle East*, Dubai (2006).
- Malhotra, V.M. e Mehta, P.K., *High Performance, HVFAC: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice, and Case Histories*, CANMET, Ottawa, Canada (2002).
- Malhotra, V.M. e Ramezaniyanpour, A.A., *Fly Ash in Concrete*, 2nd Ed., CANMET, Ottawa, Canada (1994).
- Malhotra, V.M., High-Performance HVFAC, *Concrete International*, ACI, Vol. 24, No. 7: 30-34 (2002).
- Metha, P.K., High-Performance, HVFAC for Sustainable Development, *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*: 3-14, China (2004).
- Nawy, E., *Fundamentals of High Strength High Performance Concrete*, Longman, England (1996).
- Pinto, A.T., *Sistemas Ligantes Obtidos por Ativação 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).
- Sirivivatnanon, Tam e Ho, Special Concrete and Applications, chapter of *The Civil Engineering Handbook*, 2nd Ed, Chen and Liew Ed., CRC Press (2003).
- Torgal, F.P., Castro-Gomes, J.P. e Jalali, S., Cimento Portland Versus Ligantes Geopoliméricos: Considerações Económicas sobre as Implicações do Mercado do Carbono, *Engenharia' 2005 Inovação e Desenvolvimento*, Universidade da Beira Interior (2005).
- Xiaosheng, W., Hongping, Z., Guowei, L., Changqing, Z. e Lianzhen, X., Properties of HVFAC Compensated by Metakaolin or Silica Fume, *Journal of Wuhan University of Technology – Materials Science Ed.*, China, Vol. 22, No. 4, 728-732 (2007).