

## **Betão auto-compactável eco-eficiente de reduzido teor em cimento com incorporação de elevado volume de cinzas volantes e metacaulino**

Marcos A. S. Anjos<sup>1a</sup>, Aires Camões<sup>2b</sup> e Carlos Jesus<sup>2c</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Construção Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Campus-Natal, Tirol, P – 59056-000 Natal, RN, Brasil

<sup>2</sup>C-TAC, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

[a](mailto:marcos.anjos@ifrn.edu.br)[marcos.anjos@ifrn.edu.br](mailto:marcos.anjos@ifrn.edu.br); [b](mailto:aires@civil.uminho.pt)[aires@civil.uminho.pt](mailto:aires@civil.uminho.pt); [c](mailto:cjesus@civil.uminho.pt)[cjesus@civil.uminho.pt](mailto:cjesus@civil.uminho.pt)

**Palavras-chave:** Betão eco-eficiente, cinzas volantes, adições minerais, cal.

**Resumo.** A produção de betão assume um papel muito importante na indústria da construção uma vez que mais de 10 biliões de toneladas são produzidas anualmente, sendo a indústria do cimento responsável pela emissão de cerca de 7% das emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Portanto, a produção de betões auto-compactáveis (BAC) eco-eficientes, contendo baixos teores de cimento na sua formulação, contribuirá para a sustentabilidade das construções devido à redução do uso de cimento portland, ao aproveitamento de resíduos industriais, para além da minimização da energia necessária para a sua colocação e compactação. Neste contexto, o presente trabalho pretende avaliar a viabilidade da produção de BAC com baixos teores de cimento através da determinação das propriedades no estado fresco e endurecido de betões com elevado volume de cinzas volantes (CV) e metacaulino (MK). Para tanto foram formuladas 6 composições de betões tendo como base duas referências fabricadas com 300 e 500 kg/m<sup>3</sup> de cimento, sendo analisada a sua substituição por: 60% de CV e 50% de CV mais 20% de MK, além da adição de cal hidratada nestes dois traços com adições. Para avaliar a auto-compactabilidade foram realizados testes de espalhamento, T<sub>500</sub>, Anel-J, Funil-V e Caixa-L, tendo sido determinada a resistência à compressão aos 3, 7, 14, 21 e 28 dias. Os resultados mostraram que é possível produzir BAC com baixos teores de cimento através do recurso a elevados teores de adições minerais, atendendo aos requisitos reológicos para a auto-compactabilidade, com resistências moderadas de 25 a 30 MPa.

### **Introdução**

O betão auto-compactável deve atender a características rigorosas de coesão, habilidade passante e de preenchimento, sem o uso de vibração mesmo em estruturas densamente armadas. Para isto é imprescindível obter um betão com alta fluidez e estabilidade, sendo necessário compatibilizar as quantidades de aditivos superplastificantes e de finos afim de atender as exigências deste tipo de betão.

O desenho ideal de um betão auto-compactável (BAC) é um compromisso entre dois objectivos conflitantes. Por um lado, BAC tem de ser tão fluido quanto possível para garantir que ele vai encher a cofragem sob o seu próprio peso, mas por outro lado, tem que ser um mistura estável para evitar a segregação de sólidos durante o fluxo [1-2]. O primeiro é assegurada pela utilização de superplastificante e/ou modificadores de viscosidades, enquanto que o último é conseguido através da selecção de uma quantidade apropriada de adições em pó, isto é, cimento e materiais de reposição, normalmente adições minerais, e por um equilíbrio adequado entre os sólidos e líquidos na mistura [3].

A capacidade de auto-compactabilidade do BAC é regida de maneira simultânea pela deformabilidade e resistência à segregação. A deformabilidade depende, essencialmente, de uma

tensão mínima necessária para que o concreto flua e de uma moderada viscosidade, que impede o contacto entre os agregados, evitando o bloqueio, caracterizada pela viscosidade plástica. A resistência à segregação que representa a estabilidade da mistura depende da moderada viscosidade plástica. Essas características descrevem o comportamento reológico dos betões frescos que correspondem, em primeira aproximação, ao modelo plástico de Bingham [4], no entanto ensaios que medem tensão de cisalhamento e viscosidade plástica são de difícil acesso e normalmente impraticáveis para betões em obras, desta forma utiliza-se de medidas indirectas para essas propriedades.

A produção de betão tem papel importante para a sustentabilidade das construções uma vez que mais de 10 bilhões de toneladas são produzidas a cada ano, sendo a indústria de cimento responsável pela emissão de cerca de 7% das emissões de dióxido de carbono para a atmosfera [5].

O estudo de betões eco-eficientes ou betões sustentáveis tem despertado interesse crescente entre as principais publicações recentes sobre o betão, tanto que P. C. Aïtcin questiona se seria possível eliminar o cimento Portland para a produção de betões e responde: “porque não”, com a ressalva que isso não irá acontecer tão breve, mais é possível [6].

Portanto, a produção de betões auto-compactáveis eco-eficientes que utilizam baixos teores de cimento na sua formulação, são importantes aliados para a sustentabilidade das construções devido a redução do uso de cimento Portland, o aproveitamento de resíduos industriais e agro-industriais, redução de ruídos, além da minimização do uso de energia para colocação e compactação.

## Metodologia

**Materiais.** Os betões foram produzidos com cimento Portland CEM I 42.5 (C), cinza volante (CV) classe B de acordo com a NP EN 450-1 [7], metacaulino (Mk), cal hidratada (CH), agregado miúdo e graúdo com dimensões máximas de 4 mm e 16 mm respectivamente, água e um superplastificante a base de policaborxilato (Glenium Sky 27). A tabela 1 e a figuras 1 apresentam a composição química dos materiais constituintes dos betões.

A figura 2 mostra a morfologia da CV onde se verifica as partículas esferas sólidas de sílica em diferentes tamanhos, assim como a presença de plerosferas, características típicas da CV. Os grãos predominantemente esféricos e com diâmetros inferiores ao do cimento utilizado tendem a facilitar a mobilidade do betão auto-compactável [8], assim como a capacidade de retenção de água dos BAC com esse material, reflectida na menor exsudação.

Foram produzidos seis composições de betões, como mostra a tabela 2. A definição destes traços partiu de betões com elevados volumes de cinza volante anteriormente estudados por Camões [2] os quais sofreram algumas adequações em suas composições afim de atender aos critérios de betão auto-compactável.

O teor de argamassa seca da mistura (ARG%), eq. 1, foi o único parâmetro ajustado afim de procurar atender a auto-compactação, pois no trabalho de Camões [2] este teor era de aproximadamente 53% e nos betões auto-compactáveis (BAC) este valor deve variar de 60 a 65%, neste trabalho foi usado um teor de argamassa de 61% para adequação dos traços.

$$ARG \% = \frac{(L+AM)}{(L+AM+AG)} \quad (1)$$

Onde:

L= ligante total; AM = areia; AG= agregado graúdo, referentes ao traço unitário em massa.

O traço com 300 kg de cimento por m<sup>3</sup> de betão (L300) foi produzido apenas para efeito comparativo das propriedades mecânicas deste com os demais betões com elevados teores de adição, portanto não se tem a pretensão de que esta formulação atenda aos critérios de auto-compactação.

Tabela 1: Composição química do cimento (C), da cinza volante CV e do metacaulino (Mk)

Material	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	PF
C (%)	19.92	4.36	3.51	62.92	1.83	2.86	-	-	3.12
CV (%)	48.61	23.79	7.91	3.06	2.07	0.40	0.78	3.78	2.64
Mk (%)	47.00	37.10	1.30	0.10	0.15	-	0.20	2.00	12.75

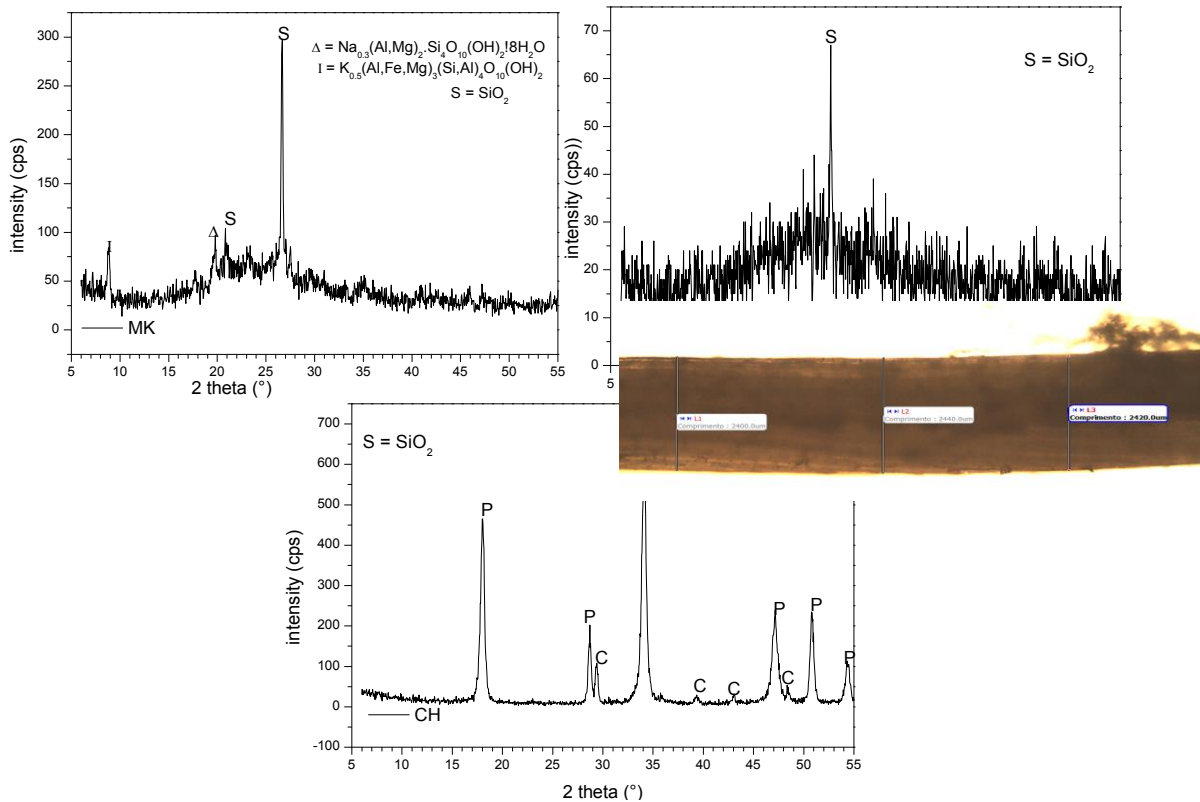


Fig 1. DRX da cinza volante (CV-Es), metacaulino (MK) e cal hidratada (CH)

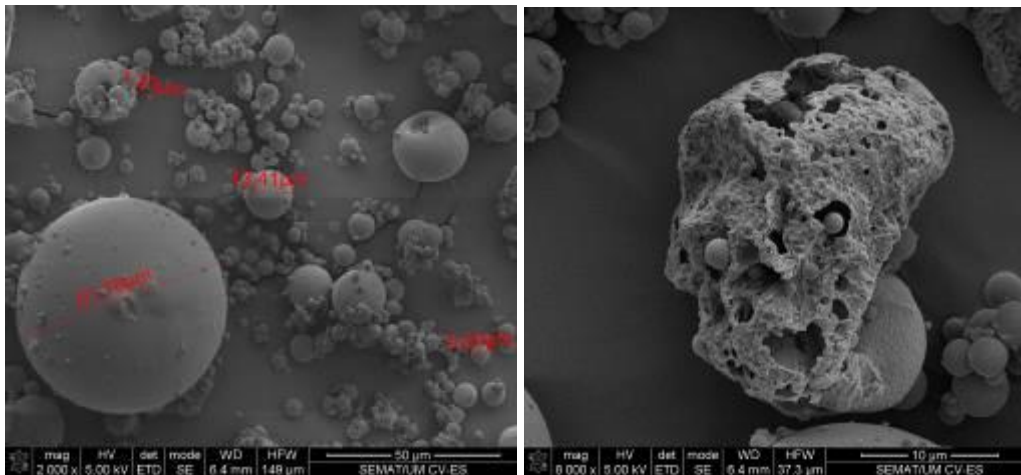


Fig. 2. Microscopia electrónica de varrimento das cinzas volantes

## Métodos

**Estado fresco.** Os betões foram produzidos em misturadores de eixo vertical tendo sido produzido em cada amassadura um volume de 0.087 m<sup>3</sup>. Após a mistura os betões foram testados quanto a adaptação a auto-compactação.

Betões para serem classificados como auto-compactáveis devem atender aos requisitos de fluidez, viscosidade, habilidade passante e resistência à segregação. Neste trabalho foram realizados os testes de slump flow (T500 e espalhamento), J-ring, V-funnel e L-box com 3 barras, figura 3, seguindo as recomendações da EFNARC [9].

Tabela 2: Composições dos betões

	L500	L300	CV	CVCH	CVMK	CVMKCH
Cim (kg/m <sup>3</sup> )	500	300	200	200	150	150
Mtk (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	-	100	100
CV (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	300	300	250	250
CH (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	25	-	25
AM – Agregado Miúdo (kg/m <sup>3</sup> )	870	1053	870	870	870	870
AG - Agregado Graúdo (kg/m <sup>3</sup> )	880	867	880	880	880	880
água (kg/m <sup>3</sup> )	200	180	170	170	170	170
Glenium Sky 27 (kg/m <sup>3</sup> )	13,0	7,8	9	9,6	9,6	12,3
Ligante (CIM+CV+Mtk+CH)	500	300	500	525	500	525
Teor de argamassa do traço	60,9%	60,9%	60,9%	61,3%	60,9%	61,3%



Fig. 3. Testes no estado fresco

O volume de concreto produzido possibilitou a moldagem em uma única mistura de: 45 moldes cúbicos de 100 mm de aresta, 2 moldes cúbicos de 150 mm de aresta, 6 moldes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura e duas vigotas com dimensões de 600x150x700 mm.

**Estado endurecido.** Após a moldagem os provetes foram deixados nos moldes durante dois dias, em seguida foram desmoldados e colocados em cura húmida por imersão em água a uma temperatura de aproximadamente  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , sendo retirados 3 provetes de cada composição após 3, 7, 14, 28 e 90 dias de cura para determinação da resistência à compressão.

## Resultados e discussões

**Parâmetros de dosagem.** A tabela 3 apresenta os parâmetros de dosagem dos traços de betões auto-compactáveis com reduzidos teores de cimento (BAC-RTC) e dos betões tomados como referências (L500 e L300), calculados a partir dos traços descritos na tabela 1, comparando com os parâmetros especificados na EFNARC [9].

Tabela 3: Parâmetros de dosagem dos traços

	Finos (kg/m <sup>3</sup> )	Pasta (l/m <sup>3</sup> )	água (l/m <sup>3</sup> )	AG (kg/m <sup>3</sup> )	AM (% em peso do total de agregados)	Razão água/finos (l/m <sup>3</sup> )
L500	500	360,26	200	880	49,7	1,25
L300	500	276,15	180	867	54,8	1,87
CV	500	358,07	170	880	49,7	0,90
CVCH	525	369,23	170	880	49,7	0,85
CVMK	500	359,84	170	880	49,7	0,90
CVMKCH	525	371,00	170	880	49,7	0,85
<b>EFNARC</b>	<b>380-600</b>	<b>300-380</b>	<b>150-200</b>	<b>750-1000</b>	<b>48-55</b>	<b>0,85-1,1</b>

A definição dos traços de BAC-RTC partiu da premissa de adequação de um traço já estudado em pesquisas anteriores [2], procurando atender apenas o teor de argamassa (60 a 65%), e o teor de finos ( $>500 \text{ kg/m}^3$ ), após os cálculos para encontrar o novo traço, se verificou que com o ajuste do teor de argamassa para 61%, o traço encontrado atendeu a todos os parâmetros de dosagem especificados pela EFNARC em destaque na tabela 2.

Segundo Cuenca et al [10] não há diretrizes fixas ou um método exacto para determinar a composição de betão auto-compactável, embora existam vários critérios de dosagem que podem servir de guia como no caso da EFNARC.

Portanto, os parâmetros de teor de argamassa e de finos podem ser suficientes para definição de traços de betões auto-compactáveis quando associados a qualquer outro método de dosagem, já que o objectivo dos métodos de dosagem é o de garantir que o concreto atenda aos critérios de trabalhabilidade, resistência e durabilidade. No caso dos BAC o critério de trabalhabilidade passa a ser as propriedades de auto-compactação, que são função da relação da relação água/materiais finos e aditivo superplastificante que promovem a fluidez e viscosidade adequada.

**Propriedades no estado fresco.** As propriedades de fluidez, capacidade de enchimento, viscosidade e habilidade passante dos betões auto-compactáveis com reduzidos teores de cimento (BAC-RTC) foram determinadas pelos ensaios de slump flow, T500, V-funnel, J-ring e L-box e são mostradas na tabela 4, a tabela 5 apresenta a classificação desses betões segundo as especificações da EFNARC.

Tabela 4: Propriedades dos betões no estado fresco

Mix Id	Slump-flow		J-ring		V-test	L-box
	T500 (s)	Slump-flow (mm)	T500 (s)	Slump-flow (mm)	Tempo (s)	H2/H1
L500	1.67	625	obstruiu		4.6	0.75
L300	4.2	500	obstruiu		*	*
CV	1.85	700	2.23	700	4.8	0.86
CVCH	2.11	700	2.77	700	12,0	1,00
CVMK	3.15	670	3.43	615	13.9	0.92
CVMKCH	2.63	700	3.89	695	12.8	0.89

\* Não Realizado

Tabela 4: Classificação dos betões no estado fresco segundo EFNARC.

	L500	L300	CV	CVCH	CVMK	CVMKCH
Classe de fluidez	SF1	*	SF2	SF2	SF2	SF2
Classe de viscosidade	VS1/VF1	*	VS1/VF1	VS2/VF2	VS2/VF2	VS2/VF2
Habilidade passante	PA1	*	PA2	PA2	PA2	PA2

**Fluidez e viscosidade.** Os parâmetros que definem a fluidez e a viscosidade dos betões podem ser calculados por  $\Gamma_c$  e  $R_c$ , eq. 2 e eq. 3, que definem parâmetros de deformabilidade do concreto e viscosidade, respectivamente [11], estes parâmetros foram calculados para os BAC-RTC e são apresentados na figura 4.

$$\Gamma_c = \frac{(Sfl_1 * Sfl_2 - Sfl_0^2)}{Sfl_0^2} \quad (2)$$

$$R_c = \frac{10}{t} \quad (3)$$

Onde:  $Sfl_1$  e  $Sfl_2$  = medidas de slump flow (mm) e  $t$  = tempo de escoamento no V-funnel.

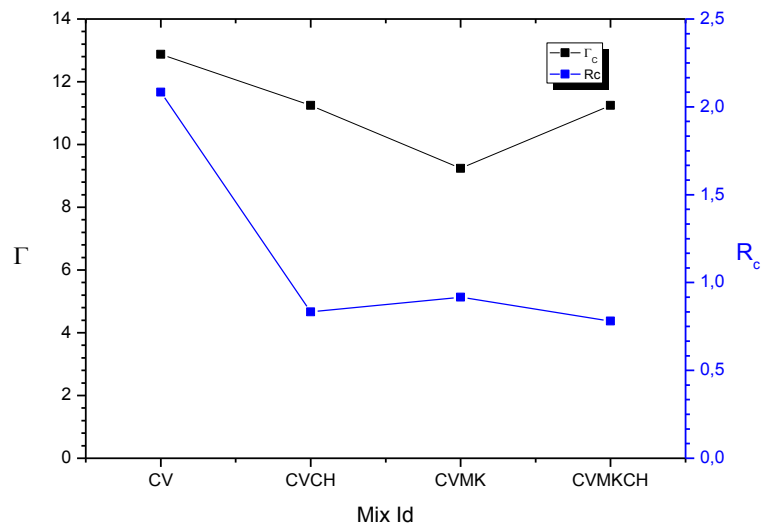


Fig. 4. Parâmetros de deformabilidade ( $\Gamma_c$ ) e a viscosidade ( $R_c$ )

Os betões CVCH, CVMK e CVMKCH são classificados segundo EFNARC como VS2/VF2 quanto a viscosidade, no entanto verifica-se na figura 4 que os betões CVCH e CVMKCH apresentam viscosidades iguais de acordo com o parâmetro  $R_c$ , já os traços CV e CVMK apresentam viscosidades diferentes, o que demonstra que o parâmetro  $R_c$  é mais sensível a mudanças de viscosidades.

A viscosidade é um parâmetro influenciado pela dosagem de aditivo superplastificante e pelo teor de finos das misturas, o que demonstra a importância da determinação da sinergia entre cimento + adições minerais + aditivo e da relação água/materiais finos.

A definição do teor de superplastificante adequado para cada mistura de betão depende da compatibilidade do cimento-aditivo, em muitos trabalhos sobre BAC esse teor é determinado experimentalmente, tendo sido relatado valores desde 0.6 a 4% sobre a massa do cimento [1, 3, 12]. Quanto ao parâmetro fluidez ( $\Gamma_c$ ), que denota a deformabilidade do concreto no estado fluido verifica-se CVMK apresentou-se menos deformável, ou seja, com maior coesão, fato verificado na avaliação visual. Todos os traços apresentam mesma classificação quanto fluidez (SF2), segundo a EFNARC, embora o CVMK tenha se apresentado mais coeso, o que indica que o parâmetro  $\Gamma_c$  proposto por Okamura e Ouchi [11] é mais preciso na determinação da deformabilidade e portanto aconselhável para avaliação de traços com classificações semelhantes segundo EFNARC.

Nenhum dos BAC-RTC apresentou segregação após os ensaios ou durante a parada da mistura, apenas o traço CV apresentou ligeira exsudação nas bordas do concreto após o ensaio de slump flow. Sabe-se que betões com elevados teores de cinza volantes apresentam-se com elevada coesão [13], no entanto o uso de aditivos superplastificante em excesso pode causar o fenómeno de exsudação.

A viscosidade é determinada indirectamente pelo V-funil e T500 juntos e são classificadas através das siglas VS1 ou VS2 determinadas pelo T500 e VF1 e VF2 pelo V-funil. O valor do tempo obtido não mede a viscosidade do BAC, mas está relacionada com esta propriedade e descreve a taxa de fluxo, assim como o parâmetro  $R_c$ .

Verifica-se que os traços CVCH, CVMK e CVMKCH são da classe VS2/VF2, pois apresentaram T500 > 2 seg e V-funil entre 9 e 25 seg, enquanto o CV é classificado com VS1/VF1. Segundo a EFNARC os BAC VS1/VF1 tem boa capacidade de enchimento, mesmo com estruturas densamente armadas, no entanto é mais susceptível a exsudação e a segregação, fato verificado no traço CV.

Os traços CV e CVCH estão na mesma classe de fluidez medida no slump flow (SF2), porém apresentam viscosidade diferentes, VF1 e VF2 respectivamente, isto é justificado pela inclusão de

cal (CH), que aumenta o teor de finos na mistura e conseqüentemente torna a mistura mais viscosa, e portanto mais estável, evitando assim a exsudação comentada anteriormente do traço CV.

Os traços CVMK e CVMKCH estão classificados nas mesmas classes de fluidez (VS2) e viscosidade (VS2/VF2), esta classe de fluidez apresenta melhor resistência à segregação, no entanto pode ter efeitos negativos no acabamento superficial e sensibilidade ao tempo de aplicação.

**Habilidade passante.** A habilidade passante foi determinada através dos ensaios de L-box com três barras e J-ring, estes ensaios descrevem capacidade da mistura fresca em fluir através de espaços confinados e aberturas estreitas tais como as áreas de reforço, sem segregação ou perda de uniformidade e sem causar o bloqueio.

Todos os traços de BAC-RTC foram classificados no ensaio de L-box como PA2, segunda a EFNARC [9], o que indica que a relação de bloqueio é superior a 0,8, como mostra a figura 5.

O resultado de espalhamento no ensaio J-ring também indica habilidade passante, segundo a NBR 15823-3 [14] e ASTM C1621 [15], quando comparado com os resultados de slump flow. Quando a diferença de espalhamento entre esse dois ensaios é menor que 25 mm indicam ausência de bloqueio (PJ1), caso dos betões CVCH, CVMK e CVMKCH, já quando a diferença está entre 25 e 50 mm indica mínimo bloqueio visível (PJ2), caso do betão CV, que obteve essa classificação devido a leve exsudação verificada.

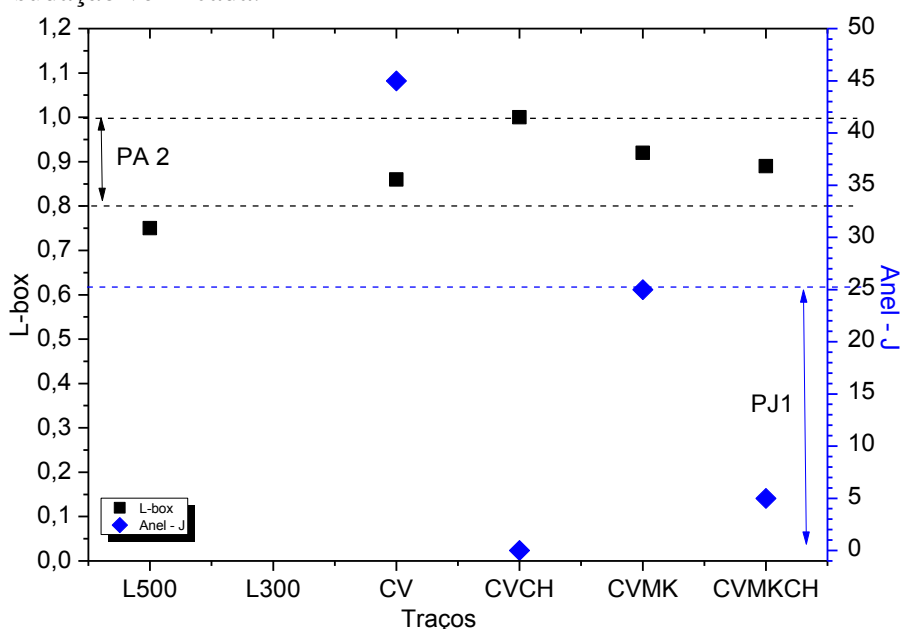


Fig. 5. Classificação da habilidade passante

A segregação e a baixa capacidade de passagem, agindo independentemente, ou uma combinação das duas, podem causar o bloqueio do concreto, esses fatos não foram verificados nos BAC em análise, a não ser uma ligeira exsudação no traço CV que ocasionou uma menor relação de bloqueio (0,85) em relação aos demais BAC analisados, assim como pôde ser verificado no traço L300 que apresentou alta fluidez (VS1) com tendência a segregação após os ensaios, acarretando também menor relação de bloqueio, caracterizando incapacidade de auto-compactação.

Portanto, verifica-se a influência de um parâmetro sobre o outro, reflectindo assim na capacidade de auto-compactação que é regida simultaneamente pelos parâmetros de deformabilidade e resistência à segregação, que podem ser caracterizados pela viscosidade.

#### Propriedades no estado endurecido.

**Resistência à compressão.** A variação da resistência à compressão dos BAC com a idade de cura húmida a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  é mostrada na figura 6 caracterizando a evolução das resistências com tempo, verifica-se que os traços CV, CVMK, CVCH e CVMKCH apresentaram resistências à compressão aos 28 dias de 32,6, 27,8, 40,9 e 40,0 MPa, respectivamente, o que confirma a aplicabilidade destes betões em construções cujas resistências exigidas para os betões sejam as classes C25 a C40, mesmo com consumo de cimento da ordem de 200 a  $150 \text{ kg/m}^3$ .

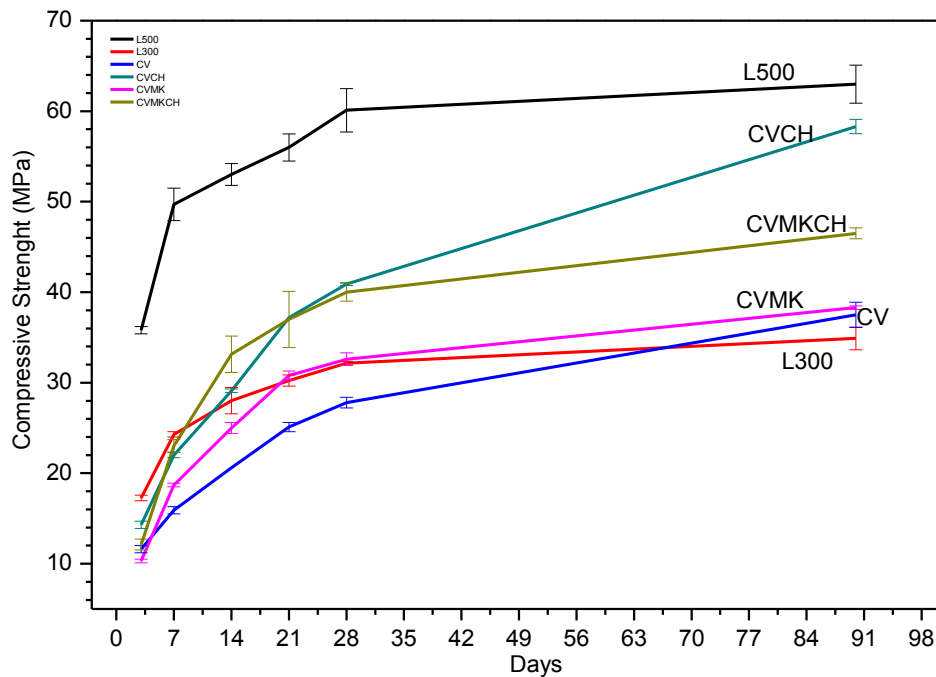


Fig. 6. Evolução das resistências à compressão com a idade

Nota-se a importância dos BAC para a sustentabilidade das construções uma vez que se pode atingir resistências superiores a 30 MPa aos 28 dias em betões com redução de 60 a 70% do consumo de cimento em relação ao traço de BAC de referência L500 ( $500 \text{ kg/m}^3$ ), e ainda resistências superiores a betões convencionais com consumo de cimento  $300 \text{ kg/m}^3$  (L300) mesmo com reduções de 33.3% e 50% em relação ao consumo de cimento do L300. Aliando a isto os benefícios dos betões auto-compactáveis como maior produtividade de produção, menor nível de ruídos nas construções, redução do problemas associados a vibração, além de ganhos de durabilidade pelo uso das adições minerais.

De posse dos resultados no estado fresco e endurecido pode-se caracterizar os BAC-RTC analisados neste trabalho como betões de alto desempenho, visto que segundo Mehta [13] betões de alto desempenho podem ser classificados como aqueles que satisfazem a necessidades específicas da engenharia como elevada trabalhabilidade, maior resistência inicial, de alta tenacidade, e de alta durabilidade às condições de exposição.

As resistências dos traços CVCH e CVMKCH superam as do traço L300 a poucas idades, 9 e 12 dias, respectivamente, o que indica a elevada reactividade da CV e MK com o hidróxido de cálcio, que está directamente relacionada com a amorficidade da CV e MK apresentados na figura 1. O traço CVCH apresenta resistência de 58 MPa aos 91 dias bem próxima a resistência do traço de referência, L500, que foi de 63 MPa, o que indica a possibilidade de se produzir betões de elevadas resistências com baixos teores de cimento quando idades mais avançadas são levadas em consideração.

Verifica-se que todos os traços com cal apresentaram resistência maior que os traços sem, atestando a grande influência da adição de cal nos BAC-RTC, notadamente a partir dos 14 dias onde maior parte do hidróxido de cálcio da hidratação do cimento já foi formada e provavelmente consumida pelas adições minerais [16].

O ganho de resistência dos 28 dias para os 90 dias foi consideravelmente inferior nos traços com metacalino CVMK e CVMKCH, enquanto esses verificaram crescimento em torno de 15%, betões CV e CVCH apresentaram aumentos de 26 e 30% respectivamente, estes fatos estão relacionados com o menor consumo de cimento e maiores relações água/cimento utilizadas nos traços com metacalino, e ao baixo teor de hidróxido de cálcio livre disponível para as reações com as adições minerais utilizadas, como determinado por Anjos et al [16] em pastas de cimento com elevados teores de CV, MK e Cal hidratada.



## Conclusão

- Os critérios de dosagem de teor de argamassa e finos são suficientes para adequação de traços de betão em BAC.
- Os parâmetros  $\Gamma_c$  e  $R_c$  sugeridos por Okamura e Ouchi [9] foram mais eficientes na determinação dos parâmetros fluidez e viscosidade que as classificações EFNARC, uma vez que composições com que apresentaram viscosidades ou fluidez diferentes pelos parâmetros  $\Gamma_c$  e  $R_c$ , obtiveram a mesma classificação EFNARC.
- A habilidade passante é melhor avaliada pelo ensaio de J-ring que pelo L-box, já que este último não detectou a pouca habilidade do traço CV, uma vez que o classificou na mesma faixa dos outros traços, já no ensaio de J-ring esse traço está em classe diferente dos demais.
- Os BAC-RTC apresentaram resistências aos 28 dias que variam entre 25 a 40 MPa e aos 91 dias entre 35 e 58 MPa, mostrando a possibilidade de se produzir betões de elevadas resistências com reduzidos teores de cimento quando idades mais avançadas são levadas em consideração.
- Verifica-se que é possível desenvolver betões auto-compactáveis com reduzido teores de cimento com propriedades adequadas, contribuindo assim para a sustentabilidade destes, através da minimização da energia de lançamento e compactação, e principalmente em virtude da drástica redução do consumo de cimento para níveis de 150 e 200 kg/m<sup>3</sup>.

## Referências

- [1] N. Bouzoubaa and M. Lachemi: Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash: Preliminary results. *Cement and concrete research*, v. 31, n. 3, p. 413-420, 2001
- [2] A. Camões: Durability of High-volume fly ash concrete. *International RILEM Workshop on performance based evaluation and indicators for concrete durability*. Madrid, 2006. 311-318.
- [3] R. Deeb, A. Ghanbari, B. Karihaloo: Development of self-compacting high and ultra high performance concretes with and without steel fibres. *Cement and concrete composites*, v. 34, n. 2, p. 185-190, 2012.
- [4] P. Gomes, A. Barros: Métodos de dosagem de concreto autoadensável. São Paulo. Pini, 2009.
- [5] C. Meyer: The greening of the concrete industry.” *Cement & Concrete Composites*, 2009: 601–605.
- [6] P. C. Aïtcin: Binders for Durable and Sustainable Concrete. New York: Taylor & Francis, 2008.
- [7] EN, N. 450-1-Cinzas volantes para betão. Parte1: definições, especificações e critérios de conformidade. Instituto Português da Qualidade, 2006.
- [8] M. Gesoğlu, E. Güneyisi, M.E. Kocabağ, V. Bayram, K. Mermerdaş: Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash. *Construction and Building Materials*, v. 37, p. 160-170, 2012.
- [9] EFNARC, S. Guidelines for self-compacting concrete. February, 2002.
- [10] J. Cuenca, J. Rodríguez, M. Martín-Morales, Z. Sánchez-Roldán, M. Zamorano: Effects of olive residue biomass fly ash as filler in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v. 40, p. 702-709, 2013.
- [11] H. Okamura, M. Ouchi, Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 1, n. 1, p. 5-15, 2003.
- [12] B. Felekoğlu, S. Türkel, B. Baradan: Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Building and Environment*, v. 42, n. 4, p. 1795-1802, 2007.

- [13] P. K. Mehta: High-performance, high-volume fly ash concrete for sustainable development. Proceedings of the international workshop on sustainable development and concrete technology, 2004. p.3-14.
- [142] Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 15823-3:2010: Concreto auto-adensável Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J. Rio de Janeiro, 2010.
- [15] ASTM C1621/C1621M-09b: Standard test method for passing ability of self-consolidation concrete by J-ring. Annual book of ASTM standards, vol. 04.02. Philadelphia (USA): American Society for Testing and Materials: 2011.
- [16] M. A. Anjos, A. Camões A, C. M. Jesus, F. Duarte: Avaliação da hidratação de pastas cimentícias com elevados teores de adições minerais. 2012.