

## ANÁLISE FÍSICA DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS NO ESTADO FRESCO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR METACAULIM

N. S. L. Souza<sup>1</sup>, E. C. Farias<sup>1</sup>, S. P. Aguiar<sup>1</sup>, E. V. Borja<sup>2</sup>, M. A. S. Anjos<sup>3</sup> e M. L. V. N. Morais<sup>4</sup>  
E-mail: na.leal@hotmail.com<sup>1</sup>, evilane\_cassia@globocom<sup>1</sup>, solangenegra@bol.com.br<sup>1</sup>, edilberto.borja@ifrn.edu.br<sup>2</sup>, maros.anjos@ifrn.edu.br<sup>3</sup>, marcio.varela@ifrn.edu.br<sup>4</sup>.

### RESUMO

No Brasil, as pesquisas sobre o inovador concreto autoadensável vêm se intensificando nos últimos anos, porém o mesmo já é objeto de estudo no Japão desde a década de 80. Por falta de conhecimento dos construtores ou pela ausência de empresas que confeccionem esse tipo de concreto, seu uso ainda é pouco difundido em obras convencionais. Dentro deste contexto, o presente trabalho tem como objetivo principal o estudo do efeito da incorporação do metacaulim no comportamento deste concreto no estado fluido. A avaliação das propriedades físicas foi realizada por comparação, ou seja, produção de um traço padrão cujo único aglomerante utilizado foi o cimento Portland e a produção de três traços com substituição parcial do cimento por metacaulim reativo, nas

proporções de 10%, 15% e 20%. A dosagem do traço padrão utilizado seguiu o método convencional prescrito pelo IPT/EPUSP. Após a determinação dos traços com a devida proporção de aditivo superplastificante e teor de argamassa, verificou-se, no estado fluido, o comportamento requerido para concreto autoadensável, através dos ensaios de *slump flow test*, *slump flow T<sub>50cm</sub> test*, *J-ring test*, *v-funnel test* e *v-funnel 5min test*. Por comparação dos resultados obtidos, verificou-se que o metacaulim, em certas proporções, melhora o comportamento do concreto no estado fluido, tornando-o mais coeso, diminuindo os efeitos de exsudação e segregação, além de atender a NBR 15823/2010 (Concreto auto-adensável).

**PALAVRAS-CHAVE:** Concreto autoadensável, adição mineral, metacaulim, substituição do cimento.

## PHYSICAL ANALYSIS OF THE SELF COMPACTING CONCRETE IN THE FLUID STATE WITH PARTIALLY REPLACED OF PORTLAND CEMENT BY METAKAOLIN

### ABSTRACT

In Brazil, research on the innovative self-compacting concrete has been intensifying in recent years, but it is already the subject of study in Japan since the 80s. For lack of knowledge of the builders or the absence of such companies manufacture this concrete, its use is still not widespread in conventional works. Within this context, this work aims at evaluating the effect of incorporation of metakaolin on the behavior of concrete in the fluid state. The evaluation of physical properties was made by comparison, that is, production of a line pattern whose sole binder used was Portland cement and the production of three lines with partially replaced of cement by reactive metakaolin in the proportions 10%, 15% and 20 %. The

dosage dash pattern used followed the method prescribed by IPT/EPUSP. After determination of lines with the proportion of superplasticizer and mortar content, it was found in the fluid state, the behavior required for self-compacting concrete through the slump flow test, slump flow T<sub>50cm</sub> test, j-ring test, v-funnel test and v-funnel 5min test. By comparing the results, it was found that the metakaolin, in certain proportions, improves the behavior of the concrete, making the concrete more cohesive, thereby reducing the effect of exudation and segregation, and it obey the NBR 15823/2010 (Self-compacting concrete).

**KEYWORDS:** Self-compacting concrete, mineral admixture, metakaolin, substitution of cement.

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto autoadensável (CAA) é definido como um concreto fluido que pode ser moldado in loco sem vibração para formar um produto livre de vazios e falhas e que apresente também, capacidade de fluxo através do seu peso próprio preenchendo completamente as fôrmas e atingindo a compactação mesmo em estruturas densamente armadas. O concreto resultante é denso, homogêneo e com as mesmas propriedades de resistência e durabilidade de concretos convencionais compactados (EFNARC, 2005).

Segundo Alencar (2008), o concreto autoadensável pode ser considerado um dos desenvolvimentos mais revolucionários ocorridos na construção civil nas últimas décadas, principalmente no ramo de pré-fabricados.

A microestrutura do CAA, segundo Melo (2005), exige a homogeneidade da mistura, devido ao uso de grandes quantidades de finos, que proporciona um melhor empacotamento das partículas, promovendo a retenção de água e a estruturação de uma zona de transição mais densa entre a pasta de cimento e os agregados, devido ao favorecimento do processo de nucleação durante a hidratação do cimento.

Para aumentar a coesão da mistura e evitar a segregação do agregado graúdo, normalmente são utilizados aditivos modificadores de viscosidade e/ou adições minerais (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

As adições minerais podem ser classificadas como inertes (promovem uma ação física por meio da maior compactação) ou reativas (contribuem para a formação dos hidratos). As adições quimicamente ativas (reativas) podem ser tanto material pozolânico ou cimentante. O material pozolânico é definido como material que reage quimicamente com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , produto de hidratação do Cimento Portland à temperatura ambiente, para formar compostos resistentes. Entretanto, as adições pozolânicas ultra-finas, como sílica ativa, metacaulim e cinza da biomassa da cana-de-açúcar, mostram-se mais efetivas no aumento da coesão do CAA, bem como no aumento da resistência e da durabilidade (BORJA, 2011 e ANJOS, 2010).

O metacaulim que já vem sendo estudado por diversos autores promove um grande aumento na coesão do CAA e redução acentuada da exsudação e segregação apesar de aumentar o consumo de aditivo no estado fresco, no estado endurecido é evidente o aumento da resistência à compressão e durabilidade (BORJA, 2011).

Neste sentido, este estudo objetiva estudar a influência do metacaulim através das propriedades físicas de concretos autoadensáveis.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diferentes definições têm sido utilizadas nos últimos anos para descrever o concreto autoadensável. Inicialmente denominado de concreto de alto desempenho (high performance

concreto), o concreto autoadensável é, sobretudo, um material fluido, muito embora sua real definição extrapole tal característica.

Com parâmetros reológicos que se diferem da maioria dos parâmetros do concreto convencional, o concreto autoadensável se caracteriza por ter comportamento singular, devendo atender, segundo o EFNARC (2002), a três requisitos determinantes:

- a. Habilidade de preenchimento (filling ability) – definido pela habilidade de preencher completamente todas as áreas e cantos da forma em que for lançado, valendo-se apenas do seu peso próprio (ação da gravidade), dispensando compactação ou vibração, mesmo em situações em que o espaçamento entre as barras de aço das armaduras seja estreito;
- b. Habilidade passante (passing ability) – manter homogeneidade adequada durante e após a aplicação, mesmo em áreas congestionadas com armaduras (restrições), sem separação dos seus constituintes;
- c. Resistência à segregação (segregation resistance)– refere-se à habilidade de reter o agregado graúdo da mistura em suspensão, mantendo a mistura sempre como um material uniforme.

Para manter essas características, especialmente após a aplicação, sua homogeneidade depende, principalmente, da viscosidade plástica e da tensão de escoamento, determinadas pelo proporcionamento da mistura, pelo tipo e teor do aditivo superplastificante, pelo teor de finos e pela distribuição granulométrica dos materiais.

A viscosidade plástica está relacionada com a tensão de escoamento, que quando atinge valores muito pequenos ou próximos de zero faz com que o CAA apresente elevada fluidez. Contudo, viscosidades muito baixas podem propiciar instabilidade na mistura e ocasionar a segregação, ao mesmo tempo em que valores elevados de viscosidade podem prejudicar a capacidade de preenchimento. O parâmetro de tensão de escoamento está relacionado com o abatimento (espalhamento), de modo que quanto maior a tensão de escoamento, menor a fluidez e vice-versa (SANTOS e SILVA, 2009). Assim, deve-se procurar dosar concretos autoadensáveis com viscosidades menores, desde que não apresente segregação.

Dentre as vantagens do uso do metacaulim pode-se destacar a redução do consumo de cimento, além do considerável aumento de desempenho das propriedades anteriormente desfavoráveis do concreto- retração e fluência.

### 3 METODOLOGIA

Para o alcance dos objetivos deste trabalho foram desenvolvidas duas etapas de estudos experimentais. A primeira consistiu na seleção dos materiais constituintes das misturas, a segunda, na elaboração do proporcionamento dos materiais para concreto autoadensável, produção do concreto padrão e dos concretos com diferentes porcentagens do metacaulim, finalizou-se o estudo com a análise das propriedades dos concretos no estado fresco.

A metodologia usada para elaboração da dosagem inicial para o concreto autoadensável foi baseada no método EPUSP/IPT, verificando-se sua validade através das propriedades físicas e mecânicas. As dosagens estudadas tiveram variações, em termos percentuais, na quantidade da

adição mineral utilizada, metacaulim, presente nas mistura em massa, mantendo-se constante a quantidade de areia, de agregado graúdo, relação água/materiais secos (a/ms).

Para a transformação do concreto convencional em concreto autoadensável utilizou inicialmente um traço sem adições minerais (traço padrão) para concreto convencional de 25 MPa dosado a partir do método citado anteriormente com as seguintes modificações: aumento do teor de argamassa e diminuição do fator a/ms. Após essas adequações, foram feitos os testes em pequenas porções do concreto padrão, adicionando aditivo superplastificante, a fim de que encontrássemos a proporção ideal de aditivo necessária para compor um concreto autoadensável. Para o traço inicial da segunda etapa da pesquisa, foi adicionado aditivo superplastificante na mistura do concreto para verificação de sua adequação como autoadensável.

Dentro dessa linha de pesquisa e após confirmação da quantidade ideal de aditivo necessária, elaboraram-se os quatro traços em estudo (Tabela 01) com especial atenção ao do metacaulim, em substituição parcial ao cimento. Para estas formulações foram realizados os ensaios específicos de concreto autoadensável (*Slump flow test, slump flow T<sub>50cm</sub> test, V-funnel test, v-funnel<sub>5min</sub> test, J-ring*) conforme exigências técnicas nacionais (NBR 15823, 2010) e através destes foi possível avaliar a tendência de exsudação, segregação e viscosidade destes concretos.

Tabela 01: Traços em estudo.

Materiais	TRAÇOS			
	CAA-01	CAA-02	CAA-03	CAA-04
Cimento	1,00	0,90	0,85	0,80
Metacaulim	0,00	0,10	0,15	0,20
Areia	1,82	1,82	1,82	1,82
Brita	1,51	1,51	1,51	1,51
Água/materiais secos (m. s.)	0,45	0,45	0,45	0,45
Superplastificante (% em rel. ao m. s.)	1,3	1,3	1,3	1,3

Com relação à adição de materiais finos, optou-se pelo metacaulim almejando-se fluidez e coesão da massa cimentícia devido ao metacaulim ter eficiência comprovada como material pozolânico em diversas pesquisas da área (ROSSIGNOLO e OLIVEIRA, 2007; OLIVEIRA, 2007; CARMO e PORTELLA, 2008 e FERREIRA *et al.*, 2003).

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Construção Civil (IFRN), localizado em Natal/RN. Na Tabela 02 ilustram-se de forma detalhada os ensaios específicos adotados para caracterização dos concretos analisados nesta pesquisa.

Tabela 02: Ensaios realizados nos concretos autoadensáveis.

ENSAIOS		NORMA
FRESCO	Anel J	NBR 15823 (2010)
	<i>Slump flow test</i>	
	<i>Slump flow T<sub>50cm</sub> test</i>	
	<i>V-funnel test</i>	
	<i>Slump flow test (acrécimo tempo)</i>	

### 3.1 MATERIAIS DE PARTIDA

Os materiais selecionados e utilizados no estudo experimental foram os seguintes:

- Cimento: cimento Portland composto CP-II F 32;
- Metacaulim: pozolana de alta reatividade que substitui com vantagens a sílica ativa, sendo utilizado como adição mineral às aplicações de cimento Portland, otimizando seu desempenho e doada por fabricante da cidade de Recife-PE;
- Agregado miúdo: areia natural quartzosa oriunda do distrito de Pium (Parnamirim/RN);
- Agregado graúdo: Brita granítica 6,3 mm;
- Aditivo: superplastificante à base de éter policarboxílico;
- Água potável: obtida diretamente da concessionária local.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Propriedades do concreto no estado fresco

Apesar do uso crescente do CAA no País, não havia norma brasileira específica para disciplinar o assunto. A partir de 2008, o Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados (ABNT CB-18) vem desenvolvendo atividades de normalização visando estabelecer diretrizes para o CAA, culminando com a aprovação da NBR 15823 em 2010, que em seis textos normativos, estabelecem os requisitos para classificação, controle e aceitação do CAA no estado fresco, prescrevendo ensaios específicos a partir de documentos europeus, norte-americanos e da experiência dos envolvidos nos trabalhos da Comissão de Estudo (ALENCAR et al., 2010).

Os ensaios realizados para caracterização do CAA diferenciam-se do concreto convencional apenas quando no estado fresco, que determinam de forma direta e indireta os parâmetros reológicos fundamentais do concreto. As propriedades que determinam este comportamento do concreto no estado fluido são a fluidez, habilidade passante- segregação, coesão e massa específica, inclusive no que se refere a uma maior possibilidade de redução de volume de vazios. Para verificação de tais propriedades foram executados os seguintes ensaios: Slump flow test, slump flow T50cm test, V-funnel test, v-funnel test 5 min, J-ring no estado fluido.

A ABNT NBR 15823 (2010) classifica o CAA no estado fresco em função dos parâmetros apresentados e, seguindo a linha europeia da EN 206-9.

#### 4.1.1 *Slump flow test*

O valor de espalhamento, medido através do ensaio *slump-flow* é especificado para todos os concretos autoadensáveis como um ensaio primário, esboçando indicações da fluidez do CAA e de sua habilidade de preenchimento das formas em fluxo livre (ausência de obstruções). A Figura 01 mostra a execução do ensaio citado com o traço CAA-04.

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008) o concreto autoadensável ideal deve apresentar uma medida de *slump flow* entre 60 e 75 cm. Apenas o traço CAA-04, com substituição de 20% de

cimento por metacaulim, não atendeu essa especificação. Os resultados do ensaio se encontram explicitados na figura 02.



Figura 1: Ensaio *slump-flow test* do traço CAA-04 com 20% de substituição do cimento por metacaulim.

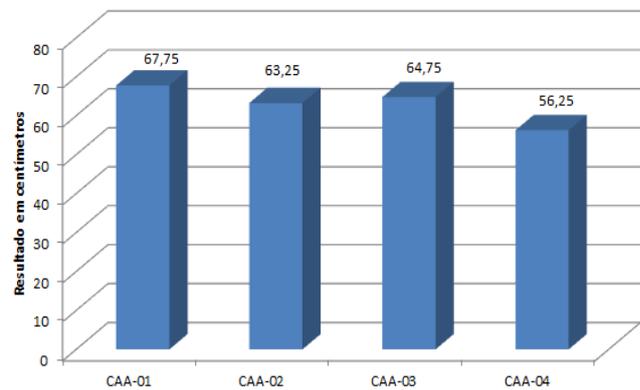


Figura 2: Variação do espalhamento de acordo com o *slump flow test*.

#### 4.1.2 *Slump flow T<sub>50cm</sub> test*

O *slump flow T<sub>50cm</sub> test* é uma variação do *slump flow*, já que o procedimento e os equipamentos são os mesmos. As únicas alterações são a marcação de um círculo de 500mm de diâmetro centrado na base. O teste é realizado simultaneamente com o *slump flow test*, o operador deve acionar o cronômetro e marcar o tempo em que o concreto alcança a marca dos 500 mm.

De acordo com Tutikian e Dal Molin (2008) se o tempo for baixo indica que o concreto está muito fluido e se o tempo for alto indica que o concreto está muito coeso, ainda segundo os autores supracitados intervalo de tempo ideal está entre três e sete segundos, a figura seguinte ilustra os resultados obtidos nos traços em análise.

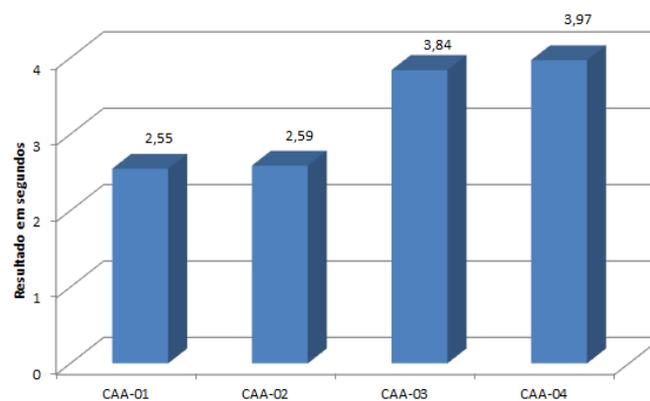


Figura 3: Variação do tempo de espalhamento de acordo com o *slump flow T<sub>50cm</sub> test*.

#### 4.1.3 *V-funnel test*

Assim como o *slump flow test*, o ensaio do funil “V” também serve como parâmetro de medida da fluidez do concreto, que envolve uma avaliação qualitativa da viscosidade aparente do

concreto, em fluxo confinado, a partir do registro do tempo que o concreto leva para escoar neste equipamento. Esta medida consiste em cronometrar o tempo que o concreto leva para escoar totalmente através de equipamento em forma de V.

De acordo com Tutikian e Dal Molin (2008) o valor médio do tempo de escoamento deve está entre seis e doze segundos. De acordo com a figura adiante os concretos apresentaram um valor próximo do intervalo ideal, considerado por Tutikian e apenas o traço padrão, sem substituição do metacaulim, encontra-se no intervalo ideal.

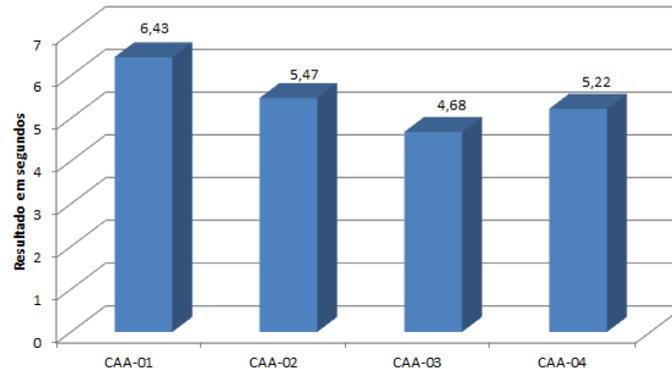


Figura 4: Variação do tempo de escoamento de acordo com o V - Funnel test.

#### 4.1.4 V-funnel 5 min test

O ensaio v-funnel 5 min test é uma variação do ensaio anterior, após a execução do v-funnel test deve-se preencher novamente o funil com concreto e esperar 5 minutos para a repetição do procedimento, este ensaio tem como principal finalidade testar a resistência à segregação já que, se o CAA estiver segregando, o tempo aumentará significamente.

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008) o tempo máximo de acréscimo deve ser de três segundos, nos traços executados todos estão dentro do limite proposto, significando que os concretos não apresentam segregação, percebeu-se também que a substituição do metacaulim diminui essa diferença de tempo, significando uma maior homogeneidade nos concretos que tiveram parte do cimento substituído por metacaulim.

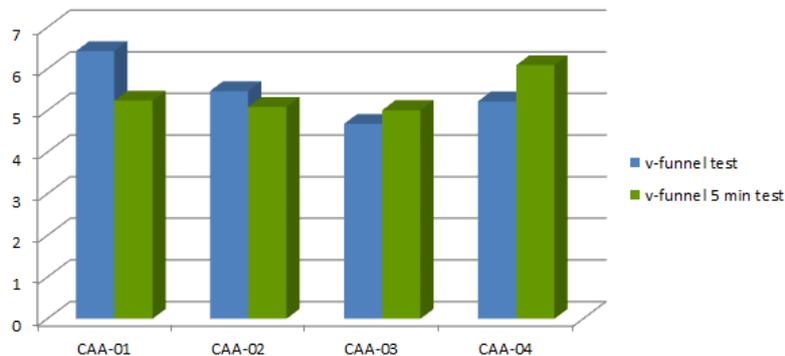


Figura 5: Diferença do tempo de escoamento dos ensaios V-funnel test e V-funnel 5min test.

#### 4.1.5 J-ring test

Normalizado pela ASTM 1621, o ensaio do anel J, previsto na parte 3 da Norma Brasileira e ilustrado na figura 02, É constituído por um anel de barras de aço espaçadas conforme a armadura real que se deseja simular. Mas, normalmente, o diâmetro é de 300 mm, a altura é de 100 mm e o espaçamento entre barras deve ser 3 vezes o diâmetro máximo do agregado graúdo. A medida da habilidade passante é obtida pela média da diferença entre a altura interna e externa ao anel de barras de aço em quatro pontos diferentes. A Figura 6 ilustra o ensaio de anel J executado no traço CAA- 04.

De acordo com Tutikian e Dal Molin (2008) a diferença entre as alturas devem está entre zero e dez milímetros, a maioria dos traços atenderam os requisitos propostos pelos autores citados, apenas o traço CAA-04 não se apresenta no intervalo ideal. Na figura abaixo encontram-se os resultados obtidos com os traços executados.

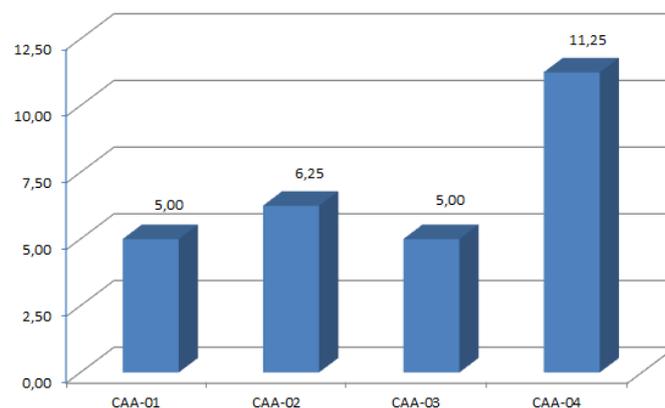


Figura 6: Execução do ensaio Anel J com o traço CAA-04.

Figura 7: Variação de segregação de acordo com o ensaio Anel J.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados referentes ao comportamento do concreto no estado fluido indicam que todos os traços atendem aos requisitos prescritos na norma ABNT NBR 15823/ 2010 para o concreto autoadensável.

As substituições parciais do cimento por metacaulim em teores de 10%, 15% e 20% são mais viáveis do que o traço apenas com cimento, traço este que se denominou como traço padrão, pois além de melhor a características do concreto autoadensável, diminui o consumo de cimento. Fatos estes relacionados com a diminuição da exsudação e segregação.

A segregação, considerada um dos grandes problemas da fabricação dos concretos autoadensáveis, diminuiu consideravelmente com a substituição do metacaulim, fato este evidenciado com os resultados obtidos através do *V-funnel 5 min test* (figura 5).

Percebeu-se também que, no traço com substituição de 20% de metacaulim, a fluidez diminuiu consideravelmente, em comparação com os outros traços, não significando que o concreto deixou de atender os requisitos, exigidos pela norma supramencionada, de concreto autoadensáveis.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 11578 – **Cimento Portland**, Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7211 – **Agregados para concreto** – especificações, Rio de Janeiro, 2005b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9776 – **Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman**, Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15823 – **Requisitos para classificação, controle e aceitação do CAA no estado fresco**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12653 – **Materiais pozolânicos**. Rio de Janeiro, 1992.

ANJOS, M. A. S.; MOREIRA, H. P.; BORJA, E. V.; PEREIRA, A. C.; NETO, C. A. **Efeito adição de cinza de biomassa da cana-de-açúcar como finos no concreto autoadensável**. In: Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. Fortaleza, 2010.

BORJA, E. V. **Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos leves estruturais**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011.

G.C. Isaia. 1.ed. São Paulo, IBRACON, 2011. 2v.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. IBRACON. São Paulo, 2008.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto auto-adensável**. 1ºed. São Paulo: PINI, 2008.

VITA, Marcos Onofre, et al. **Concreto auto adensável: estudo da influência de diferentes tipos de adições minerais na fluidez e no comportamento reológico**, 52º Congresso Brasileiro do Concreto. Fortaleza - CE, IBRACON, 2010.