AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO USO DE CIMENTO CP IV E ADIÇÃO DE METACAULIM EM CONCRETOS AUTO-ADENSÁVEIS

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE USE OF CP IV CEMENT AND METAKAOLIN ADDITION IN SELF-COMPACTING CONCRETE

Anderson Renato Vobornik Wolenski [(1)]

Anelize Borges Monteiro [(2)]

André Luís Christoforo [(3)]

Francisco Lledo dos Santos [(4)]

Roque Luiz da Silva Pitangueira [(5)]

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo experimental sobre o Concreto Auto-Adensável (CAA), a fim de verificar sua viabilidade com base no emprego do Cimento Portland Pozolânico e de agregados disponibilizados em Mato Grosso, no uso da adição de Metacaulim e de aditivos superplastificantes advindos do sudeste do país. Na etapa de dosagem foram realizados ensaios de Cone de Marsh, para a fase pasta, Ensaio de Kantro, para a fase argamassa, e ensaios na fase concreto, tais como *Slump Flow*, *V-Funnel*, *J-Ring*, *L-Box*, *U-Shaped Pipe,* e o ensaio de resistência à compressão nas três fases para obtenção dos parâmetros mecânicos. Foram elaborados concretos com relação água/cimento igual a 0,45, sendo utilizados dois aditivos superplastificantes que resultaram em concretos com resistências à compressão superiores a 40 MPa. As análises dos resultados demonstraram que o processo de dosagem deste CAA foi eficaz, mediante um rigoroso controle tecnológico.

[1] Mestrandos em Engenharia de Estruturas pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. E-mail: anderson@dees.ufmg.br.

[2] Mestrandos em Engenharia de Estruturas pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. E-mail: anelize@dees.ufmg.br.

[3] Doutor em Engenharia de Estruturas. Professor Adjunto II do Programa de Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação da Universidade Federal de São João Del-Rei (UFSJ). E-mail: alchristoforo@ufsj.edu.br.

[4] Doutorando em Engenharia Elétrica pela UNESP - Ilha Solteira. Professor Efetivo do Departamento de Engenheiro Civil da Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT). E-mail: franciscolledo@gmail.com.

[5] Doutor em Engenharia Civil. Professor Associado do Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). E-mail: roque@dees.ufmg.br.

Constatou-se ser possível sua aplicação em estruturas que necessitem de um concreto com elevadas fluidez e trabalhabilidade e a inviabilidade de sua aplicação em situações que necessitem de rápida desmoldagem, como é o caso das indústrias de pré-moldados.

Palavra-Chave: Concretos especiais. Propriedades mecânicas. Propriedades reológicas.

Abstract

This paper presents an experimental study about the Self-Compacting Concrete (SCC), in order to check its feasibility based on the use of Pozzolanic Portland Cement and aggregates available in Mato Grosso, in the use of Metakaolin addition and of superplasticizer additives coming from Brazil's southeast. In the step of dosing, Marsh Cone tests, to the paste stage, Kantro test, to the mortar stage, were carried out, as well as tests on the concrete stage, such as Slump Flow, V-Funnel, J-Ring, L-Box, U-Shaped Pipe, and the test of compressive strength in the three phases to obtain the mechanical parameters. Concretes with water/cement ratio equal to 0.45 have been prepared using two superplasticizers which resulted in a concrete with compressive strengths exceeding 40 MPa. The analysis of the results showed that the dosage process of the SCC was effective, through a rigorous technological control. It was verified the possibility of its application in structures that require a concrete with high fluidity and workability and the impracticability of its application in situations that require fast removal of the molds, as it is the case of precast industries.

Keywords: *Mechanical properties. Rheological properties. Special concretes.*

1 Introdução

O aumento no emprego de estruturas em Concreto Armado nas últimas décadas tem elevado a necessidade de estudos que aprimorem características particulares deste material, sendo superados os novos desafios da Construção Civil. Para tanto, é fundamental a expansão de estudos técnico-científicos em Concretos Especiais, visando prolongar a durabilidade dos elementos estruturais confeccionados com este material.

Particularmente, a utilização do Concreto Auto-Adensável (CAA) também cresceu em razão da necessidade de produção de um concreto que aliasse resistência mecânica, fluidez e trabalhabilidade. Este ganho de produtividade foi alcançado, segundo Okamura (1997), em virtude de este ser tão fluido ao ponto de ser lançado facilmente, sem necessidade de vibração ou outros mecanismos de compactação, mantendo-se homogêneo, coeso e sem segregação.

Por outro lado, o desenvolvimento do CAA tem impulsionado o campo profissional, em virtude da obtenção dessa nova tecnologia em concreto por engenheiros ou de profissionais especializados na área, de acordo com Shindoh e Matsuoka (2003), sendo considerado, segundo Proske e Graubner (2002), um novo produto que representa uma importante marca nas pesquisas sobre o concreto.

Segundo Nunes (2001), sua propriedade autonivelante permite diminuir a necessidade de desempeno das superfícies de elementos horizontais, além do acabamento nas superfícies verticais, as quais se apresentam suaves, uniformes e livres de imperfeições. Conforme Coppola (2000), este ganho de produtividade em função da elevação do ritmo de concretagem pode acarretar ganhos de tempo entre 20 e 25% do total gasto.

Estes fatores justificam a elevação do emprego do CAA nas regiões brasileiras, porém, na região norte de Mato Grosso, este fato se difere por conta de poucas pesquisas referentes ao CAA e do baixo controle tecnológico observado atualmente nas indústrias de concreto no Estado, o que inviabiliza a produção deste concreto na construção civil, visto que requer um rígido controle durante sua produção e aplicação.

Dentre os benefícios citados por diversos autores, Zhu e Bartos (2003) relatam que o CAA tem sido considerado como a "Revolução Silenciosa" nos processos construtivos de concretos, com vários benefícios, tais como o aumento de produtividade, melhorias na qualidade da construção e no ambiente de trabalho, entre outros.

O desenvolvimento de concretos que utilizam alta dosagem de resíduos industriais na forma de finos contribui de maneira positiva do ponto de vista sustentável do concreto. Ao utilizar-se sílica ativa, cinza volante e cinzas de casca de arroz, em substituição ao cimento, obtém-se um ganho ecológico significativo, já que estes materiais são resíduos ou subprodutos industriais (GOMES *et al.*, 2003).

Diante da dosagem do CAA com o cimento Portland CP IV como principal inovação nesta pesquisa, o benefício sustentável torna-se evidente. Com base nos dados fornecidos pela ABNT NBR 5736 (1991), o teor de materiais pozolânicos secos que devem ser incorporados a este cimento deve estar compreendido entre 15 e 50% da massa total de aglomerante.

Este percentual considerável de adição pozolânica ao cimento Portland CP IV confirma a importância na elevação do uso desta particularidade de cimento a fim de reduzir a extração da matéria-prima e, consequentemente, contribuir para a diminuição dos índices de emissão de gás carbônico na indústria cimentícia.

Jozić e Zelić (2006) enfatizam esta questão afirmando que o emprego de adições minerais na composição de material cimentício visa diminuir a extração de matéria-prima

para a produção do cimento Portland, reduzindo a emissão de gás carbônico para a atmosfera e possibilita um novo destino aos subprodutos agroindustriais que normalmente são tratados como simples rejeitos.

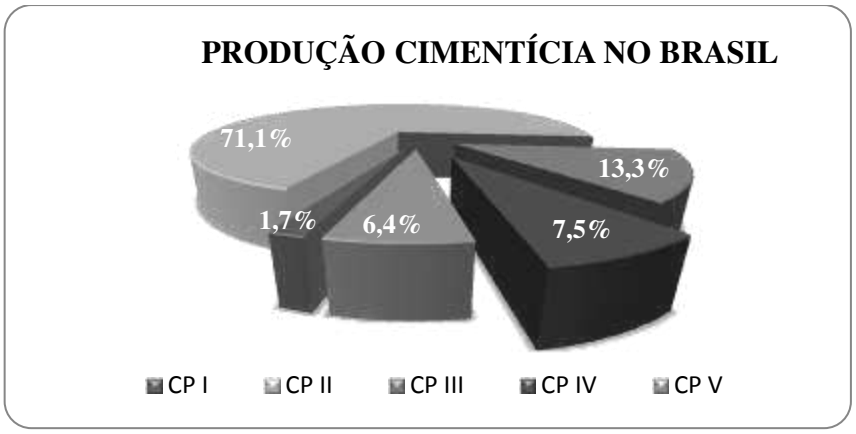
Este novo tratamento para os rejeitos utilizando-os como adições na composição cimentícia confirma, segundo Lima (2010), que a emissão de gás carbônico de materiais cimentícios no país é significativamente inferior à emissão média mundial, dado o fato do uso considerável de adições provindas de produtos ou subprodutos industriais.

Dentre os tipos de cimento produzidos no país com uso de adições que colaboram com a redução da emissão de gases, segundo Carvalho (2002), está o cimento CP III, com 70% de escória de alto forno e com o melhor desempenho ambiental dentre os produzidos no Brasil, seguido do cimento CP IV, com 50% de adição pozolânica.

Como parâmetros para a produção cimentícia no país, dados extraídos pelo SNIC (2006) apontam que as vendas acumuladas entre maio de 2010 e abril de 2011 foram da ordem de 60,1 milhões de toneladas, apresentando incremento de 11,6% sobre igual período anterior, entre maio de 2009 e abril de 2010.

Na Figura 1 nota-se que do total de cimento produzido nacionalmente, apenas 13,3% e 7,5% correspondem à produção dos cimentos Portland CP III e CP IV, respectivamente. Neste cenário, a redução das emissões de gases poluentes evidencia a relevância da produção desses cimentos.

FIGURA 1 - Distribuição percentual média, entre os anos de 2001 e 2006, dos cimentos produzidos nacionalmente. (Fonte Adaptada: SNIC, 2006).



Fatores como os citados são relevantes por demonstrarem a crescente necessidade de busca por opções que superem estes novos desafios estruturais, dentre as quais se pode citar o

emprego do CAA, previamente elaborado para situações estruturais complexas. Neste sentido, o desenvolvimento de pesquisas que abordem processos avaliativos da dosagem do CAA frente ao emprego do cimento CP IV e da adição de Metacaulim são importantes para a obtenção de concretos altamente fluidos sob forte coesão e baixa exsudação, de maneira a contribuir com as esferas científicas e tecnológicas no que se refere ao desenvolvimento de concretos especiais.

Dentre as instituições pesquisadoras existentes no Estado de Mato Grosso, poucas são as que desenvolvem estudos tecnológicos em concretos especiais por se tratar de um assunto com progresso ocorrido, principalmente, nos últimos anos. No que se refere à utilização do cimento CP IV e da adição de Metacaulim em estudos de dosagem de CAA, as pesquisas publicadas ainda são mais escassas no Estado.

Assim, esta pesquisa tem por objetivo avaliar experimentalmente a viabilidade de produção de Concretos Auto-Adensáveis para a região norte de Mato Grosso, cuja composição fundamenta-se no emprego dos materiais da região norte do Estado e no uso de adição mineral e de superplastificantes oriundos da região sudeste do país, procurando avaliar parâmetros como resistência mecânica, fluidez e trabalhabilidade de Concretos Auto-Adensáveis frente à adição de Metacaulim e do uso do cimento Portland CP IV, com base na metodologia de dosagem proposta por Melo (2005). Também é verificada a compatibilidade deste cimento diante desta adição mineral, permitindo a comparação das resistências obtidas nos CAA produzidos com o uso de dois aditivos distintos.

1.1 Concreto Auto-Adensável (CAA): aspectos gerais

O Concreto Auto-Adensável (CAA) é definido pela ASTM C 1017 (1992) como aquele que possui abatimento maior que 190 mm, mantendo-se coeso. As altas taxas de abatimento do CAA provêm, principalmente, do emprego de aditivos superplastificantes, que permitem elevar a fluidez do concreto sem aumentar os valores da relação água/cimento (a/c), bem como manter a coesão das partículas, evitando a ocorrência de segregação ou exsudação.

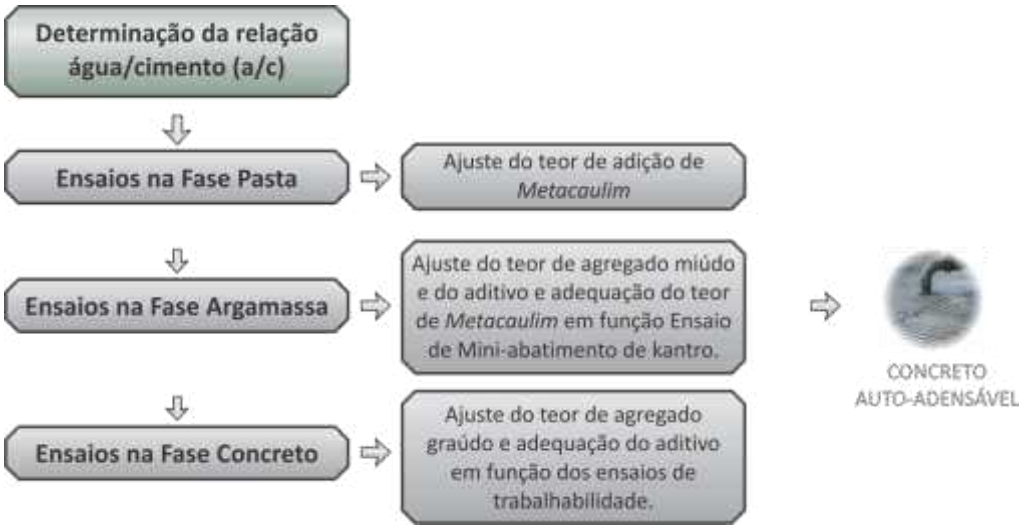
A nomenclatura CAA passou a identificar uma categoria de material cimentício capaz de fluir pelo interior das formas, preenchendo-as completamente sob a ação única de seu próprio peso, dispensando o processo de vibração. Da mesma forma, a auto-adensabilidade do concreto no estado fresco passou a ser descrita como a habilidade de todo o material preencher espaços, envolver as barras de aço e outros obstáculos através, exclusivamente, da

ação da força da gravidade, mantendo uma homogeneidade adequada (UNO, 1998; BOSILJKOV, 2003).

Dentre os métodos de dosagem, destaca-se o Método de REPETTE-MELO, baseado na racionalização da dosagem do CAA a partir do estabelecimento de proporção água/aglomerante segundo exigências, a exemplo do que ocorre com os concretos convencionais, de resistência à compressão ou durabilidade. Esta metodologia enfatiza a possibilidade de se produzir um CAA com valores de resistência à compressão praticada usualmente, ajudando assim a difundir sua aplicação em construções correntes e permitindo ao usuário explorar o excelente comportamento deste compósito no estado fresco, com a resistência especificada no projeto e com menor custo decorrente da otimização na escolha e proporcionamento dos materiais (MELO, 2005).

Segundo Repette (2007), o método se distingue da maioria dos métodos correntes por não exigir, em nenhuma de suas etapas, o julgamento subjetivo da qualidade da mistura por parte do usuário. Todos os componentes do concreto são ajustados com base em ensaios rápidos e de custo acessível, baseados em resultados quantitativos e objetivos, com a eliminação de decisões que dependam do conhecimento experimental de quem utiliza esta metodologia. Primeiramente, o aditivo é dosado na fase pasta, ensaiada no Cone de Marsh. O segundo passo é a dosagem do aditivo na fase argamassa, onde se processam os ensaios de espalhamento e *V-Funnel* e, por fim, há um ajuste na fase concreto, realizando-se os ensaios no *Slump Flow*, *V-Funnel* e *L-Box*. A Figura 2 ilustra as etapas propostas por tal método.

FIGURA 2 - Fluxograma do processo de dosagem do CAA de acordo com o Método REPETTE-MELO. (Fonte adaptada: FERRAZ, 2009).



Nota-se que o processo de dosagem proposto preconiza o ajuste do teor de aditivo superplastificante em todas as fases de dosagem, pois o aditivo possui relação direta com o custo final do concreto, além de evitar problemas como segregação ou exsudação caso o mesmo seja empregado de maneira inadequada durante a dosagem do concreto.

Por fim, a metodologia REPETTE-MELO determina algumas considerações quanto a escolha dos materiais e destaca-se que a parcela considerada adição (Metacaulim) deve ter diâmetro inferior a 0,075 mm, os agregados devem possuir granulometria contínua e os agregados graúdos diâmetros não maiores que 10 mm. Nos procedimentos finais de dosagem, ressalta-se a importância da verificação da estabilidade da mistura, que não deve apresentar segregação, exsudação e perdas de fluidez.

1.2 Materiais empregados na pesquisa

1.2.1 Cimento Portland pozolânico CP IV

Este tipo de cimento caracteriza-se pela presença de material pozolânico em sua composição. Os materiais pozolânicos não reagem com a água da forma como são obtidos. Entretanto, quando finamente divididos, reagem com o hidróxido de cálcio em presença de água e na temperatura ambiente, dando origem a uma nova composição com propriedades aglomerantes. Por essa razão, os materiais pozolânicos são utilizados conjuntamente com o clínquer, pois o hidróxido de cálcio é um produto normalmente resultante da hidratação deste. A adição desse tipo de material modifica a microestrutura do concreto, diminuindo a permeabilidade, a difusibilidade iônica e a porosidade capilar, aumentando a estabilidade e a durabilidade do concreto (ABCP, 2002).

A quantidade de material pozolânico - escórias siderúrgicas ácidas, microssílica, rejeito silicoaluminoso de craqueamento de petróleo, cinzas de resíduos vegetais, entre outros - fica condicionada à quantidade de materiais carbonáticos empregados, podendo responder por valores entre 15% e 50% da massa seca do cimento.

Na Tabela 1 têm-se as características físicas e químicas fornecidas pelo fabricante deste cimento.

TABELA 1. Características física e química do cimento Portland pozolânico CP IV-32

DADOS TÉCNICOS DO FABRICANTE – CIMENTO PORTLAND CP IV-32	
Resíduo na peneira ABNT 200	$< 8\%$
Tempo de início/fim de pega	1 hora / 12 horas
Resistência à compressão aos 7 dias de idade	$20\ MPa$
Resistência à compressão aos 28 dias de idade	$32\ MPa$
Característica principal	Baixo calor de hidratação

Fonte: Boletim Técnico do Fabricante, 2011.

1.2.2 Aditivos superplastificantes

Os aditivos empregados neste estudo são superplastificantes isentos de cloretos, que atendem às prescrições das normas ASTM C 494 (2006) e ASTM C 107 (1994). A fim de evitar quaisquer comparações qualitativas entre os aditivos adotados nos ensaios experimentais, os mesmos foram denominados ao longo deste trabalho como G51 e S3535.

O aditivo G51 possui como base uma cadeia de éter carboxílico modificado. Foi desenvolvido especialmente para a indústria de pré-moldados e concreto protendido, onde se requer maior durabilidade e desempenho.

Na Tabela 2 são fornecidas algumas informações técnicas a respeito deste aditivo, conforme a ficha técnica disponibilizada pelo fabricante do produto.

TABELA 2 - Propriedades e características do aditivo superplastificante G51

ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE G51	
Base Química	Policarboxilatos
pH	$5\ a\ 7$
Teor de Sólidos	$28{,}5\ a\ 31{,}5\%$
Aspecto	Bege
Densidade	$1{,}067\ \ a\ \ 1{,}107\ g/cm^3$

Fonte: Boletim Técnico do Fabricante, 2011.

Já o Aditivo S3535 é empregado principalmente na confecção de concretos de alta resistência inicial, CAA e na indústria de pré-moldados. Permite uma alta taxa de redução de água, mantendo a fluidez e a coesão da massa.

Na Tabela 3 são apresentadas informações técnicas do aditivo superplastificante S3535, conforme a ficha técnica disponibilizada pelo fabricante do produto.

TABELA 3 - Propriedades e características do aditivo superplastificante S3535

ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE S3535	
Base química	Policarboxilatos
pH	$4{,}5 \pm 1$
Teor de sólidos	$28{,}5\ a\ 31{,}5\%$
Aspecto	Castanho
Densidade	$1{,}1\ g/cm^3$

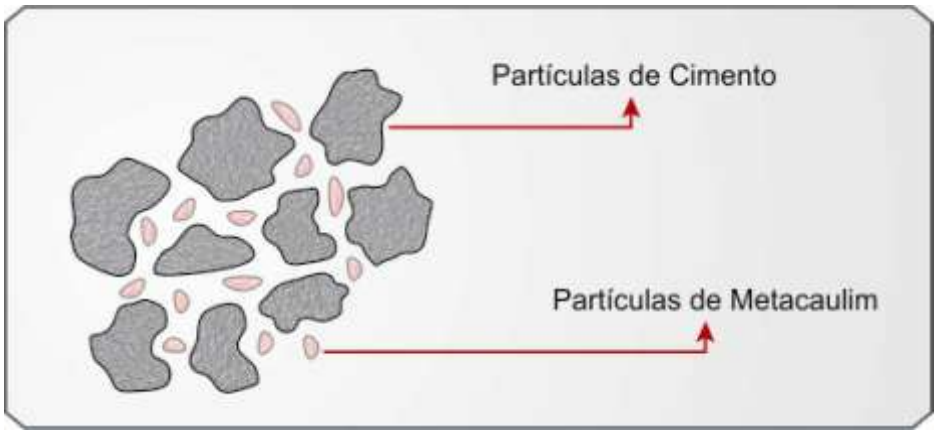
Fonte: Boletim Técnico do Fabricante, 2011.

1.2.3 Adição mineral de Metacaulim

O Metacaulim é um produto procedente de matérias-primas criteriosamente selecionadas, que passam por um rigoroso processo de fabricação totalmente controlado, ao contrário de outras adições minerais que normalmente são rejeitos industriais secundários e que não possuem controle de produção específico.

Assim como a sílica ativa, o Metacaulim também tem efeitos pozolânicos, por ser constituído basicamente por compostos à base de SiO_2 (sílica) e Al_2O_3 (alumina) na fase amorfa, que combinam com o $Ca\ OH\ _2$ (hidróxido de cálcio) presente na pasta de cimento. O Metacaulim se posiciona entre as partículas de cimento, preenchendo os vazios e reagindo quimicamente com o $Ca\ OH\ _2$. A Figura 3 apresenta um esquema de acomodação das mesmas.

FIGURA 3 - Comparativo da granulometria dos grãos de Metacaulim e cimento (Fonte adaptada: Fabricante do Produto, 2011).



Quando incorporado ao concreto, como uma adição em substituição ao cimento, provoca uma melhoria em vários aspectos, comparados aos concretos comuns. Se for considerado o mesmo consumo de aglomerantes, a resistência à compressão de um concreto aumenta consideravelmente com o uso de Metacaulim, e se ainda for associado a um aditivo superplastificante, sua resistência à tração pode também ser acrescida, além de conferir uma maior resistência à abrasão. Na Tabela 4 têm-se as características físicas e químicas fornecidas pelo fabricante do produto Metacaulim, empregado neste estudo.

TABELA 4 - Características físicas e químicas do Metacaulim adotado nos ensaios experimentais.

DADOS TÉCNICOS DO FABRICANTE	
Massa específica (g/cm^3)	2,60
Massa unitária (g/cm^3)	0,55
Área específica (cm^2/g)	18000
Resíduo na peneira ABNT 325 (peneiramento via úmida)	$< 5\%$
Recomendações de uso para o cimento CP IV-32	4 a 8% (com relação ao peso do cimento)

Fonte: Boletim Técnico do Fabricante, 2011.

1.2.4 Agregados miúdo e graúdo

Segundo a ABNT NBR 7211 (2009), o agregado miúdo é a areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT n° 4 (4,8 mm) e ficam retidos na peneira ABNT N° 200 (0,075 mm).

A mesma norma indica o agregado graúdo como sendo o pedregulho ou a brita proveniente de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT n° 4 (4,8 mm). Ambos os agregados foram lavados, a fim de retirar as impurezas, e posteriormente secos ao ar livre e estocados em tambores para isolamento da umidade do ambiente.

2 Materiais e Métodos

Os ensaios experimentais do CAA produzido foram realizados no Laboratório de Física e também no Laboratório de Engenharia Civil, localizados no Centro Experimental e Tecnológico (CET) na Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), *campus* Universitário de Sinop, Mato Grosso.

No estudo da fase pasta, determinou-se a relação água/cimento para obtenção da resistência à compressão, por meio da moldagem de corpos-de-prova e seu posterior rompimento. Na etapa seguinte foram determinados os percentuais ótimos de adição mineral de Metacaulim e de aditivo superplastificante, por meio da análise visual de segregação do mineral e do Ensaio em Cone de Marsh, respectivamente. A Figura 4 apresenta o processo de mistura da pasta de cimento em argamassadeira, realizado com metodologia de mistura adaptada para a presente pesquisa.

FIGURA 4 - Processo de mistura da pasta de cimento: 1) Fixação das pás para início da mistura; 2) Mistura até o 2º minuto; 3) Adição do restante da água no 3º minuto e mistura no 4º minuto; 4) Limpeza da cuba no 5º minuto; 5) Mistura final no 7º minuto; 6) Moldagem dos corpos-de-prova.



Os estudos na fase argamassa tiveram como ponto inicial os resultados obtidos na fase pasta, que possibilitaram a sequência na determinação do percentual ótimo de agregado miúdo para a obtenção de uma argamassa dentro dos parâmetros de deformabilidade, fluidez, estabilidade e resistência à compressão. A Figura 5 ilustra uma sequência de Ensaios de *Kantro* realizados com diferentes percentuais de agregados miúdos e com diferentes espalhamentos.

FIGURA 5 - Ensaio de Kantro para diferentes argamassas: 1) Elevado percentual de agregado miúdo, resultando em baixa deformabilidade; 2) Baixa dosagem de superplastificante, resultando em baixa fluidez; 3) Boa deformabilidade dado o percentual apropriado de agregado miúdo.

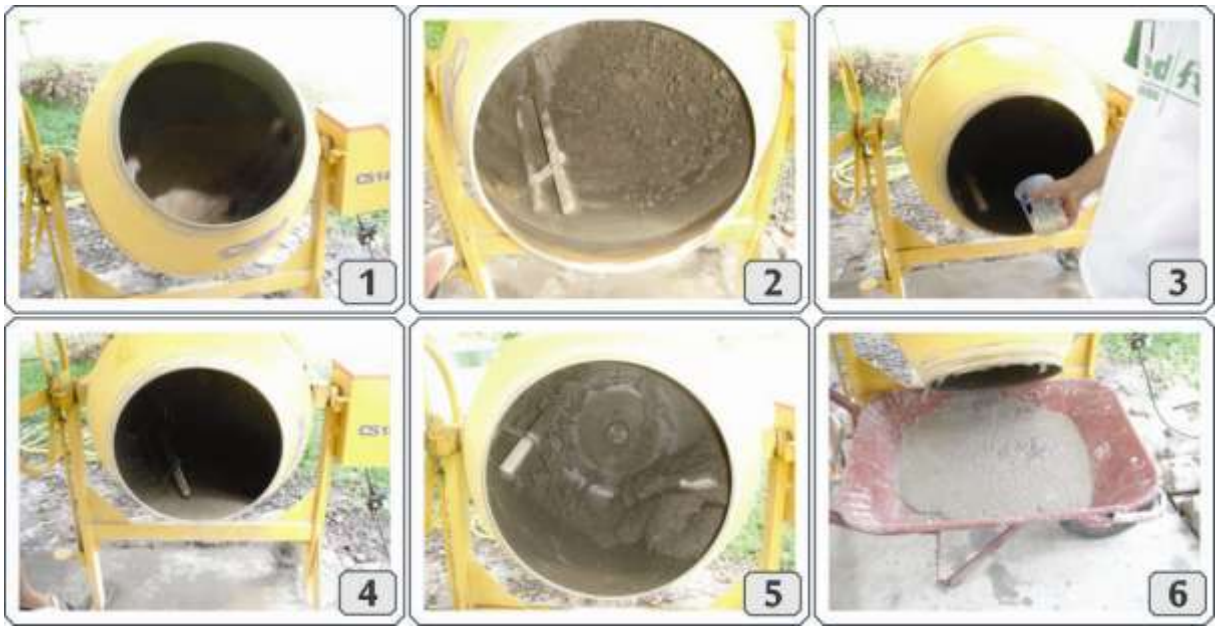


A etapa final para dosagem do CAA pautou-se no estudo da Fase Concreto. Ensaiaram-se diferentes traços com variação nos percentuais de agregado graúdo e com o ajuste do teor de superplastificante. Realizou-se a avaliação a partir das propriedades no estado fresco, através dos ensaios de *V-Funnel*, *Slump Flow*, *U-Shaped pipe*, *L-Box* e *J-Ring*, e das propriedades no estado endurecido, por meio dos ensaios de resistência à compressão em corpos-de-prova de concreto.

A mistura do concreto para moldagem dos corpos-de-prova seguiu a mesma metodologia empregada para confecção das argamassas, com o incremento da brita juntamente com os outros componentes no início da mistura.

Na Figura 6 tem-se a sequência do processo de mistura do concreto, realizado em betoneira basculante com capacidade de 145 litros, sendo confeccionados aproximadamente 10 litros de concreto para cada traço moldado.

FIGURA 6 **-** Processo de mistura do concreto: 1) Início da mistura da brita e areia, seguida da adição do cimento, Metacaulim e 90% da água; 2) Mistura dos componentes já adicionados; 3) Mistura dos 10% de água com o aditivo; 4) Parada para limpeza e descanso; 5) Mistura final no sexto e sétimo minutos; 6) Término da mistura com o lançamento em uma carriola.



A Figura 7 apresenta o ensaio de *Slump Flow* para verificação do espalhamento do concreto, com foco principal no deslocamento do agregado graúdo do centro até a extremidade do círculo formado pelo CAA, análise esta que permite identificar problemas de exsudação e segregação.

FIGURA 7 - Espalhamentos do CAA pesquisado: 1) Concreto com elevada exsudação na parte externa do espalhamento; 2) Concreto com exsudação e segregação, no centro e ao final do espalhamento; 3) Concreto com baixa fluidez e pouca deformabilidade e 4) Concreto com fluidez adequada.



Os corpos-de-prova foram devidamente identificados com numeração codificada para cada parte constituinte do compósito, conforme a Figura 8, com intuito de evitar erros na identificação durante o processo de armazenamento para cura e posterior rompimento.

FIGURA 8 - Identificação dos corpos-de-prova de CAA: a) Codificação adotada para melhor identificação; b) Corpos-de-prova devidamente identificados prontos para início da cura.



A Figura 9 ilustra o ensaio de resistência mecânica à compressão nos corpos-de-prova de concreto antes e após a sua ruptura.

FIGURA 9 - Ensaio de resistência mecânica à compressão em prensa manual de 100 toneladas: 1) Corpos-de-prova durante o rompimento; 2) Corpos-de-prova já rompidos.



3 Resultados e Discussão

A fim de sintetizar os resultados desta pesquisa serão abordados na sequência os resultados obtidos na fase final para elaboração do CAA, denominado neste artigo de Fase Concreto. Os resultados estão dispostos em parcelas dos ensaios obtidos no estado fresco do

concreto, para ambos os aditivos superplastificantes (G51 e S3535), assim como os resultados encontrados para o estado endurecido.

Na Tabela 5 foram agrupados todos os parâmetros encontrados nos ensaios para o CAA no estado fresco para o aditivo superplastificante aqui denominado como G51.

TABELA 5 - Síntese dos parâmetros de trabalhabilidade para o aditivo superplastificante G51

RESULTADOS DO CAA COM USO DO ADITIVO G51					
ENSAIO	***V-FUNNEL***	***SLUMP FLOW***	***J-RING***	***L-BOX***	***U-SHAPED PIPE***
Código do CAA	Escoamento (segundos)	Espalhamento (milímetros)	Espalhamento (milímetros)	Relação H_1 e H_2	Relação P_1, P_2 e P_3
4451444030	**5'16''**	**60,5**	**68,5**	**0,88**	**0,92 e 0,96**
4451544035	**5'11''**	**46**	**	**	**
4451944040	**12'41''**	**47**	**	**	**

** Ensaio não realizado uma vez que o ensaio anterior não resultou em parâmetros mínimos para validação do CAA.

Na Tabela 6 são apresentados os parâmetros encontrados nos ensaios para o CAA no estado fresco para o aditivo superplastificante S3535.

TABELA 6 - Síntese dos parâmetros de trabalhabilidade para o aditivo superplastificante S3535

RESULTADOS DO CAA COM USO DO ADITIVO S3535					
ENSAIO	***V-FUNNEL***	***SLUMP FLOW***	***J-RING***	***L-BOX***	***U-SHAPED PIPE***
Código do CAA	Escoamento (segundos)	Espalhamento (milímetros)	Espalhamento (milímetros)	Relação H_1 e H_2	Relação P_1, P_2 e P_3
4451444030	**4'81''**	**69,00**	**64,00**	**0,90**	**1,05 e 1,06**
4451544035	**6'94''**	**60,50**	**60,25**	**0,71**	**
4451944040	**29'31''**	**58,50**	**	**	**

** Ensaio não realizado uma vez que o ensaio anterior não resultou em parâmetros mínimos para validação do CAA.

Na Tabela 7 têm-se os resultados obtidos nos ensaios do CAA para avaliação de suas propriedades em estado endurecido para os aditivos G51 e S3535.

TABELA 7 - Síntese das resistências à compressão obtidas com os aditivos G51 e S3535

RESULTADOS DAS RESISTÊNCIAS MÉDIA À COMPRESSÃO PARA AMBOS ADITIVOS		
CÓDIGO DO CAA / ADITIVO ADOTADO	**RESISTÊNCIA AOS 7 DIAS (MPa) ***	**RESISTÊNCIA AOS 21 DIAS (MPa) ***
4451444030 / *G51*	**37,87**	**40,76**
4451244030 / *S3535*	**49,16**	**53,06**

* Base nos valores da Média dos 3 (três) corpos-de-prova rompidos as idades de 7 e 21 dias, respectivamente.

Os parâmetros reológicos das pastas foram obtidos com base no ensaio de Cone de Marsh, em virtude da facilidade de execução e confiabilidade dos resultados de escoamentos. Todos os resultados obtidos durante este ensaio, para os dois superplastificantes empregados, forneceram percentuais de aditivo próximos aos valores que posteriormente foram adequados durante os ensaios nas fases argamassa e concreto, demonstrando uma alternativa eficaz para determinação dos parâmetros de fluidez das pastas.

Na fase argamassa, os parâmetros foram basicamente adquiridos pelo Ensaio de Kantro por conta dos fatores ligados à facilidade e confiabilidade de seus resultados. Dentre os percentuais de agregados miúdos avaliados (40, 45 e 50%), o percentual de 40% forneceu melhores resultados uma vez que a quantidade de pasta é superior, o que diminuiu o atrito interno entre as partículas e contribuiu para a elevação da fluidez da mistura e, entretanto, elevou o consumo de cimento fornecendo misturas menos econômicas.

Deste modo, dentre os três percentuais adotados de agregados miúdos considerou-se apenas o percentual de 40% para os ensaios posteriores na Fase Concreto. Isto se deve ao fato dos percentuais de 45 e 50% terem demonstrado baixa fluidez, decorrente da grande quantidade de partículas de areia e o baixo percentual de pasta, ocasionando uma elevação do atrito interno entre partículas presentes na argamassa, o que acarretou na elevação do teor de aditivo superplastificante favorecendo a ocorrência de patologias como exsudação e segregação.

O processo de produção e dosagem do CAA realizado nesta pesquisa mostrou-se eficaz, porém, apenas sob elevado controle tecnológico das condições dos materiais empregados em sua confecção e também do ambiente durante a realização de cada traço. A umidade e absorção dos agregados miúdo e graúdo, a condição de estocagem do cimento, Metacaulim e aditivos foram fatores que possibilitaram alterações em diversos resultados que, posteriormente, tiveram que ser novamente realizados.

Dentre os principais problemas observados durante a confecção dos traços, os efeitos da temperatura do ambiente foram os mais relevantes, principalmente por aumentar a velocidade das reações químicas durante as misturas do cimento, da água e do aditivo, com elevação das perdas de fluidez e trabalhabilidade do CAA no seu estado fresco ou com efeito contrário, por promover concretos sujeitos a exsudação e segregação.

O emprego dos aditivos superplastificantes G51 e S3535 atendeu aos requisitos básicos para produção de um concreto altamente fluido, sendo que o primeiro dispôs de percentual de adição superior quando comparado ao segundo, o que acarretou na elevação no custo experimental para produção do CAA confeccionado com o aditivo G51, quando comparado com o aditivo S3535.

Ainda pôde ser observado, no que condiz ao uso dos aditivos, um acréscimo de resistência superior a 10 MPa do concreto produzido com o superplastificante S3535, quando comparado ao concreto confeccionado com o aditivo G51 (Tabela 7). A identificação das causas deste decréscimo não foi devidamente aprofundada, porém, de modo geral, ambos os aditivos resultaram em concretos com fluidez e coesão satisfatórios.

No que se refere ao emprego da adição mineral de Metacaulim, seu uso forneceu a coesão necessária à mistura de modo a não permitir a ocorrência de patologias como a segregação e exsudação, além de proporcionar a elevação da resistência mecânica em aproximadamente 8% quando comparada as pastas sem nenhuma adição.

Em se tratando do cimento pozolânico CP IV, seu uso atendeu aos parâmetros de trabalhabilidade e resistência à compressão estabelecidos pela metodologia de dosagem empregada nesta pesquisa, com a definição de dois traços, com os superplastificantes G51 e S3535, que forneceram boa compatibilidade cimento/aditivo e proporcionaram misturas altamente fluidas e com excelente coesão das partículas.

4 Conclusões

Esta pesquisa permitiu iniciar estudos investigativos referentes à viabilidade da aplicação desta particularidade de CAA, dados os materiais empregados em sua dosagem. Com relação ao Estado de Mato Grosso, este estudo vem a contribuir com o desenvolvimento de pesquisas de inovação tecnológica em Concretos Auto-Adensáveis, colaborando com melhorias da produtividade em concretagens de elementos estruturais na construção civil.

Este ganho de produtividade pode ser alcançado, caso o CAA desenvolvido neste estudo avance do campo experimental para o nível industrial, o que possibilitaria seu emprego em elementos estruturais complexos que necessitem de um material com elevada fluidez e trabalhabilidade.

Ao mesmo tempo, o CAA confeccionado com o cimento CP IV apresentou como particularidade um elevado tempo de pega, quando comparado a concretos especiais e convencionais produzidos à base do cimento CP V-ARI ou CP II. Isto se deve à característica intrínseca do cimento CP IV, que possui baixo calor de hidratação em razão das adições pozolânicas presentes em sua composição. Em se tratando do emprego deste concreto na indústria da construção civil, esta pesquisa constatou a inviabilidade de sua aplicação em situações que tenham como exigência principal uma rápida desmoldagem da estrutura concretada, como é o caso das indústrias de pré-moldados.

Em contrapartida, a produção deste CAA demonstrou ser viável para estruturas moldadas *in loco*, principalmente em obras com grande volume de concretagem e que demandem concretos com baixo calor de hidratação e elevada fluidez.

Os estudos experimentais realizados com os dois aditivos evidenciaram que ambos possuem compatibilidade com o cimento CP IV, contudo, os melhores resultados foram fornecidos pelo aditivo S3535.

Logo, a pesquisa experimental do CAA com uso do cimento CP IV, da adição de Metacaulim, bem como dos dois aditivos G51 e S3535 revelou a existência de viabilidade da expansão dos estudos com este concreto, contribuindo para o desenvolvimento de novas pesquisas que visem o desenvolvimento deste material.

5 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7ª ed. São Paulo, 2002.

ABNT. **NBR 5736 - Cimento Pozolânico**. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT. **NBR 7211 - Agregado para concreto**. Rio de Janeiro, 2009.

ASTM. **ASTM C 1017 - Method of panel spalling testing high-duty fireclay brick**. Withdrawn, 1994.

ASTM. **ASTM C 494 - Standard specification for chemical admixtures for concrete**. Philadelphia, 2006.

BOSILJKOV, V. B. SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1279-1286, 2003.

COPPOLA, L. Self-compacting concrete. **Concrete Technology**, p. 42-47, 2000.

FERRAZ, A. L. N. **Avaliação de Retração e Fluências do Concreto Auto-Adensável para Aplicação em Elementos Pré-Moldados**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Unicamp, 253 p., 2009.

GOMES, P. C. C.; GETTU, R.; AGULLÓ, L. Uma nova metodologia para obtenção de concretos auto-adensáveis de alta resistência com aditivos minerais. In: V SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2003, São Paulo.

JOZIĆ, D. & ZELIĆ, J. The effect of fly ash on cement hydration um aqueous suspensions. **Journal Ceramics**, v. 50, p. 98-105, 2006.

LIMA, J. A. R. **Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EPUSP, 129 p., 2010.

MELO, K. A. **Consideração à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 180 p., 2005.

NUNES, S. C. B. **Betão auto-compactável: Tecnologia e propriedades**. Pós-graduação em Estruturas de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 198 p., 2001.

OKAMURA, H. Self-compacting high performance concrete. In: CONCRETE INTERNATIONAL. v. 19, n. 7, p. 50-54, 1997.

PROSKE, T. & GRAUBNER, C. A. Self-compacting concrete-pressure on formwork and ability to deaerate. In: DARMSTADT CONCRETE, 2002.

REPETTE, W. L. Self-compacting concrete – a labor cost evaluation when used to replace traditional concrete in building construction. In: 5th INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 2007, Ghent, Bélgica.

RIO DE JANEIRO. SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Distribuição percentual média, entre os anos de 2001 e 2006, dos cimentos produzidos nacionalmente.** Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.snic.gov.br>. Acesso em: 25 jan. 2011.

SHINDOH, T. & MATSUOKA, Y. Development of combination-type self-compacting concrete and test methods. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 1, p. 23-36, 2003.

UNO, Y. State-of-the-art-report on the concrete products made of self-compacting concrete. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1998, Japão.

ZHU, W. & BARTOS, P. Permeation properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 921-926, 2003.