Anais do
60º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2018
Setembro / 2018

@ 2018 - IBRACON - ISSN 2175-8182

Nanotecnologia aplicada a concretos: estudo da influência da sílica coloidal nas propriedes no estado fresco e endurecido

Nanotechnology applied to concretes: colloidal silica influence on concrete properties in the wet state and after hardening

Carlos Britez (1); Marcus Vinicius M Magliano (2); Paulo Helene (3)

(1) Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Britez Consultoria. britez.consultoria@gmail.com
(2) Mestre em Engenharia de Materiais. Gerente de negócio AKZONOBEL – LEVASIL vinicius.magliano@akzonobel.com
(3) Professor Titular da Universidade de São Paulo. PhD Engenharia. paulo.helene@concretophd.com.br

Resumo

Atualmente, a temática sobre nanotecnologia aplicada a materiais compósitos, do tipo concreto base cimento, está cada vez mais em evidência. Aspectos relacionados com um material de tecnologia avançada, onde é possível controlar características no estado fresco (como a coesão, a viscosidade, a exsudação e a segregação) e suas propriedades e padrões no estado endurecido (como a resistência nas primeiras idades, os requisitos estéticos e o acabamento superficial), tornam-se fundamentais em projetos de diferentes demandas em obras de engenharia. Nesse contexto, este artigo apresenta um interessante estudo experimental realizado envolvendo o uso de sílica coloidal em traços de concreto, correlacionando os mecanismos e reações da nano sílica com seu benefício potencial em aplicações de concreto que necessitem de elevada resistência após horas, bom acabamento superficial e controle reológico complexo; tais como obras envolvendo paredes de concreto, produção de elementos pré-fabricados e em projetos especiais em concreto aparente e colorido.
Palavras-Chave: sílica coloidal; nanosílica; concreto e nanotecnologia; modificador de viscosidade; acelerador de resistência.

Abstract

Nanotechnology applied to composite materials such as cement-based concrete is today in evidence. Aspects related to high-tech material, that aloud to control characteristics on wet state (cohesion, viscosity, bleeding and segregation) as well as its properties after hardening such as mechanical early strength, esthetic aspects and surface finishing; became crucial in different types of projects. Considering the mentioned above, this paper aims to present experimental studies about colloidal silica applied to concrete. Correlating the reactions and gelling mechanism of colloidal silica and its potential benefits to applications where high early strength (after hours), good superficial finishing and rheological control are required. Applications such as; concrete wall, pre-shaped parts and special projects on colored concrete are potential areas for the use of this technology.
Keywords: colloidal silica; nanotechnology; nano-silica; concretes and nanotechnology, rheology modifier; early strength enhancer

1 Introdução

Cada vez mais projetos arrojados estão sendo concebidos no panorama nacional, envolvendo concretos aparentes e coloridos com detalhes arquitetônicos complexos. Nos últimos anos foi comum observar grandes ícones arquitetônicos construídos como o Museu do Amanhã e Museu da Imagem e do Som no Rio de Janeiro (MIS-RJ). Além dos aspectos relacionados com a parte estrutural ousada desses projetos, a demanda por um concreto com acabamento superficial primoroso e atributos estéticos com elevado grau de integridade e excelência é praticamente comum.

Nesse contexto, o uso do concreto tipo autoadensável se tornou atrativo e uma importante ferramenta, uma vez que o mesmo possui peculiaridades inerentes ao material como a sua capacidade de preencher o interior das fôrmas *(filling ability)*, capacidade de passar por pequenas aberturas, como o espaçamento entre barras de aço *(passing ability)* e a capacidade de permanecer uniforme e coeso durante o processo de transporte e lançamento *(segregation resistance)* (GÓMEZ E MAESTRO, 2005).

Especificamente sobre a integridade e estética de elementos de concreto, o resultado de uma superfície bem-acabada não depende exclusivamente de seus insumos constituintes, pois estes atributos também estão diretamente relacionados com um estudo de dosagem apropriado, o tipo de desmoldante empregado para remoção das fôrmas, a qualidade do painel de fôrma propriamente dito e os procedimentos de lançamento (ACI, 2006).

Independentemente da qualidade das fôrmas e desmoldantes, no que diz respeito ao lançamento do concreto autoadensável, já é sabido que engenhosidades envolvendo a altura e velocidade de lançamento, bem como o tipo e válvula do sistema de bombeamento são condicionantes para um melhor acabamento superficial (BRITEZ et al 2015; BRITEZ et al 2016). Fatores relacionados com a metodologia de lançamento do concreto também podem ser determinantes para anomalias estéticas de solução complexa, uma vez que repetidas modificações na matriz do traço, tipos de desmoldantes e qualidade das fôrmas já foram previamente promovidas. Neste aspecto, esse artigo apresenta um estudo de caso desafiante cujo foco principal foi a busca por um acabamento superficial condizente com as necessidades do projeto em questão, minimizando a ocorrência de indesejáveis manchas típicas superficiais e consequentemente outras falhas de concretagem, fissurações e bolhas, através do uso de sílica coloidal, na propriedade de modificador de viscosidade, na dosagem do concreto tipo autoadensável. Os resultados também demonstraram, neste caso, um aumento substancial da resistência mecânica do concreto nas primeiras idades (1 dia).

2 Conceituação sobre sílica coloidal

As sílicas coloidais consistem em nano partículas de dióxido de silício amorfo (SiO_2), estabilizadas em suspensão aquosa. O tamanho médio das partículas pode variar de 2 – 20 nm e as áreas superficiais entre 300 – 900 m^2/g. As partículas se mantêm em

movimento *browniano* constante sem que ocorra precipitação (SALINAS, 2005). As mesmas apresentam cargas negativas na superfície, que impedem a aproximação e aglomeração das partículas por repulsão eletrostática, mantendo as suspensões estáveis por um longo tempo. O material tem capacidade de reagir devido à presença de grupos hidroxilas na superfície das partículas (Si – OH) com perda de uma molécula de água. Uma vez reagido, as partículas se unem por ligações primárias (Si – O – Si), fortes e permanentes.

Diferentemente da microssílica, que é obtida por exaustão de finos utilizando filtros de manga no processo produtivo do silício metálico, a sílica coloidal é produzida por meio da polimerização controlada de silicato $Si(OH)_4$ e do ácido silícico em reatores químicos. A polimerização do ácido monosílico, $Si(OH)_4$, forma a ligação silanol em cadeia, resultando em moléculas que serão a base das nano partículas (ILER, 1979; BERGNA, 1994).

Com o decorrer da reação, formam-se moléculas esféricas que são os núcleos para o crescimento das nanopartículas até o tamanho desejado. O processo produtivo ocorre inteiramente em meio aquoso, o que resulta na presença de grupos hidroxilas (OH) na superfície das partículas. Durante a fabricação o pH é elevado a faixas entre 9 e10, causando escassez de H^+, transformando assim as terminações (Si – OH) em (Si – O^-) que possuem carga elétrica negativa intensa, gerando alta repulsão eletrostática e estabilizando o sistema.

A desestabilização da sílica coloidal e sua consequente reação formando um gel nanoestruturado ocorrem quando as cargas elétricas de superfícies são neutralizadas. Três são as formas de desestabilização: redução do pH; adição de químicos que liberem cátions em solução; ou secagem do material, que aproxima as partículas pela ausência de espaço físico. Adiante se demonstra a desestabilização por cátions, efeito que ocorre ao aplicar sílica coloidal em concretos (formação do gel). Nestes, a presença do cimento portland libera (Ca^+), neutralizando as terminações (Si – O^-) da superfície e iniciando a reação. (figura 1).

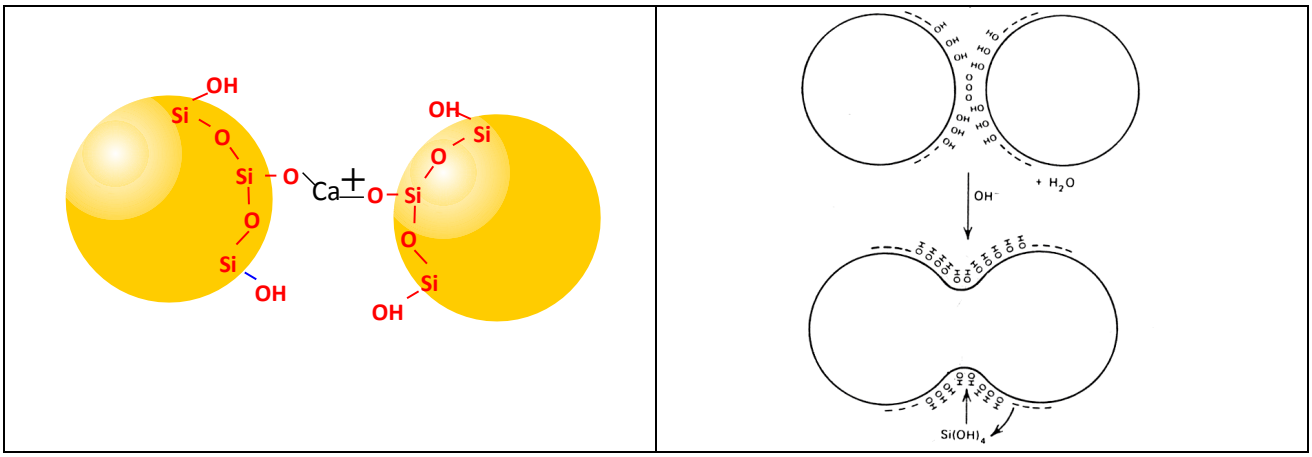


Figura 1: (a) Aproximação das partículas pelo Ca^+ (fonte: do autor) e (b) empescoçamento por dissolução e precipitação (ILER, 1979)

O ponto de junção entre as partículas é ainda reforçado pelo processo de empescoçamento, onde pelo método de dissolução e precipitação, devido à diferença de raio de curvatura entre o ponto de junção e a superfície das partículas, as moléculas de sílica migram de um local ao outro, “engrossando” o ponto de junção e aumentando a resistência do gel. A repulsividade entre as partículas durante a aproximação faz com que as colisões ocorram preferencialmente em direções opostas. Uma partícula que se aproxime de duas outras já unidas tende a colidir lateralmente em uma das extremidades (menor repulsividade), formando uma cadeia preferencialmente linear que leva a uma estrutura de “corrente ramificada” (ILER, 1979; BERGNA, 1994), ou um emaranhado tridimensional, contendo nano poros que mantém a água retida por capilaridade. Essa água é posteriormente consumida pelo cimento no processo de hidratação. A figura 2 mostra a estrutura tridimensional.

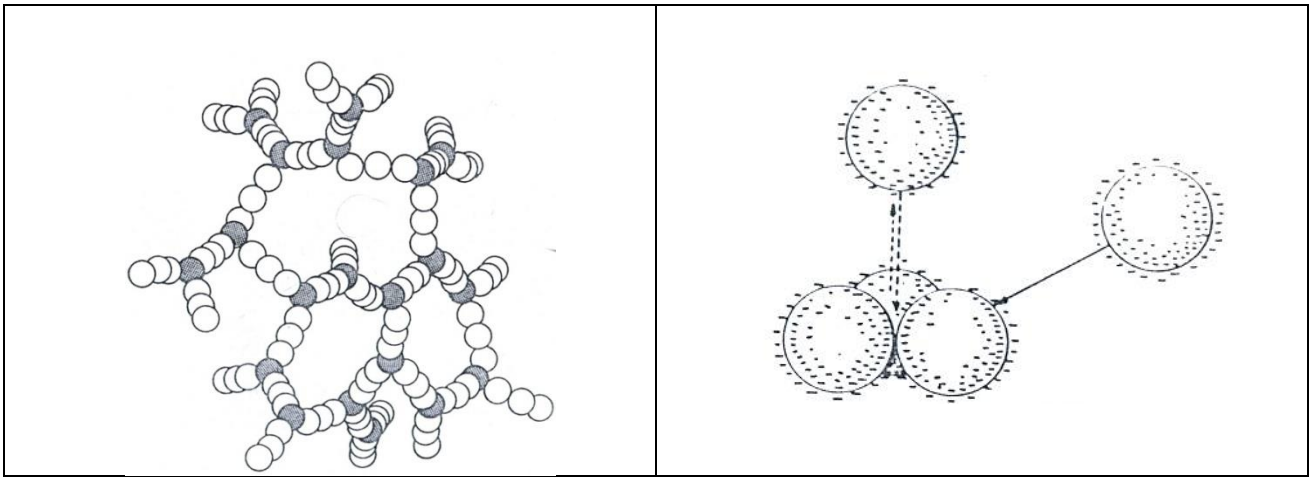


Figura 2: Estrutura de corrente ramificada que resulta em nano porosidade e repulsividade entre as partículas dificultando a aproximação por regiões de alta densidade de cargas (ILER, 1979).

Em concretos da construção civil, a sílica coloidal funciona como um agente modificador de reologia e como potencializador de resistência mecânica nas primeiras idades (LI et al 2004; SOBOVEV et al, 2009). Como explicado anteriormente, ao ser adicionada em concretos, a sílica coloidal se desestabiliza pela presença de espécies químicas catiônicas solúveis, iniciando a reação de gelificação. O gel formado, quando bem homogeneizado, permeia todo o volume do concreto (MAGLIANO; PANDOLFELI, 2010) aumentando a viscosidade e consistência da massa, mantendo os finos (argamassa do concreto) presos à sua estrutura tridimensional, dificultando a segregação (figura 2). Também importante é o efeito da capilaridade gerado pela nano porosidade do gel (ILER, 1979; BERGNA, 1994; MAGLIANO; PANDOLFELI, 2010), que retém a água no sistema, evitando exsudação. Um terceiro fator que também contribui para incremento da consistência da massa é o aumento da força iônica do sistema, gerado pela alta densidade de carga negativa das partículas de sílica coloidal.

A resistência inicial dos concretos que utilizam sílica coloidal é potencializada por dois efeitos distintos que ocorrem simultaneamente (formação de nano sementes de CSH e efeito ligante da sílica coloidal.

Formação de nano sementes de CSH: Conforme ficha técnica AKZONOBEL (2018) (Levasil CB45 A), as nano partículas de sílica coloidal apresentam alta reatividade devido a áreas superficiais da ordem de 500 - 900 m^2/g. Atrelada à presença de grupos hidroxilas (Si – OH), faz com que haja reação imediata com o cimento, assim que o mesmo inicia sua dissolução, formando sementes de cristais CSH de dimensões nanométricas, essas sementes aceleram a hidratação pelo processo de solução precipitação, formador dos cristais de CSH (JEWED; YOUNG, 1983; THOMAS, 2006).

Esse efeito pode ainda ser potencializado ao se utilizar microssílica na composição do traço. De acordo com a literatura (MALHOTRA; CARETTE, 1982; BERGNA, 1994), a microssílica aumenta a resistência do concreto pela reação do dióxido de silício (SiO_2) com o hidróxido de cálcio sobressalente do cimento, formando uma quantidade extra de CSH (CSH secundário). Essa reação, no entanto, tem início após 3 a 7 dias de cura, devido a menor reatividade da microssílica em comparação a sílica coloidal. O uso conjunto de microssílica com sílica coloidal, no entanto, antecipa essa reação, pela sementação de CSH nanoestruturado, formado pelas nanopartículas, acelerando a formação do CSH secundário proveniente da microssílica. Portanto, o uso da microssílica em conjunto com sílica coloidal gera uma sinergia com potencial ganho de resistência final e principalmente inicial.

Efeito ligante da sílica coloidal: Outro mecanismo de aumento da resistência inicial é o próprio efeito ligante do gel de sílica coloidal. Magliano e Pandolfeli (2010) demonstraram o poder ligante da sílica coloidal em concretos refratários, ao comparar formulações semelhantes utilizando diferentes sistemas ligantes. Outras aplicações cerâmicas também utilizam a sílica coloidal como único agente ligante. Na construção civil, esse efeito ocorre em menor escala devido à baixa dosagem utilizada 0,4 – 1,2% em massa de cimento.

3 Dados de projeto, conhecimento do problema, traço e estudos realizados (protótipos)

3.1 Dado básicos de projeto

Por questões de confidencialidade, o projeto em questão não será identificado pelo nome. Entretanto, trata-se de uma obra em concreto aparente preto (pigmentado com pigmento inorgânico base óxido de ferro), a ser construída na região do centro da cidade de São Paulo. Possui elevado padrão e projeto de grande visibilidade. O concreto aparente colorido estava previsto, na oportunidade do estudo, para aplicação em empenas lisas na fachada com grandes vãos, o que propicia a constatação de anomalias do tipo manchas, por exemplo.

Conforme informações obtidas precedentemente aos estudos realizados, o uso de concreto autoadensável foi especificado em função basicamente da minimização de falhas de concretagem e dificuldades de lançamento, bem como por questões atreladas a produtividade e de conforto da vizinhança, como ruídos etc. Também, ao que se apurou, esperava-se uma maior uniformidade/homogeneidade dos elementos aparentes.

3.2 Conhecimento do problema

O principal desafio do estudo consistiu em solucionar um problema complexo relacionado com a eliminação de manchas anômalas típicas recorrentes nos protótipos construídos em canteiro de obras. Exemplos desse problema podem ser observados na figura 3.

Figura 3 – Conhecimento do problema: manchas típicas anômalas aparentando a “fotografia” da armadura dos estribos.

Para desmistificar se as manchas estavam relacionadas com o posicionamento das armaduras dos estribos, procedeu-se com um teste de campo expedito em um protótipo de grande porte localizado no canteiro da obra, por meio de extração de testemunhos (caso a direção dos estribos coincidisse com as manchas anômalas poder-se-ia estabelecer uma eventual relação entre a armadura e o óxido de ferro do pigmento disperso, por meio de propriedades magnéticas, por exemplo). Na oportunidade, constatou-se que, de fato, as manchas, em sua maioria, não coincidiam com a posição dos estribos, inclusive, em alguns casos, bem deslocadas.

De posse dessas informações e condicionantes iniciais, partiu-se para a verificação do traço de concreto para posterior proposição de variações e melhorias, a fim de solucionar a questão das manchas típicas, bem como de eventuais condições de lançamento atreladas ao fenômeno observado.

3.2 Traços de concreto e estudos realizados (protótipos)

O traço de referência autoadensável pode ser observado na tabela 1. Esse traço inicialmente foi desenvolvido pela empresa responsável pelos serviços de concretagem e verificado no laboratório da Votorantim Cimentos / Engemix S.A (unidade do bairro do Jaguaré em São Paulo) pelos autores desse artigo. Tratava-se de um traço condizente com as especificações de projeto e normalização vigente (ABNT, 2017), exceto pelas questões de manchas nos protótipos de grandes proporções construídos em campo previamente. O traço em questão importava num espalhamento médio de 70 cm, teor de ar aprisionado de 2 %, habilidade passante de 1,0 (nivelado 100%) e massa específica de 2450 kg/m³. As resistências à compressão obtidas em laboratório também foram bem superiores ao especificado de 60 MPa, provavelmente muito em função de sua relação

água/cimento especificada, do método de empacotamento empregado no estudo de dosagem (com uso de brita 1) e qualidade dos insumos.

Tabela 1 – Traço candidato, em **materiais secos**, com f_{ck} especificado de 60 MPa aos 28 dias de idade.

Traço do concreto (m³)	***concebido para $f_{ck} \geq 60$ MPa***
consumo de cimento por m³ (CP IIE-40 – Votoran / Unidade Santa Helena)	364,0 kg
adição de sílica ativa (Tecnosil)	30,0 kg
relação água/(cimento+adição)	0,47
água livre + água da umidade das areias (traço seco) - materiais secos + água de amassamento, areias secas (quando dosar na central, considerar umidade reais das areias e corrigir valor, vide abaixo)	185kg
teor de argamassa	62,0%
ar incorporado (aferido em laboratório)	2,0%
slump-flow aferido em laboratório	em média 70 cm
massa específica aferida em laboratório	2450 kg/m³
areia natural de cava (Extrabase) - quartzo	583 kg
areia de brita Tipo II (VC Araçariguama) - calcário	413 kg
brita 0 (VC Araçariguama) - calcário	604 kg
brita 1 (VC Araçariguama) - calcário	258 kg
aditivo polifuncional (MIRA 94, GCP)	1,18 kg
aditivo superplastificante (ADVA FLOW 422, GCP)	3,54 kg
aditivo modificador de viscosidade (V-MAR BR01, GCP)	0,39kg
pigmento (3,0%) (Bayferrox® 318 PF, LanXess)	11,80 kg

A fim de se estudar melhorias no traço, com o intuito de eliminar as manchas observadas nos protótipos construídos em canteiro de obras, durante 60 dias foram ensaiadas mais de 50 variações neste traço de referência. Inicialmente, foi pesquisada a possibilidade de algum insumo possuir resíduos escuros em sua composição que pudessem de alguma forma ainda desconhecida contaminar a superfície em forma de mancha. Sendo assim, com auxílio de um equipamento de mistura (THB20 Misturador Versátil, da Betomaq), agitou-se e colocou-se todos os insumos “de molho”, isoladamente, para verificar se haveria algum material sobrenadante. Na ocasião, observou-se que nenhum agregado graúdo e miúdo possuía resíduos escuros sobrenadantes em sua composição, que a sílica ativa (em pó) exsudava bem pouco e que o pigmento base óxido de ferro exsudava parte de sua composição (resíduos escuros).

Tal fato foi levado ao conhecimento da empresa responsável pelo fornecimento do pigmento inorgânico base óxido de ferro, a qual acionou sua equipe técnica na Alemanha para diversos testes. Na ocasião, foi aventada a hipótese de um fenômeno conhecido como *ghosting effect*[1], pouco conhecido no Brasil, e que o mesmo poderia ser minimizado

[1] Esse fenômeno, segundo o *The Concrete Countertop Institute*, sediado na Carolina do Norte, (http://www.concretecountertopinstitute.com), não está relacionado com o posicionamento e baixo cobrimento da armadura, estando relacionado com outras propriedades do traço de concreto, insumos e até metodologia de execução (THE CONCRETE COUNTERTOP INSTITUTE, 2018).

por meio do uso de taxas elevadas (da ordem de 0,5% com relação ao consumo de cimento por metro cúbico de concreto) de um aditivo estabilizador[2], espécie de modificador de viscosidade. Não obstante, para a realidade nacional, uma taxa tão elevada de um aditivo dessa natureza provavelmente implicaria em um teor de ar aprisionado no concreto superior a 5%, comprometendo os parâmetros de resistência mecânica do traço de concreto e consequentemente a durabilidade e vida útil da estrutura, ou seja, altamente não recomendado.

Em pesquisa realizada no panorama nacional, foram encontrados dois aditivos com possíveis características de estabilização, o aditivo espessante Lubrifill da GCP e o aditivo multifuncional modificador Levasil CB45-A, em forma de sílica coloidal, da AKZONOBEL, foco desse artigo, sendo os dois testados nos traços estudados experimentalmente.

Realmente, quando do uso de aditivos modificadores/estabilizadores, esse material sobrenadante era visível em uma quantidade muito menor no interior da betoneira (quando interrompida a mistura para análise) e nos corpos de prova, inexistentes (vide sequência das fotos da figura 4).

Figura 4 – (a) Exemplo do traço de referência sem uso de aditivo modificador/estabilizador e com pigmento (4,2%): muito material escuro sobrenadante; (b) – Exemplo do traço de referência sem uso de aditivo modificador/estabilizador e sem pigmento: ausência de material escuro sobrenadante na superfície do corpo de prova; (c) Exemplo do traço de referência com uso de aditivo modificador/estabilizador (0,5%) e com uso de pigmento (4,2%): material escuro sobrenadante incipiente.

Com base nas observações da figura 4, na tipologia das manchas dos protótipos de grande porte construídos no canteiro de obras e em experiências anteriores recentes dos autores deste artigo envolvendo concreto aparente e colorido, suspeitava-se que algo também poderia estar relacionado com o modo de lançamento do concreto, em outras palavras que as manchas estariam correlacionadas com etapas “virtuais” de concretagem (preenchimento inconstante da fôrma pelo bombeamento e direcionamento do mangote), mesmo que num evento de concretagem ininterrupto.

Por exemplo, mesmo sendo uma concretagem contínua, a fôrma é preenchida de uma ponta da parede/elemento até a outra. Neste caso, o preenchimento da fôrma é realizado até uma determinada cota de nivelamento que depende da vazão do concreto lançado e das dimensões da parede/elemento. Como a parede não muda de largura e de espessura nos protótipos construídos, esses preenchimentos são de mesma cota e sucessivos,

[2] Na oportunidade, foi recomendado o uso do produto *Stabilizer 4R* da SIKA incorporado ao traço de concreto em dosagem elevada (0,5% da massa de cimento), o qual não estava disponível no Brasil.

induzindo a mancha típica e anômala, a qual pode ser mais proeminente em função da exsudação natural do concreto (material sobrenadante do pigmento e finos), que, pelo fato ser autoadensável, não é vibrado. Como se trata de um excelente concreto autoadensável, essa mancha era bem nivelada e até poderia estar na direção do estribo, somente por coincidência.

Para comprovar essa teoria, propôs-se um importante teste envolvendo seis caixas que seriam concretadas com diferentes modos de lançamento do concreto, inclusive com adensamento mecânico por meio de vibrador de imersão em alguns casos, e com dois tipos de aditivos estabilizadores. Empregou-se o traço de referência (tabela 1), exceto pelo maior teor de pigmento (6% ao invés de 3%) em todos os casos e d a mudança do aditivo modificador/estabilizador Lubrifill (da GCP) pelo Levasil CB45-A (da AkzoNobel) em duas caixas, a fim de se verificar as questões de desempenho estético (evidente com os modos de lançamento iguais nesses casos coincidentes).

As caixas foram confeccionadas com a mesma fôrma especial DOKA que provavelmente será empregada na obra no futuro (com revestimento especial interno para concreto aparente) e com aplicação do mesmo desmoldante (Desmoltec 25 da GCP). Em um dos lados foi adaptada uma placa de acrílico, a fim de verificar o comportamento do concreto (eventual mancha se formando no estado fresco) durante o seu lançamento. As caixas possuíam as seguintes dimensões: 60cm x 60cm x 20cm, o que totalizava um volume de 72 litros. As mesmas foram preenchidas com 60 litros, a fim de se verificar o material sobrenadante na superfície. As premissas para os diferentes modos de lançamento do concreto nas caixas foram as seguintes:

- *Caixa 1: concreto lançado de uma única vez sem adensamento por vibrador de imersão;*
- *Caixa 2: concreto lançado até a metade da altura da caixa (aproximadamente 30cm), aguardar o tempo de 5 minutos, simulando a concretagem em canteiro de obras, lançar a outra metade, sem adensamento por vibrador de imersão;*
- *Caixa 3: concreto lançado até a metade da altura da caixa (aproximadamente 30cm), adensar com vibrador de imersão, aguardar o tempo de 5 minutos, simulando a concretagem em canteiro de obras, lançar a outra metade e proceder com novo adensamento por vibrador de imersão na segunda camada;*
- *Caixa 4: concreto lançado de uma única vez e posteriormente adensado por vibrador de imersão;*
- *Caixa 5: idem Caixa 2, exceto pelo uso do aditivo estabilizador modificador do fabricante AkzoNobel, ao invés da GCP;*
- *Caixa 6: idem Caixa 1, exceto pelo uso do aditivo estabilizador modificador do fabricante AkzoNobel, ao invés da GCP.*

As caixas, precedentemente a concretagem, podem ser observadas na figura 5. O lançamento do concreto foi realizado durante aproximadamente 6 horas, num único evento. Não houve moldagem de corpos de prova nesse evento e nem avaliações do concreto no estado fresco, por meio de ensaios, pois o único interesse seria o de avaliar o comportamento do concreto no preenchimento das caixas.

Figura 5 – Detalhe das seis caixas (face frontal com a placa de acrílico), precedentemente ao lançamento do concreto.

Na oportunidade do lançamento da Caixa 1, não foi observada a formação de manchas, embora esse tipo de modo de lançamento em obra seria hipotético (constante e ininterrupto ao longo de toda a extensão da parede), mas caso assim o fosse a probabilidade de manchas seria nula. Apesar do uso de aditivo modificador de viscosidade (Lubrifill, da *GCP*) notou-se um material escuro sobrenadante exsudado na superfície (topo), em boa quantidade. Na Caixa 4, foi observada a formação de uma mancha bem espalhada ao longo de toda a parede de forma mais discreta, provavelmente em função do adensamento por meio de vibrador de imersão “expulsar” para a superfície o resíduo mais escuro de forma distribuída. O aspecto foi de uma mancha “rajada”, pois a superfície não ficou tão homogênea como a observada na Caixa 1. Na Caixa 6, não foi observada a formação de manchas, embora, como comentado na Caixa 1, esse tipo de modo de lançamento em obra seria hipotético (constante e ininterrupto ao longo de toda a extensão da parede), mas caso assim o fosse, a probabilidade de manchas seria nula. Apesar do uso de aditivo estabilizador, notou-se também material escuro sobrenadante exsudado na superfície (topo), entretanto bem mais discreto que na Caixa 1, confirmando também o melhor desempenho da sílica coloidal como aditivo estabilizador.

Na Caixa 2 ficou clara a formação de uma mancha bem na intersecção das duas etapas de concretagem. Esse modo de lançamento é bem semelhante ao que ocorre em canteiro de obras. O tempo de cinco minutos entre uma concretagem e outra potencializou a exsudação dos finos e do material sobrenadante na superfície da primeira camada e, quando lançada a segunda camada, esse resíduo escuro, por pressão, foi “empurrado” para as faces (paredes da caixa) fazendo com que se manifestasse uma mancha parecida com as dos protótipos construídos em obra. Inclusive, com a mesma espessura (que depende da largura da parede). Nas fotos, a mancha está mais arqueada em virtude de o lançamento com balde ser realizado pelo centro da caixa. Na Caixa 5 houve a formação de uma mancha na intersecção das duas etapas de concretagem, entretanto bem mais discreta do que ocorrido na Caixa 2, com mesmo modo de lançamento. Neste caso, ficou evidente o melhor desempenho da sílica coloidal como aditivo estabilizador, no que tange a inibir a formação de manchas.

Na Caixa 3 também ficou clara a formação de uma mancha bem na intersecção das duas etapas de concretagem e foi potencializada pelo adensamento com vibrador de imersão. Esse modo de lançamento não ocorrerá em canteiro de obras, mas serviu (e muito) para potencializar e simular a exsudação dos finos do concreto, que certamente acontece em mesma magnitude em obra, em função da tipologia da mancha manifestada. O tempo de cinco minutos e, principalmente, o adensamento entre uma concretagem e outra potencializou a exsudação dos finos e do material sobrenadante na superfície da primeira camada e, quando lançada a segunda camada, esse resíduo escuro, por pressão, foi "empurrado" para as faces (paredes da caixa) fazendo com que se manifestasse a mancha [muito parecida com a mancha encontrada nos protótipos, inclusive quanto à espessura].

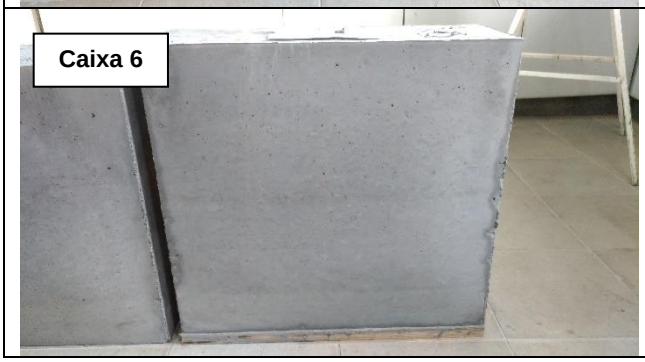
Após três dias da concretagem das caixas foi procedida a desfôrma. O aspecto das seis amostras pode ser observado na figura 6 e na tabela 2. É evidente que a questão das manchas é muito mais relacionada com o modo de lançamento do que com as características do material concreto empregado, no caso específico, envolve os procedimentos e boas práticas da operação de concretagem. Tal constatação motivou um ajuste no traço com o intuito de melhorar a exsudação e reduzir ainda mais o consumo de água por metro cúbico, conforme será discutido adiante.

Figura 6 – Detalhe das seis amostras (caixas desformadas) e evidente diferença no aspecto superficial, em função do modo de lançamento.

@ 2018 - IBRACON - ISSN 2175-8182

Tabela 2 – Aspectos das caixas desformadas e comentários (concreto dosado com 6% de pigmento).

	Excelente aspecto superficial. Concreto lançado em etapa única. Aditivo estabilizador: Lubrifill, da GCP.
	Aspecto superficial insatisfatório em função do modo de lançamento (mancha evidente). Concreto lançado em duas camadas iguais com intervalo de descanso de 5 minutos, sem adensamento por meio de vibrador de imersão. Aditivo estabilizador: Lubrifill, da GCP.
	Aspecto superficial insatisfatório em função do modo de lançamento (mancha evidente na parte superior bem parecida com o ocorrido em obra). Concreto lançado em duas camadas iguais com intervalo de descanso de 5 minutos, com adensamento por meio de vibrador de imersão em cada camada lançada. Aditivo estabilizador: Lubrifill, da GCP
	Aspecto superficial insatisfatório em função do modo de lançamento (mancha distribuída ao logo da superfície (rajada) e mais escura no topo potencializada pelo adensamento. Concreto lançado em etapa única e adensado por meio de vibrador de imersão. Aditivo estabilizador: Lubrifill, da GCP

	Aspecto superficial comprometido em função do modo de lançamento (mancha bem mais discreta que na Caixa 2). (Lançamento idem Caixa 2): concreto lançado em duas camadas iguais com intervalo de descanso de 5 minutos, sem adensamento por meio de vibrador de imersão. Aditivo estabilizador: CB45-A, da AkzoNobel.
	Excelente aspecto superficial. (Lançamento idem Caixa 1): concreto lançado em etapa única. Aditivo estabilizador: CB45-A, da AkzoNobel.

3 Proposição de melhorias e resultados

Isto posto, a principal tentativa para corrigir a questão da exsudação foi a de usar dois conceitos dentro da teoria de materiais e de concreto colorido. As duas ações tomadas simultaneamente no traço de concreto de referência (tabela 1) foi elevar o teor de sílica de 7,5% para 15% e reduzir a relação água/aglomerantes de 0,47 para 0,4 (tabela 3). Para se obter um traço de concreto autoadensável semelhante ao de referência fora necessário ainda reduzir o teor de argamassa de 62% para 58%. Essa correção foi proposta e estudada em laboratório para o concreto no estado fresco. O traço em questão importou num espalhamento médio de 65 cm. Alguns aspectos desse traço podem ser observados na figura 7. Foram dosados dois traços sendo um deles com o aditivo superplastificante ADVA 422 da GCP (Traço T 83) e outro com o aditivo superplastificante SCC 160 da BASF (Traço T 82).

Tabela 3 – Traço referência ajustado, em **materiais secos**, f_{ck} especificado de 60 MPa aos 28 dias.

Traço do concreto (m³)	***f_{ck} ≥ 60 MPa***
consumo de cimento por m³ (CP IIE-40 – Votoran / Unidade Santa Helena)	379,0 kg
adição de sílica ativa (Tecnosil)	67,0 kg
relação água/(cimento+adição)	0,40
água livre + água da umidade das areias (traço seco) - materiais secos + água de amassamento, areias secas (quando dosar na central, considerar umidade reais das areias e corrigir valor, vide abaixo)	179kg
teor de argamassa	58,0%
slump-flow aferido em laboratório (T82) / (T83)	61 cm / 68 cm
massa específica estimada	2500 kg/m³
areia natural de cava (Extrabase) - quartzo	540 kg
areia de brita Tipo II (VC Araçariguama) - calcário	360 kg
brita 0 (VC Araçariguama) - calcário	585 kg
brita 1 (VC Araçariguama) - calcário	390 kg
aditivo polifuncional (MIRA 94, GCP)	1,5 kg
aditivo superplastificante (ADVA FLOW 422, GCP) / (GLENIUM SCC 160 da BASF)	4,6 kg / 4,2 kg
aditivo modificador de viscosidade (V-MAR BR01, GCP)	0,4kg
aditivo para modificador de viscosidade (Levasil CB45-A, AKZONOBEL)	3,8kg
pigmento (3,0%) (Bayferrox® 318 PF, LanXess)	11,4 kg

Figura 7 – Detalhe do espalhamento (68 cm) e aspecto concreto: ausência de exsudação ou de material segregado, inclusive na borda/perímetro, apesar do elevado teor de sílica ativa. Traço com uso de aditivo superplastificante GLENIUM SCC 160, da BASF.

As resistências à compressão obtidas em laboratório também foram bem superiores ao especificado de 60 MPa e a do próprio traço de referência ajustado (sem sílica coloidal), muito provavelmente em função de sua relação água/cimento especificada, do método de empacotamento empregado no estudo de dosagem (com uso de brita 1) e qualidade dos insumos, nas primeiras idades (1 dia). Nota-se (tabela 4) que a diferença com 1 dia foi superior em 56% e 106% (em função do uso do uso do tipo de aditivo superplastificante) com o uso de sílica coloidal em relação ao traço de referência ajustado (sem uso de sílica coloidal), que não se refletiu com 7 e 28 dias, o que condiz com a teoria discutida no item 2 deste artigo.

Tabela 4 – Parâmetros técnicos das variações do traço ajustado (estado fresco e endurecido).

Identificação do traço e tipo de aditivo superplastificante empregado	Presença de sílica coloidal	*Slump-flow* aferido (cm)	Resultados [MPa		
			1 dia	7 dias	28 dias
T80 (referência, superplastificante ADVA 422, GCP	não	70	14,5	56,7	79,6
T82 (superplastificante GLENIUM SCC 160, BASF)	sim	68	29,9	62,7	75,1
T83 (superplastificante ADVA 422, GCP)	sim	61	22,7	56,1	76,0

4 Considerações Finais

1. De fato, houve exsudação de parte do pigmento, constatada no concreto no estado fresco em diversas oportunidades, o que motivou o uso de aditivos modificadores de viscosidade e de estabilizadores, tipo sílica coloidal e espessantes, por exemplo, a fim de suprir o mesmo desempenho de produtos estabilizadores que ainda não estão disponíveis no Brasil. Neste contexto, o uso de sílica coloidal, demonstrou um desempenho superior;
2. Comprovou-se também, pelos protótipos realizados em laboratório, que as manchas nos elementos de concreto muito provavelmente estão correlacionadas ao modo de lançamento e exsudação natural do concreto quando lançado nas fôrmas. Tal fato também fora comprovado pela extração de testemunhos onde já se sabia que as armaduras não eram coincidentes com as manchas. Em laboratório, manchas muito similares com as dos protótipos construídos em canteiro de obras foram reproduzidas em virtude do modo de lançamento do concreto;
3. Quanto às propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, considera-se que com os ajustes propostos no traço (redução da relação água/aglomerantes para 0,4 e aumento no teor de sílica para 15% em relação à massa de cimento), o problema de exsudação esteja sanado e que as manchas muito provavelmente serão discretizadas, o que não isenta ainda mais protótipos de pequeno, médio e grande porte para confirmação dessa expectativa;
4. Notou-se claramente um valor bem superior das resistências mecânicas à compressão nas primeiras idades (1 dia), quando do uso de sílica coloidal incorporada ao traço de concreto. Dependendo do uso de aditivo superplastificante empregado no traço, o acréscimo de resistência foi de 56% a 106%. Esse acréscimo também se justifica pela sinergia entre a sílica coloidal e o elevado teor de sílica ativa. Esse cenário (aumento de resistência à compressão inicial) é também muito favorável para obras envolvendo paredes de concreto e elementos de concreto pré-fabricados.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Votorantim Cimentos / Engemix S.A. pela oportunidade de estudos em laboratório, em nome da gerente de tecnologia Engª. Luana Scheifer, do coordenador de tecnologia Eng. André Tavares Simoni, do analista de laboratório Sr.

Jackson Freitas Nunes, do assistente técnico Sr. Marcos Francisco da Silva Leite e, em especial, o gerente geral Eng. Ricardo Soares de Andrade, pelo apoio, seriedade e colaboração.

6 Referências

AKZONOBEL**. Ficha Técnica do aditivo (sílica coloidal Levasil CB45-A)**. Sweden: Akzonobel, 2018.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 332.1R-06**: *Guide to Residential Concrete Construction*. Michigan: ACI, 2006. 48 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15823**: Concreto autoadensável. Rio de Janeiro, 2017.

BERGNA, H. E. **The Colloid Chemistry of Silica**. Advances in Chemistry, 1994. ISBN13: 9780841221031. ACS Publications. Volume 234. Chapter 1. pp 1-47.

BRITEZ, Carlos et al. **Boas práticas envolvendo sistemas construtivos em paredes de concreto – Caso Jardim Novo Horizonte (Jundiaí-SP)**. In: 57º Congresso Brasileiro do Concreto, 2015, Bonito. Anais do 57º Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo: Ibracon, 2015. 15p.

BRITEZ, Carlos et al. **Recommendations for Casting Inclined Columns**. Michigan: Concrete Internacional, March 2016, V. 38, N. 3, p. 43-48.

GÓMEZ, Jaime Fernández; MAESTRO, Manuel Burón. **Guía práctica para la utilización del hormigón autocompactante**. Madrid: Instituto Español del Cemento y Sus Aplicaciones (IECA), 2005. 47 p.

ILER, K. R. **The Chemistry of Silica**. Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties, and Biochemistry. Von R. K. Iler. John Wiley and Sons, Chichester 1979. XXIV, 886 S.

JEWED, I; SKALNY, J.; YOUNG, J. F. **Hydration of Portland cement**. In: P. Barnes Ed., Structure Performance Cement, 1983, 237-318.

LI, H; XIAO, H-g; YUAN, J; OU, J. **Microstructure of cement mortar with nanoparticles**. Composites Part B: Engineering. 2004; 35(2): 185-189.

MAGLIANO, M. V. M.; PANDOLFELI, V. C. **Características da sílica coloidal e seus efeitos em concretos refratários**. Revista Cerâmica, 2010, V. 56, N. 338, p. 141-147.

MAGLIANO, M. V. M.; PANDOLFELI, V. C. **Mulitização em refratários utilizando diferentes fontes precursoras - revisão**. Revista Cerâmica, 2010, V. 56, N. 338, p. 368-375.

MAGLIANO, M. V. M.; PANDOLFELI, V. C. **Sistemas ligantes para concretos refratários mulitizáveis**. Revista Cerâmica, 2010, V. 56, N. 338, p. 112-117.

MALHOTRA V. M.; CARETTE, G. G. **Silica Fume – A Pozzolan of New Interest for Use in Some Concrete**. Concrete Construction, 1982, V. 27(5). pp. 443-446.

SALINAS, R. A. Silvio. **Einstein e a teoria do movimento browniano**. Revista Brasileira de Ensino de Física, 2005, V. 27, N. 2, p. 263-269.

SOBOVEV, K; FLORES, I; TORRES-MARTINEZ L. M.; VALDEZ, P. L.; ZARAZUA, E.; CUELLAR, E. L. **Engineering of SiO_2 nanoparticles for optimal performance in nano cement based materials**. Nanotechnology in construction 3: proceedings of the NICOM3 (3rd internacional symposium on nanotechnology in construction). Prage. Czech Republic, 2009. p. 139-148.

THE CONCRETE COUNTERTOP INSTITUTE (Raleigh) (Ed.). **Avoiding Ghosting.** Disponível em: <http://www.concretecountertopinstitute.com/avoiding-ghosting/>. Acesso em: 28 maio 2018.

THOMAS, J. J.; JENNINGS, H. M. **A colloidal interpretation of chemical aging of the C-S-H gel and its effects on the properties of cement paste**. Cement and Concrete Research, 2006, V. 36, Issue 1, p. 30-38.