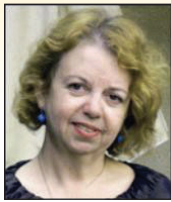


Rheological behavior study of plastic shrinkage and cracking of self-compacting concrete mortars

Avaliação do comportamento reológico na retração plástica e na fissuração de argamassas de concreto auto-adensável



L. S. GIOTTO ^a
giotto3@hotmail.com

M. P. BARBOSA ^b
mbarbosa@dec.feis.unesp.br

G. F. MACIEL ^b
maciel@dec.feis.unesp.br

Abstract

This paper investigated the influence of the amount of superplasticizer and mineral adding - silica fume and basaltic filler - in plastic shrinkage and cracking of self-compacting concrete (SCC) mortars. Initially analysis was performed of the rheological behavior of cement paste and mortars phases of the compositions of SCC. Then the deformations of mortars were measured by the effect of shrinkage and evaluation of cracking. On plastic shrinkage and cracking, the composition with silica fume showed superior results, independent of wind and superplasticizer content, relative to the composition with addition of basalt filler. However, the composition with silica fume showed superior results only in the tests with imposed ventilation at vertical plastic deformation. The rheological behavior affected directly the plastic shrinkage and cracking at early ages, fact confirmed by the analysis of capillary pressures of mortars tested.

Keywords: SCC, mortar rheology, plastic shrinkage, cracking.

Resumo

Este artigo investigou a influência do teor de aditivo superplastificante e da adição mineral - sílica ativa e filler basáltico - na retração plástica e na fissuração de argamassas do concreto auto-adensável (CAA). Numa primeira fase foi realizada a análise do comportamento reológico das fases pasta e argamassa das composições de CAA. Em seguida, foram mensuradas as deformações das argamassas pelo efeito da retração plástica e avaliada sua fissuração. Tanto na retração plástica quanto na fissuração, a composição com adição de sílica ativa apresentou resultados superiores, independente da ação do vento e teor de superplastificante. No entanto, no assentamento plástico, a composição com sílica ativa apresentou resultados superiores somente nos ensaios com ventilação imposta. O comportamento reológico afetou diretamente a retração plástica e fissuração nas primeiras idades, fato confirmado pela análise das pressões capilares das argamassas ensaiadas.

Palavras-chave: CAA, argamassa, reologia, retração plástica, retração.

^a Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, Brasil.

^b Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, Brasil.

1. Introdução

1.1 Justificativa

O estudo de fatores que interferem na retração do concreto auto-adensável, tais como a quantidade de materiais finos, a baixa relação água/finos (a/f), a dosagem do aditivo superplastificante e a relação água/cimento (a/c) é importante na prevenção de patologias e na preservação da vida útil de estruturas de concreto armado.

A retração quer seja plástica, por secagem ou autógena, é uma das causas da fissuração de estruturas de concreto, comprometendo sua vida útil, a resistência de projeto e aumentando a interferência de agentes agressivos.

Nas primeiras idades, o concreto apresenta baixíssima resistência à tração, e as fissuras podem facilmente surgir. Por ocorrer no concreto ainda no estado plástico, esta retração é denominada retração plástica, ocorrendo antes do início de pega do cimento.

São poucas as informações a respeito do estudo da retração plástica e sua conseqüente fissuração no concreto auto-adensável. As principais dificuldades estão pontuadas na existência de ensaios apropriados tanto para a obtenção de medidas de retração quanto da fissuração, devido à baixa escala em que ocorrem. Alguns estudos realizados nessa linha, como o de Turcry [1] e o de Vita [2], pesquisaram a retração plástica e autógena do CAA.

Este estudo investigou a retração plástica e a fissuração em argamassas de CAA's, com o objetivo de verificar a influência de adições minerais (finos) de reatividade distintas e do teor de superplastificante nas composições, fatores esses relacionados aos materiais que compõem o CAA e que podem intervir diretamente sobre a fissuração e retração plástica, ou seja, que ocorre no seu estado fresco, antes do fim da pega do material.

O estudo desenvolvido teve duas vertentes: a primeira foi dedicada ao estudo reológico da fase pasta e da fase argamassa, procurando verificar junto à reologia quais são os parâmetros reológicos que intervêm na determinação do teor ótimo das dosagens de adição mineral e de superplastificante na pasta e na argamassa do CAA; a segunda foi o estudo da retração e da fissuração da argamassa propriamente dita, na fase plástica, em duas condições climáticas distintas: com e sem ação do vento.

1.2 Concreto auto-adensável

Entende-se por Concreto Auto-Adensável (CAA) o concreto capaz de preencher os espaços vazios das fôrmas com fluxo sem segregação e adensar-se apenas pelo efeito da gravidade sem qualquer vibração ou compactação.

Tanto a viscosidade como a coesão trabalham juntas com a finalidade de impedir a ocorrência de segregação da mistura. A facilidade com que o concreto flui entre as armaduras é proporcionada pela fluidez.

A auto-compactabilidade do CAA no estado fresco pode ser caracterizada essencialmente pelos seguintes requisitos funcionais: capacidade de preenchimento, resistência à ocorrência de segregação e a capacidade de passar entre espaços estreitos [3].

A tecnologia aplicada na dosagem e na aplicação do CAA é muito difundida devido à constante pesquisa sobre o material. Em 2010, a norma brasileira sobre o CAA, a NBR 15823:2010 [4], estabeleceu critérios em função de sua aplicação.

Entre os métodos de dosagem existentes, destaca-se o método Repette-Melo [5], utilizado neste trabalho.

1.3 Reologia das pastas e argamassas

Reologia é a ciência que estuda materiais ditos complexos e que não podem ser classificados somente como gás, líquido ou sólido, tendo por finalidade prever a força necessária para causar uma dada deformação ou escoamento em um corpo [6].

A monitoração de tensões de cisalhamento e/ou taxas de cisalhamento, aplicadas ao material, agrega à caracterização destes uma óptica reológica importante, principalmente se tratando de pastas e argamassas.

As argamassas são suspensões concentradas predominantemente compostas por agregados miúdos misturados com finos reativos e água em teor suficiente para que as mesmas sejam aplicadas no estado fluido. Em certos casos, finos inertes, aditivos químicos e fibras são ainda incorporados às composições [7].

O conceito de trabalhabilidade é empregado para adequar a dosagem em argamassas. Entretanto, uma vez que esses materiais podem exibir comportamentos reológicos diversos, fica evidente que o desenvolvimento de uma metodologia na formulação de argamassas baseada em conceitos microestruturais/reológicos requer que a definição de trabalhabilidade seja convertida em grandezas reológicas mensuráveis [7]. Desta forma, a caracterização e as faixas de trabalho dos materiais seriam melhor definidas remetendo à maior confiabilidade dos resultados obtidos reduzindo o erro sob o operador.

As técnicas de caracterização reológica têm como princípio básico submeter os fluidos a esforços ou deformações controlados [8].

Os métodos reológicos podem ser classificados como ensaios monoponto, que caracterizam os fluidos em uma única condição de solitação e ensaios multiponto, que submetem os sistemas a diferentes solitações [9].

No cenário atual para ensaios multiponto, destacam-se a reometria rotacional e "Squeezeflow" como técnicas de multiponto mais indicadas na caracterização reológica de argamassas [9].

Neste trabalho será abordado a reometria rotacional por ser esta adotada para análise e caracterização reológica das argamassas estudadas. A reometria rotacional baseia-se na análise da viscosidade e tensão de escoamento em função de outras variáveis tais como temperatura, tempo, etc.

As argamassas no estado fluido são descritas como suspensões bifásicas heterogêneas com grande extensão granulométrica (partículas na faixa de 0,1 a 2000 μm), cujo comportamento reológico é bastante complexo devido à presença de forças com naturezas distintas no sistema [7].

A natureza bifásica da argamassa segundo Agarwala [10] e Oliveira [11] é resultante da presença de partículas em ambos os domínios de forças intermoleculares. Sendo assim, as propriedades de fluidez da argamassa são regidas pela interação do conjunto de grãos grossos imersos na matriz fluida.

Seguindo essa ótica, as características reológicas do material podem influenciar o comportamento deste desde sua fase fresca até o endurecimento. E a análise reológica da fase argamassa de CAA's podem justificar os parâmetros que influenciam na retração e na fissuração.

1.4 Retração plástica e fissuração

Retração é a redução de volume, no caso do concreto, causada por perda de água. Não existe, na verdade, um único tipo de re-

tração e este é o maior complicador. A retração pode acontecer desde os primeiros minutos de mistura do material ou ao longo da vida da estrutura [12].

A complexidade do tema se deve em função dos tipos de retração existentes, suas respectivas causas e consequências, estruturas mais suscetíveis a sofrerem os danos da retração, além dos meios de minimizá-la.

De maneira geral as características que combinadas levam o concreto a retrair são: geometria da estrutura, dosagem do material e condições climáticas.

Pode-se dizer que o concreto retrai em dois momentos distintos: primeiramente no estado plástico e depois no estado endurecido. Quando o concreto ainda se encontra na fase plástica, a secagem rápida no estado fresco provoca retração quando a taxa de perda de água da superfície, por evaporação, excede a taxa disponível de água de exsudação [13]. Por ocorrer ainda no estado plástico, esta retração é denominada retração plástica, ocorrendo antes do início de pega do cimento.

O mecanismo de origem para ocorrer a retração plástica abrange aspectos que envolvem a evaporação e a consequente perda de massa, capilaridade, temperatura interna e consolidação do material, sendo assim observadas deformações verticais e longitudinais sobre as amostras.

A consolidação e a evaporação influenciam no ângulo de atrito entre as partículas sólidas do material cimentício, assim como, outros parâmetros como o tamanho dos grãos e a hidratação do cimento, alterando a cinética de retração do material.

A temperatura interna do material e a perda de massa durante a retração também influenciam na cinética deste fenômeno. No primeiro caso a descontinuidade de temperatura em relação à temperatura externa e temperatura dos agregados pode ocasionar um diferencial de temperatura que interfere na cinética da retração.

Outro fator importante na análise da deformação longitudinal da retração é o efeito dos aditivos químicos e minerais. Segundo Neville [14], os aditivos retardadores de pega podem resultar em maiores retrações do concreto no estado plástico.

Assim como a retração pode ser devido à remoção da água livre de hidratação ou pode ser causada por uma secagem rápida da superfície devido à proteção inadequada, o que pode gerar pressões significativas sobre os poros capilares, essas tensões entre as moléculas do material podem ser acentuadas pela inclusão de materiais com diâmetros muito pequenos como a sílica ativa [15]. Segundo Holt e Leivo [16] a utilização de sílica é um dos principais motivos da fissuração por retração. Sua utilização é muitas vezes atrelada ao ganho de resistência pela diminuição da relação água/cimento, provocando uma escassez de água nas reações químicas do cimento, que, por conseguinte, gera altas pressões capilares.

A fissuração nas primeiras idades é consequência do processo de retração sobre o material. Neville [14] afirma que nas primeiras idades o concreto o material é frágil a pequenas perturbações, tanto externa quanto referentes às reações físico-químico de seus componentes, que poderá causar fissuração precoce ao material. O autor argumenta que maiores taxas de cimento na mistura e uma maior relação água/cimento ajudam no aparecimento da retração plástica. Além disso, diz que quando a temperatura do concreto encontra-se em um patamar elevado em relação à temperatura ambiente, a taxa de evaporação aumenta, podendo ocorrer a retração plástica mesmo que a umidade relativa do ar seja elevada.

Soroushian [17] afirma que a fissuração por retração plástica aumenta a rede de vazios permeáveis, expondo maiores áreas superficiais dos concretos aos agentes ambientais. Sabe-se que o fenômeno da fissuração por retração plástica é drasticamente influenciado pela exposição da superfície do concreto às intempéries como o vento, a baixa umidade relativa do ar e o aumento da temperatura ambiente.

A Norma DNIT 061/2004 -TER [18] diz que “fissuras de retração plástica são fissuras pouco profundas (superficiais) de pequena abertura (inferior a 0,5 mm) e de comprimento limitado. Sua incidência costuma ser aleatória e elas se desenvolvem formando ângulo de 45° a 60° com o eixo longitudinal da placa.”

A fissuração por retração plástica é uma patologia estudada e analisada com maior atenção quando se trata de argamassas do CAA. Por sua composição vincular aditivos superplastificantes, retardadores de pega, entre outros, e por possuir os teores de finos incorporados maiores do que em concretos convencionais, exatamente para atender as características de auto-adensabilidade, o CAA apresenta fatores que remete a uma maior retração plástica e fissuração.

2. Programa experimental

2.1 Estudo de dosagem

O estudo de dosagem foi baseado no método Repette-Melo [5] para produção de dois traços de argamassa de concreto auto-adensável, sendo um com adição de filer basáltico e outro com adição de sílica ativa. Este método permite uma produção de pastas e argamassas com dosagem racional de seus constituintes. Sendo assim, a partir do procedimento experimental descrito nessa metodologia, as seguintes etapas foram executadas: seleção e caracterização dos materiais, determinação da relação (a/c), estudos reológicos da pasta de cimento e da argamassa.

Para a determinação da relação água/cimento, o ponto de partida da metodologia Repette-Melo [5] é através da associação à resistência à compressão axial aos 28 dias de uma composição de concreto convencional, obtida através do “Diagrama de Dosagem”, proposto por Helene [19] para concretos de cimento Portland.

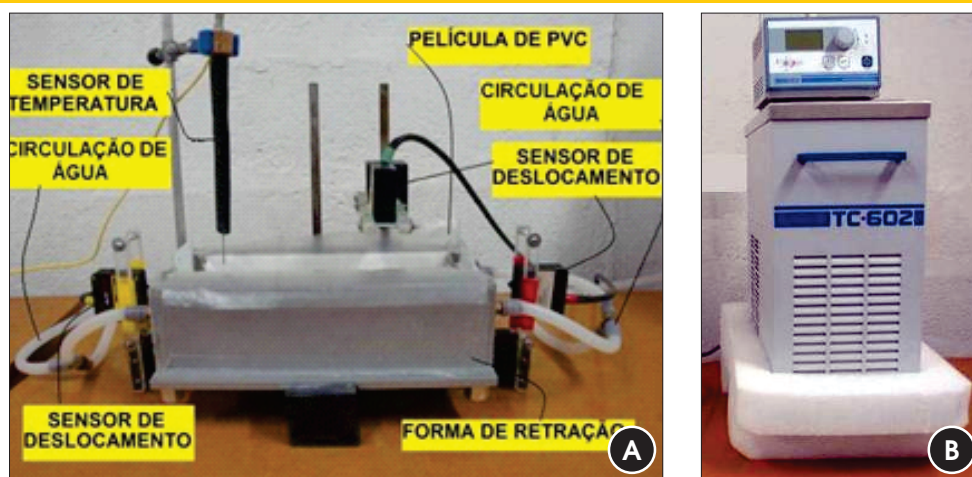
A resistência inicial almejada foi de 40 MPa, retirada do gráfico de dosagem aos 28 dias, para uma composição elaborada com cimento CP II E-32 e uma relação a/c de 0,44.

2.2 Reologia em pastas

As proporções ótimas de sílica ativa e filer basáltico incorporadas nas misturas foram encontradas através de ensaios de fluidez com o Funil Marsh e da análise reométrica utilizando o reômetro R/S de geometria de cilindros coaxiais, controlando tensão e garantindo, dessa maneira, a não interferência desta proporção nas propriedades de fluidez e coesão da pasta. A temperatura e a umidade relativa do ar foram mantidas rigorosamente constantes a 24± 1°C e 40± 10%, respectivamente.

As adições de sílica ativa e filer foram realizadas com acréscimo em porcentagem sobre a massa de cimento, sendo que a porcentagem de adição a cada passo foi de 2%. Entretanto após o passo de 10%, o acréscimo utilizado para os pontos de adição de filer foi de 5%, devido à alta fluidez nos primeiros pontos desta adição.

Figura 1 – Dispositivo de mensuração das deformações pelo efeito da retração plástica. (a) Forma de retração plástica, (b) Banho térmico para controle da temperatura da água



Este procedimento foi repetido até que não existisse mais fluxo no ensaio com funil Marsh.

Foi utilizado um misturador de pastas e argamassa com três velocidades, com uma hélice tipo raquete, elevador de bacia, deslocamento e transmissão de engrenagem.

Após 5, 15 e 30 minutos do instante de incorporação do aditivo na mistura, realizaram-se ensaios reológicos convencionais e no reômetro com o objetivo de se verificar a ocorrência de perda de fluidez, possível alteração no ponto de saturação e ajuste das curvas fornecidas pelo software Rheo2000 a um modelo reológico mais apropriado.

2.3 Reologia em argamassas

Uma vez definida a composição da pasta, a segunda etapa da metodologia Repette-Melo é a definição da fase da argamassa. Assim sendo, foi definido, nesta fase, o teor de agregado miúdo em relação ao volume total de argamassa e o teor de aditivo superplastificante.

Foram elaboradas as misturas das argamassas e realizados os ensaios de espalhamento com mini-cone de abatimento, fluidez com o Funil em V e ensaios no reômetro para o estudo reométrico, utilizando, nesta etapa, a hélice Vane para cada uma das composições, o que permitiu obter os parâmetros reológicos e posterior ajuste das curvas a um modelo reológico.

Variou-se o teor de agregado miúdo em 40, 42,5 e 45% em relação ao volume total de argamassa no intuito de determinar a quantidade ótima em composições com deformabilidade adequada.

O teor de superplastificante e o teor de finos foram ajustados para que as misturas se enquadrassem nos critérios de plasticidade adotados - Mini-cone de Abatimento (faixa de trabalho entre 200 mm e 280 mm) e tempo de escoamento em Funil "V" (faixa de trabalho entre 5 s e 10 s) [20].

O ambiente de ensaio teve o mesmo controle e condições de ensaio do procedimento na fase pasta de cimento. Ademais, utilizou-se a mesma batadeira para a mistura da argamassa.

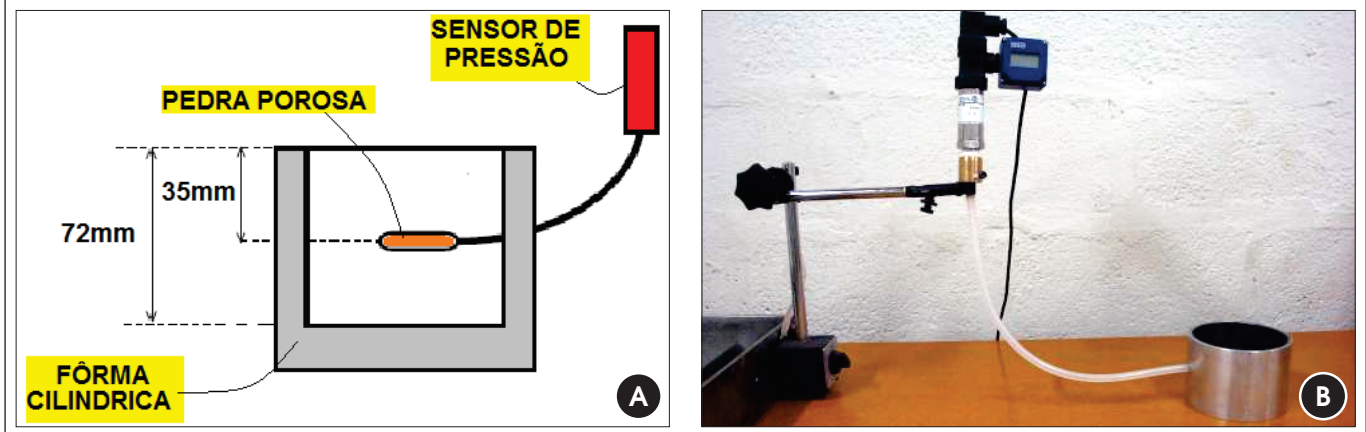
Com o intuito de caracterizar o fenômeno da retração plástica e

da fissuração com base nos parâmetros reológicos, foi proposto o estudo dos teores abaixo e acima dos teores ótimos obtidos.

Figura 2 – Dispositivo de mensuração da perda de massa por evaporação



Figura 3 – Dispositivo de mensuração da pressão capilar
(a) detalhamento, (b) equipamento de ensaio de pressão capilar



2.4 Retração plástica

O dispositivo de mensuração das deformações verticais e horizontais, pelo efeito da retração plástica, foi baseado no equipamento utilizado por Turcry [1].

O molde utilizado para o ensaio de retração plástica, Figura 1a, consiste em uma caixa retangular de aço com dimensões internas de 7x7x28 cm, perfuradas em suas extremidades. Internamente o molde recebe um invólucro de PVC com espessura de 0,3 cm e uma cobertura plástica de polietileno de 21 x 28 cm.

Em suas extremidades possuem finas placas de PVC de 6,8 cm de largura, 7 cm de altura e 0,3 cm de espessura. Três sensores laser - range de 2 mm, resolução de 0,5 μm e frequência de resposta que varia de 10 kHz até 15 kHz fazem a medição do deslocamento transversal e do deslocamento vertical; o molde metálico permite entre suas paredes a circulação de água controlada com

auxílio do banho térmico TC-602 com controle digital da temperatura da água (Figura 1b), de forma que a mesma permaneça em uma temperatura de $24^\circ \pm 1^\circ \text{C}$.

A retração plástica total é dada pela somatória do deslocamento vertical (assentamento plástico) e dos deslocamentos horizontais. O deslocamento horizontal é mensurado assim que lançada a argamassa no molde. As placas laterais aderidas às laterais do molde se deslocam na medida em que ocorre a retração, tal deformação é captada pelos sensores laser laterais.

Para o deslocamento vertical é posicionado uma placa fina quadrada de teflon de 1x1 cm na superfície da argamassa. A precisão relativa de deformações medidas é de $\pm 0,01 \mu\text{m}$.

Durante a medição da retração plástica é também acompanhada a evolução da perda de massa por evaporação. O ensaio foi realizado com o preenchimento de uma forma cilíndrica de 10 cm de diâmetro por 7 cm de altura (Figura 2). A perda de massa foi

Figura 4 – Placa de fissuração de argamassa - (a) vista superior; (b) vista lateral



Figura 5 - Equipamentos de captura de imagens para a edição em time-lapse



acompanhada com a leitura do peso da amostra sobre uma balança digital com precisão de 0,01 g.

A temperatura da amostra de concreto é controlada a partir de um sensor de temperatura imerso no corpo-de-prova.

O dispositivo mostrado esquematicamente na Figura 3 foi utilizado para medir a pressão capilar das argamassas estudadas.

A cerâmica porosa (Figura 3(a)) ligada ao sensor de pressão por meio de tubo cilíndrico de silicone foi colocada a 35 mm da superfície de uma amostra que possui as mesmas dimensões que o ensaio de perda de massa. A conexão entre o sensor de pressão e seu tubo de ligação e a cerâmica foram preenchidos com água. Os ensaios começaram com cerca de 20 minutos após a adição de água no processo de mistura, sendo que os dados (retração plástica, assentamento plástico, temperatura interna e pressão capilar) foram registrados por meio de um módulo de aquisição de dados universal em intervalos de 20 segundos, e a perda de massa em intervalos de 2 segundos.

O ensaio é realizado durante o tempo de pega das amostras para mensuração da retração plástica. Para a determinação do tempo de pega das argamassas de CAA's foi utilizado o aparelho PROCTOR, respeitando a norma brasileira NBR NM 9/2002 [21] sobre o método de resistência à penetração.

Os ensaios foram realizados em sala climatizada com controle constante de temperatura e umidade relativa do ar a $24 \pm 10^\circ\text{C}$ e $40 \pm 10\%$, respectivamente, em duas situações distintas, a saber: com e sem ação do vento sobre o dispositivo de retração (velocidade aproximada do vento de 5,0 m/s). O tempo de ensaio para a avaliação da retração plástica foi determinado em função do tempo de pega do material.

2.5 Fissuração

O equipamento utilizado para avaliação da fissuração das argamassas de CAA consiste numa placa metálica quadrada de 20 cm de lado com 1 cm de espessura (Figuras 4a, 4b). O fundo da placa é dentado simetricamente tendo cada dente 0,5 cm de altura. Os dentes propiciaram o estímulo para a fissuração da argamassa ensaiada.

A preparação do ensaio seguiu as seguintes etapas: 1) Obtenção da argamassa do CAA; 2) Lançamento da argamassa na placa de fissuração; 3) Nivelamento da superfície; 4) Enquadramento da superfície exposta e conseguinte arquivamento fotográfico de cada zona e áreas mais afetadas, após o tempo de pega do material.

Tabela 1 - Valores de caracterização do filer basáltico

Dimensão média	Dimensão abaixo da qual se encontram 10% das partículas	Dimensão abaixo da qual se encontram 90% das partículas	Material passante na peneira 200	Massa específica
45 μm	14,4 μm	82 μm	61,03 %	2,86 g/cm ³

Tabela 2 - Caracterização físico-químico da sílica-ativa

Massa específica	Superfície específica	Formato da partícula	Diâmetro médio	Teor de SiO ₂	Umidade	Equivalente alcalino em Na ₂ O
2,22 g/cm ³	2,0x10 ⁴ cm ² /g	Esférica	0,2 μm	mín. 85%	máx. 3%	máx. 0,5%

Tabela 3 – Caracterização físico-química do cimento CP II E-32

Análise química (%)	Perda ao fogo	Insolúveis	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Equiv. alcalino Na ₂ O
	4,33	1,63	20,75	2,29	0,26	0,26
	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Cal livre em CaO
8,05	57,45	1,89	2,44	0,26	1,69	

Propriedades físicas e mecânicas	Finura Peneira 200 (% retida)	Finura Peneira 325 (% retida)	Superf. Específica Blaine	Densidade Aparente	Densidade Absoluta	Início de pega (h:min:s)
	4,93	16,8	4031 cm ² /g	1,09 g/cm ³	3,05 g/cm ³	02:43:00
	Fim de pega (h:min)	Expansão autoclave	Tensão (MPa) 3 dias	Tensão (MPa) 7 dias	Tensão (MPa) 28 dias	a/c
04:06:00	0,032 %	19,4	24,4	32,1	0,48	

A aferição da área total das fissuras foi realizada através do programa computacional Image Tool.

Além da aferição das características das fissuras foi realizada a filmagem do tempo total de ensaio de fissuração compreendido entre o tempo do lançamento da argamassa na fôrma de fissuração até o tempo final de pega da mesma.

A filmagem foi editada através do processo denominado "time-lapse". Trata-se de um processo cinematográfico em que cada frame de filme é tomado a uma velocidade muito mais lenta do que aquela em que o filme será reproduzido.

A preparação da filmagem do ensaio de fissuração em argamas-

sas inicia-se com a fixação da máquina fotográfica (Nikon D90) através de tripé com nivelamento bolha em duas direções (Figuras 5a, 5b). Em seguida, é feito o ajuste do dispositivo (Wireless Shutter Boss Timer Remote - Nikon DC-2 Connection) conectado à máquina fotográfica, o qual dispara o frame em cada tempo adotado. Faz-se o enquadramento da fôrma de fissuração e ajuste de foco manualmente e, a seguir, a edição do filme da fissuração das argamassas através do programa Windows Move Maker.

Como não existe normalização que estabeleça o limite para fissuras de retração, corrosão, reação álcali-agregado, ou qualquer outra decorrente de fenômenos químicos e físicos relacionados à durabilidade e vida útil, admitiu-se dois tipos de fissuras: Tipo 1 – fissuras até 0,25 mm de espessura e Tipo 2 – fissuras maiores que 0,25 mm de espessura.

Tabela 4 – Dados técnicos do aditivo

Avaliações	Especificações	Data
Aparência (visual)	Líquido âmbar	-
pH (20°C)	4,40 – 4,90	4,42
Densidade (g/cm ³)	1,07 – 1,09	1,08

3. Composição do CAA

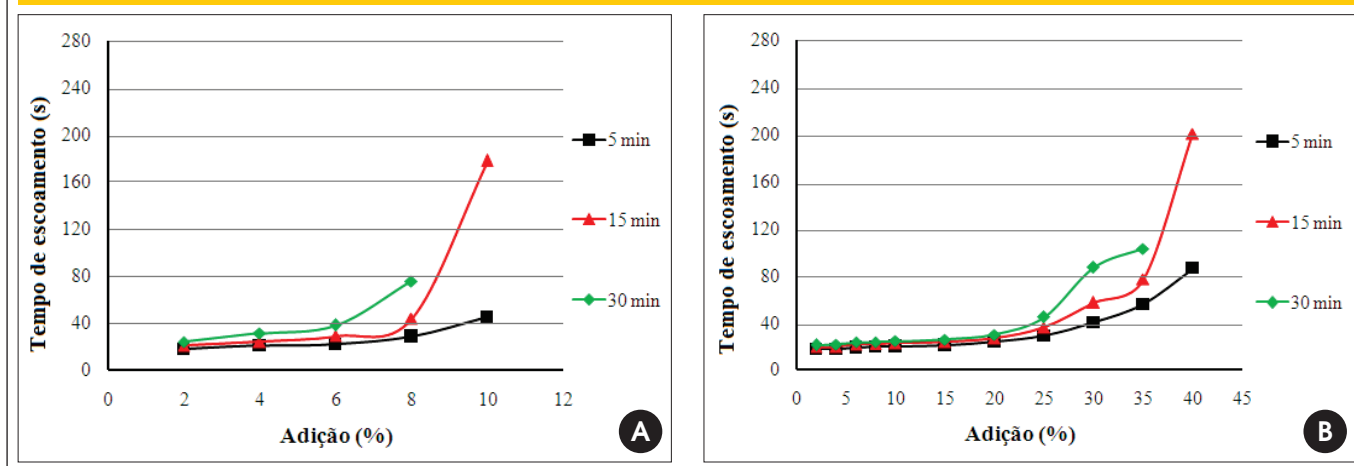
3.1 Materiais constituintes

O agregado miúdo utilizado é uma areia média proveniente de leito de rio e o agregado graúdo é uma brita basáltica de 16 mm, ambos provenientes da região noroeste paulista. A areia teve sua massa específica mensurada em 2,61 g/cm³, com dimensão máxima característica igual a 4,75 mm e módulo de finura 2,15 mm,

Tabela 5 – Composição das argamassas dos CAA's

Designação das argamassas	Relação a/c	Cimento (kg/m ³)	Sílica (kg/m ³)	Filer (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Teor de aditivo (l)	Fc 28 dias (MPa)
SA03	0,44	718,02	43,08	-	1109,16	2,15	48,2
SA05	0,44	716,27	42,98	-	1109,32	3,58	47,8
FB03	0,44	723,46	-	43,41	1109,26	2,17	44,6
FB05	0,44	721,79	-	43,31	1109,21	3,61	43,4

Figura 6 - Curvas de Tempo de escoamento (s) vs Adição para tempos distintos de ensaio. (a) pasta com adição de sílica ativa, (b) pasta com adição de filer. Ensaio com Funil Marsh



conforme a ABNT NM 49/2001 [22] e NBR 7211/2009 [23], respectivamente. A brita basáltica apresentou a massa específica de 2,86 g/cm³, determinada segundo a ABNT NM 53/2009 [24], com dimensão máxima característica igual a 19 mm e módulo de finura 6,74 mm, conforme a NBR 7211/2009 [23].

Dois tipos de adições minerais foram utilizadas na fabricação dos CAA's, a saber: uma adição inerte do tipo filer basáltico e adição de sílica ativa decorrente do processo de fabricação do sílico metálico ou do ferro sílico, com microestrutura esférica e lisa e com propriedades pozolânicas. As Tabelas 1 e 2 apresentam as características físico-químicas do filer e da sílica, respectivamente.

O cimento utilizado foi o CP II E-32. A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização do cimento. O aditivo utilizado foi o superplastificante de terceira geração à base de éter policarboxílico cujos dados técnicos são apresentados na Tabela 4.

3.2 Composições

Conforme já citado, as composições dos CAA's avaliadas foram desenvolvidas com base na metodologia Repette-Melo [5], sendo a primeira elaborada com adição de filer basáltico e a segunda com adição de sílica ativa. Ambas composições foram desenvolvidas com dosagens equivalentes, variando-se somente o teor de adição mineral para posterior comparação das análises de retração e fissuração. A Tabela 5 resume as proporções das misturas e as resistências à compressão para as mesmas.

4. Resultados e discussões

4.1 Estudo da pasta de cimento

As Figuras 6a e 6b mostram os resultados do ensaio Funil Marsh da curva de escoamento em função do tempo vs porcentagem de

Figura 7 - Curvas de Viscosidade aparente vs Adição para tempos distintos de ensaio. (a) pasta com adição de sílica ativa, (b) pasta com adição de filer. Ensaio com reômetro R/S

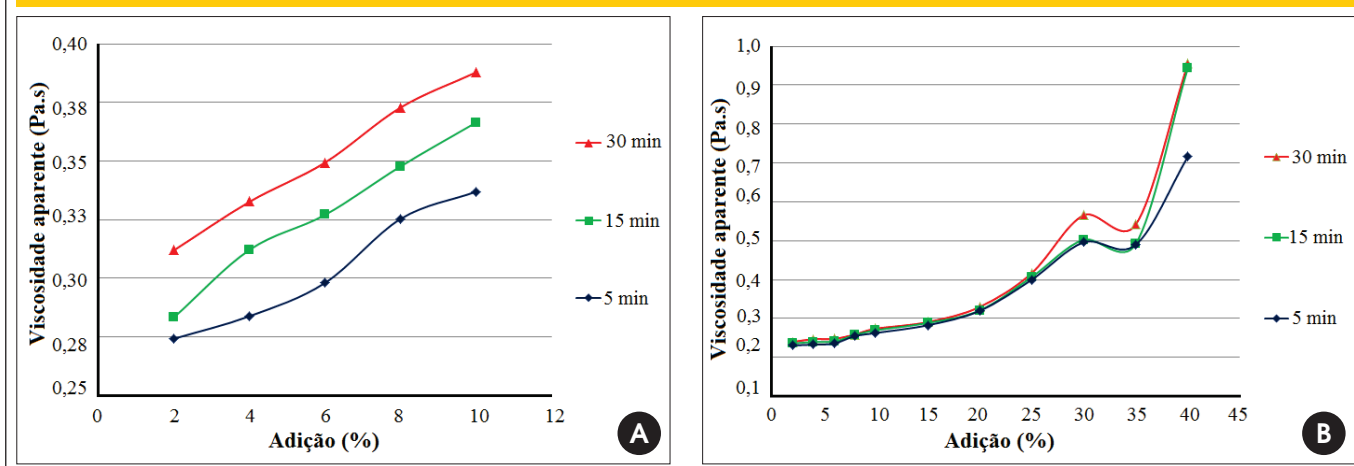


Figure 8 – Shear Stress (Pa) vs. Addition curves for testing over time. (a) silica fume paste, (b) filler paste. R/S Rheometer Test

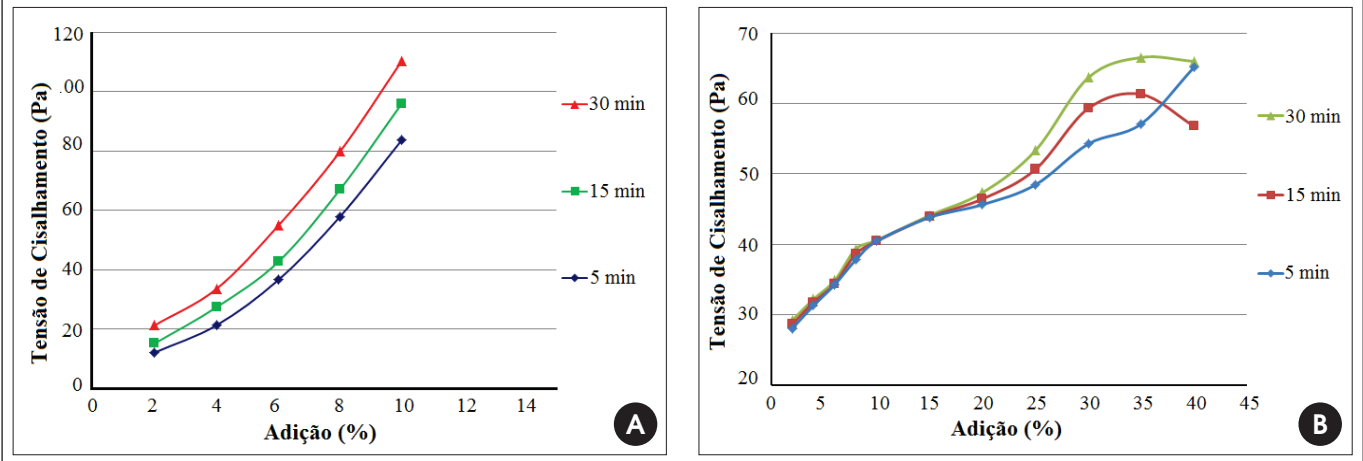


Figura 9 – Curvas de espalhamento vs superplastificante para distintos teores de areia. (a) argamassa com adição de sílica ativa, (b) argamassa com adição de filler

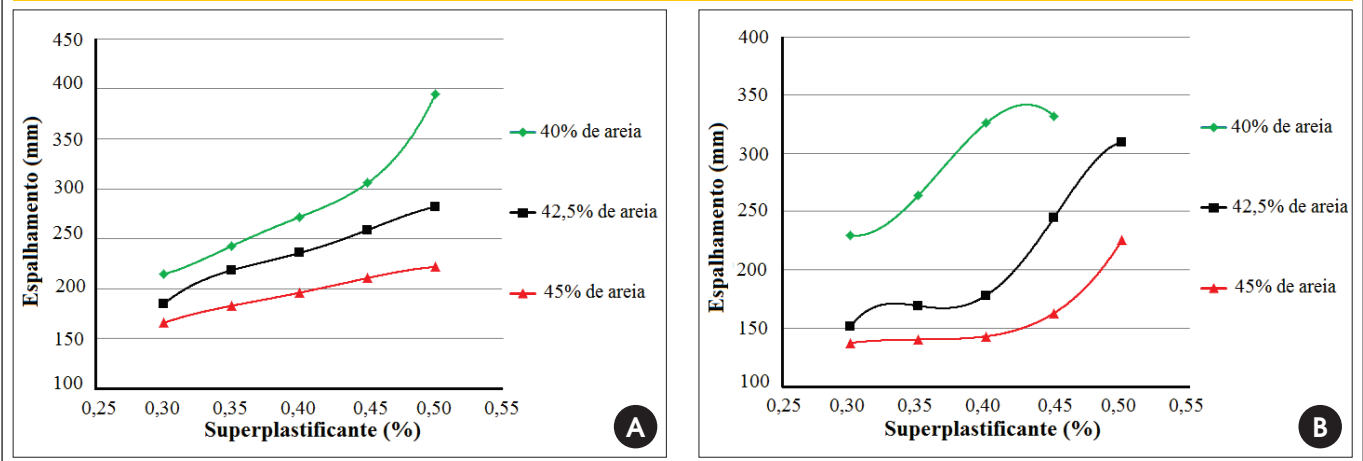


Figura 10 – Curvas de tempo de escoamento vs % superplastificante para distintos teores de areia. (a) argamassa com adição de sílica ativa, (b) argamassa com adição de filler

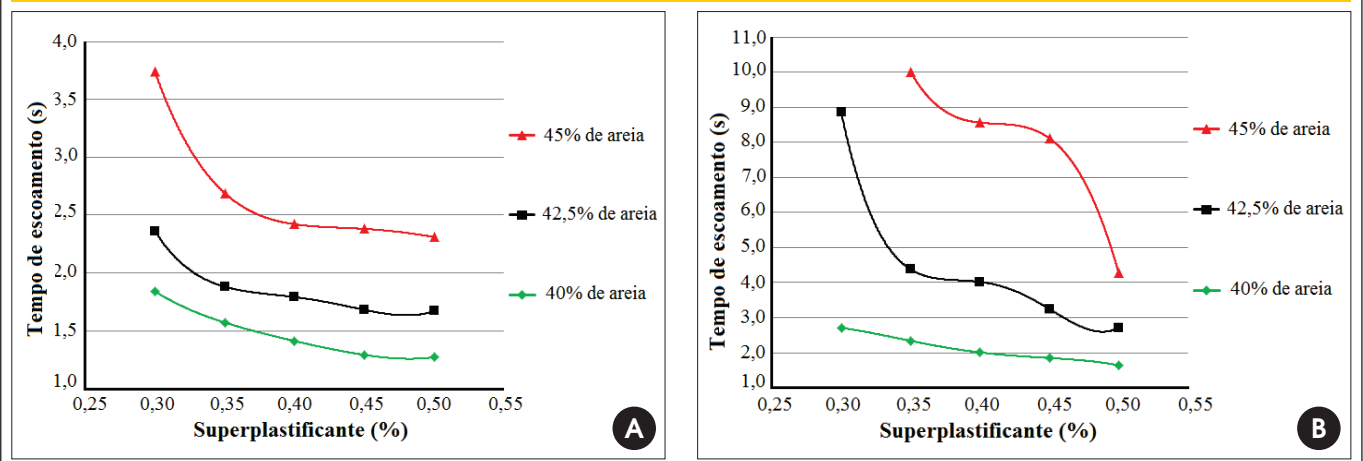


Figura 11 - Curvas de tensão de cisalhamento vs superplastificante para distintos teores de areia. (a) argamassa com adição de sílica ativa, (b) argamassa com adição de filer

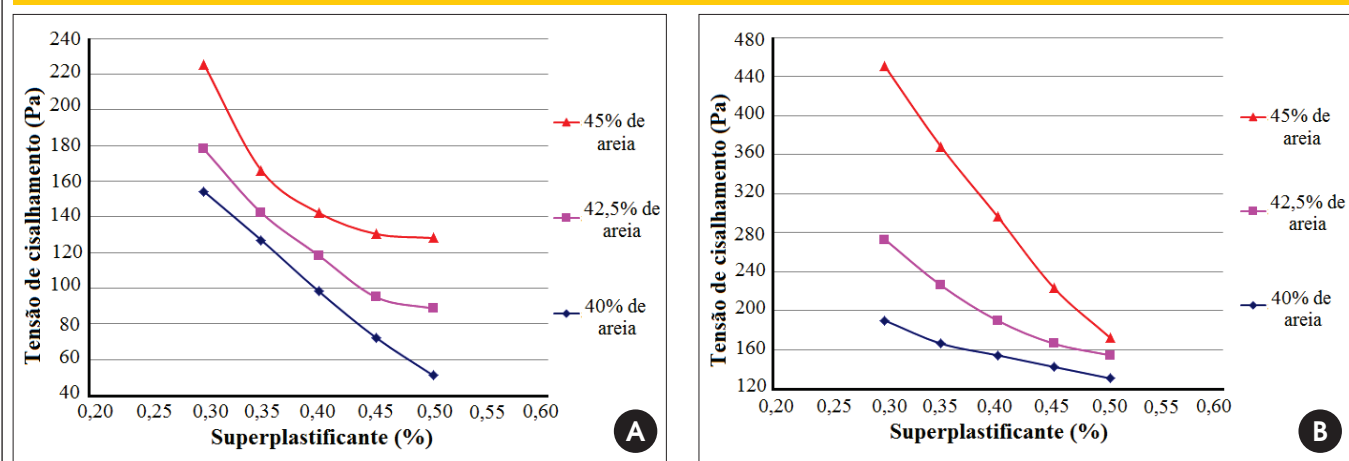
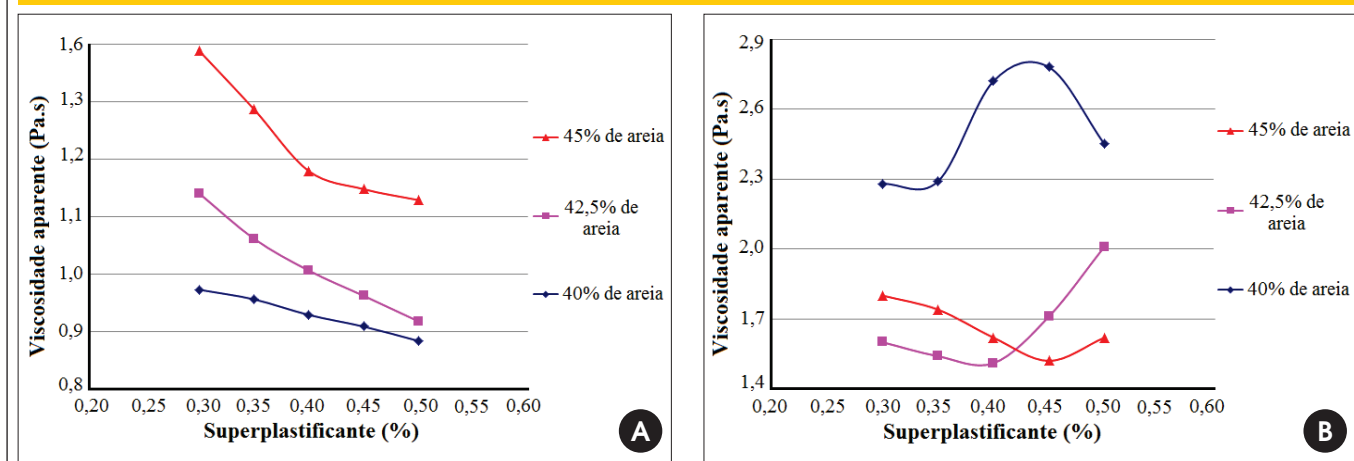


Figura 12 - Curvas de viscosidade aparente vs superplastificante para distintos teores de areia. (a) argamassa com adição de sílica ativa, (b) argamassa com adição de filer



adição para a sílica ativa e para o filer, respectivamente. Nota-se nessas figuras a mudança de inclinação para cada curva determinada em função dos três períodos de tempo de 5, 15 e 30 minutos, caracterizando a perda de fluidez.

Com base na aplicação e taxa de trabalho do material, o comportamento das curvas reológicas foram ajustadas para uma faixa de taxa de deformação variando de 50 a 150s⁻¹. Após análise, a escolha do modelo reológico de Bingham foi o que melhor aderiu aos resultados das pastas de cimento. Assim, a caracterização se restringe a este intervalo de taxa de cisalhamento que pode variar

de acordo com o tipo de aplicação do material.

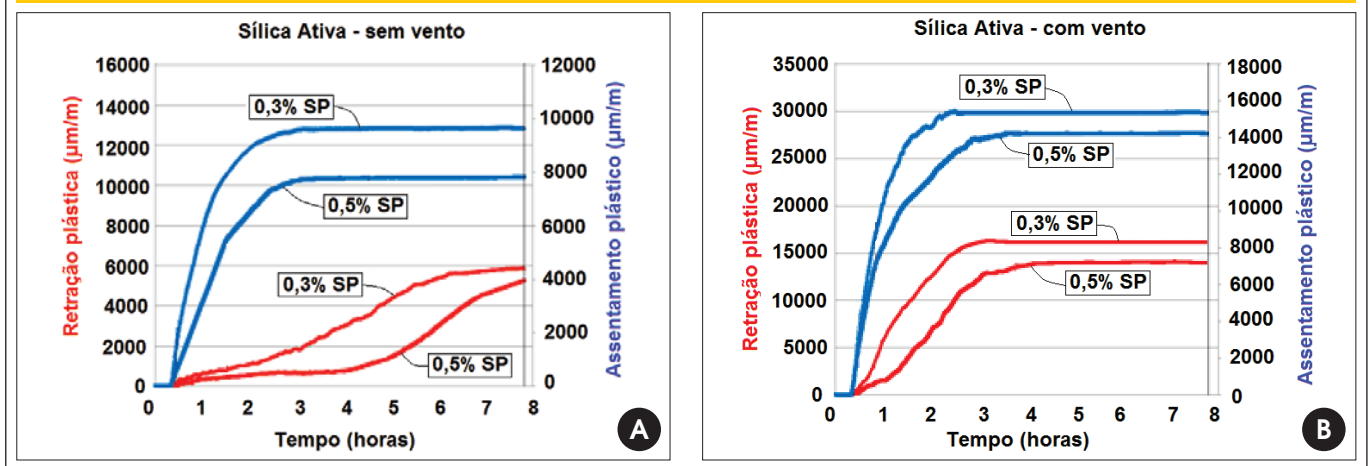
As Figuras 7 e 8 apresentam as curvas de viscosidade aparente em função dos teores de adição de minerais das pastas de cimento, obtidas com o reômetro R/S. Os ensaios mostram que com o aumento da porcentagem de adição mineral, ocorre o aumento da viscosidade aparente e da tensão de cisalhamento para os dois tipos de adições minerais.

Sob o ponto de vista do comportamento reológico para os tempos característicos de 5, 15 e 30 minutos, as composições com filer, Figuras 7b e 8b, a partir de 20% de adição, divergem, enquanto

Tabela 6 - Análise do tempo de início e fim de pega das composições das argamassas de CAA

Adição mineral	Tempo de início de pega (h:min)	Tempo de fim de pega (h:min)
Filer basáltico	05:50	07:15
Sílica ativa	06:30	07:50

Figura 13 - Retração plástica e assentamento plástico das argamassas com adição de sílica ativa para diferentes teores de superplastificante (SP). a) ensaio sem vento e b) ensaio com vento



que na composição com adição de sílica ativa (Figuras 7a, 8a) essa divergência acontece desde o início da incorporação do ativo na mistura.

A análise em conjunto dos ensaios em Funil Marsh (Figura 6) e realizados no reômetro (Figuras 7 e 8) possibilitou a escolha dos pontos de teores ótimos, que foram, respectivamente, de 6% e 15% para sílica ativa e filer basáltico.

4.2 Estudo da argamassa

O ponto de teor de areia escolhido, conforme elucidado no item 2.3, foi de 42,5% para ambas as adições minerais, assim como o teor de 0,4% de superplastificante. A incorporação do agregado miúdo interferiu diretamente no comportamento reológico para ambas as adições minerais. No caso da composição com filer, esta influência é maior devido ao comportamento não reativo quimicamente da adi-

ção, sendo seu comportamento reológico regido pela sua característica física molecular e interação com as partículas de areia.

Os ensaios de espalhamento com mini-cone de abatimento (Figura 9) e fluidez com o Funil em V (Figura 10) para caracterização das argamassas não foram suficientes para análise das composições, sendo imprescindível a utilização da reometria, principalmente para a composição com adição de filer basáltico.

A análise da argamassa foi análoga à da pasta, no que se diz a respeito à adoção do mesmo modelo reológico e da mesma faixa de trabalho para as curvas reológicas. Constatou-se a queda da tensão de escoamento e viscosidade dos fluidos com o aumento do teor de superplastificante independentemente da adição mineral utilizada na dosagem (Figuras 11 e 12).

Assim, os resultados da fase argamassa qualificam-na para ser utilizada como argamassa para produção de CAA, garantindo-lhe as propriedades de fluidez desejadas.

Figura 14 - Retração plástica e assentamento plástico das argamassas com adição de filer para diferentes teores de superplastificante (SP) - a) ensaio sem vento e b) ensaio com vento

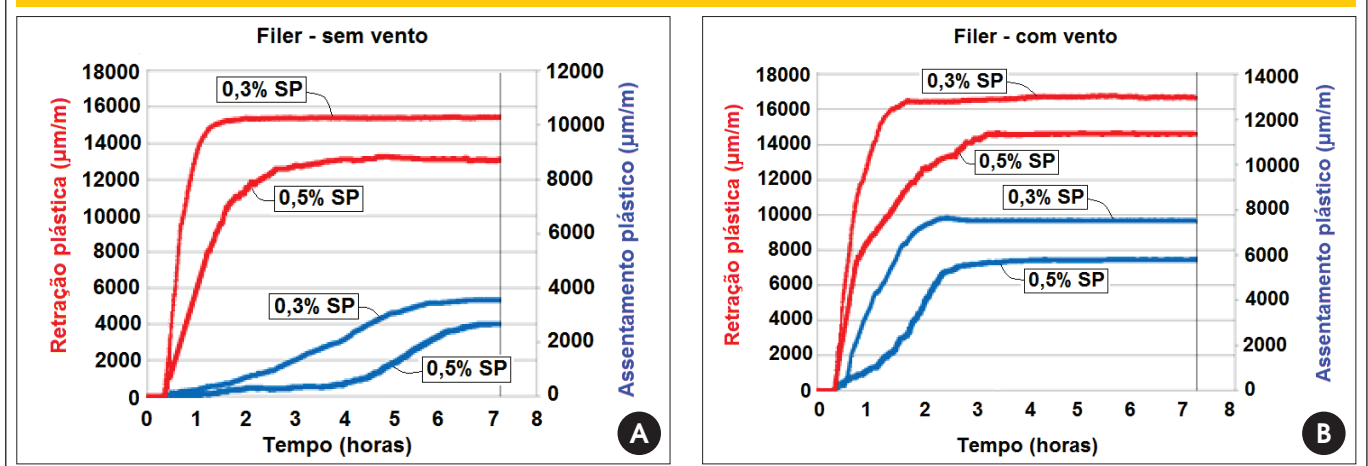
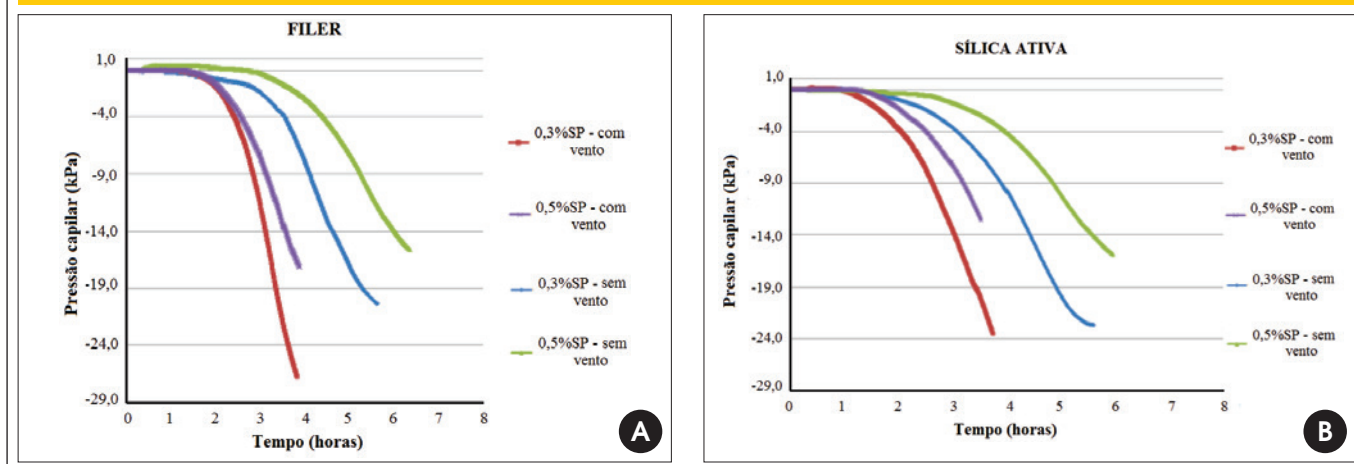


Figura 15 – Comparação entre as composições com filer basáltico e sílica ativa para diferentes teores de superplastificante e ventilação imposta nos ensaios de pressão capilar – (a) filer basáltico e (b) sílica ativa



4.3 Estudo da retração plástica

A Tabela 6 apresenta os resultados dos tempos de pega para cada composição de argamassa de CAA's.

As argamassas foram elaboradas com dois teores distintos de superplastificantes, 0,3% e 0,5%, com o intuito de analisar sua influência na retração das misturas.

A variação de teor de aditivo, 0,3% e 0,5%, pouco alterou os tempos de início e fim de pega das misturas, levando a se adotar um tempo fixo para o estudo da retração plástica e da fissuração.

Os ensaios com e sem ação do vento apresentam amplitude e cinética das curvas de deformação diferentes para o assentamento e retração plástica. A estabilização da deformação sem ação do vento acontece mais tardiamente que a estabilização das deformações nos ensaios com vento. Em relação ao teor de aditivo superplastificante, a estabilização da deformação acontece mais tardiamente conforme se aumenta o teor de 0,3% para 0,5%.

Verificou-se uma diminuição da retração plástica com o aumento do teor de superplastificante e conseqüente queda da tensão de cisalhamento em ambas as composições, sendo que, as maiores tensões de cisalhamento foram obtidas na composição com adição

de filer basáltico, a qual propiciou os menores valores de retração plástica em comparação com a composição com sílica ativa.

As argamassas com adição de sílica ativa (Figura 13) conferem amplitudes de retração plástica maiores em relação à composição com adição de filer basáltico (Figura 14) independente da influência da ação do vento ou do teor de superplastificante. Entretanto, para o assentamento plástico, a ação do vento conferiu uma maior amplitude dos resultados obtidos para a composição com adição de sílica ativa.

A diminuição da retração plástica com o aumento do teor de superplastificante pode ser analisada observando os resultados de pressão capilar das composições (Figura 15). Estes mostraram uma diminuição da pressão capilar com o aumento do teor de superplastificante independente da adição mineral utilizada. E também, uma maior pressão capilar para a composição com sílica ativa.

Nas Figuras 13 e 14, para o assentamento plástico, observa-se o mesmo comportamento anteriormente obtido para retração plástica, ou seja, com o aumento do teor de superplastificante houve uma diminuição do assentamento plástico. As maiores tensões de cisalhamento foram obtidas da composição com adição de filer basáltico, sendo esta a que propiciou os maiores valores de assenta-

Tabela 7 – Área total (mm²) e área total de fissura/área da argamassa (%) com os teores de superplastificante e ação do vento das composições com filer basáltico e sílica ativa

Adição mineral	Ação do vento	Teor de superplastificante (%)	Área fissurada (mm ²)	Área total de fissura/área da argamassa (%)
Filer basáltico	sem vento	0,3	78,7	0,2
		0,5	43,4	0,11
	com vento	0,3	220,4	0,55
		0,5	100,2	0,25
Sílica ativa	sem vento	0,3	209,3	0,52
		0,5	127,5	0,32
	com vento	0,3	334,9	0,84
		0,5	178,5	0,45

Tabela 8 – Área total (mm²) e área total de fissura/área da argamassa (%) com os teores de superplastificante e ação do vento das composições com filer basáltico e sílica ativa divididos por tipos de fissuração

Adição mineral	Ação do vento	Superplastificante (%)	Relação de fissuração	Tipo de fissuração	
				1	2
Filer basáltico	sem vento	0,30	AF* (mm ²)	78,7	-
			RAF** (%)	0,19	-
	com vento	0,50	AF (mm ²)	43,4	-
			RAF (%)	0,11	-
		0,30	AF (mm ²)	178,5	41,87
			RAF (%)	0,45	0,1
Sílica ativa	sem vento	0,50	AF (mm ²)	93,19	7,01
			RAF (%)	0,23	0,02
	com vento	0,30	AF (mm ²)	190,46	18,84
			RAF (%)	0,48	0,05
		0,50	AF (mm ²)	123,68	3,83
			RAF (%)	0,31	0,01
com vento	0,30	AF (mm ²)	241,12	93,77	
		RAF (%)	0,61	0,23	
	0,50	AF (mm ²)	162,44	16,07	
		RAF (%)	0,41	0,04	

*AF: Área fissurada | **RAF: relação entre Área fissurada/Área da argamassa

mento plástico em comparação com a composição com adição de sílica ativa nos ensaios sem ventilação.

A ventilação imposta foi forte condicionante na análise do assentamento plástico. Enquanto os valores se mostraram maiores para a composição com filer nos ensaios sem vento (Figuras 13a, 14a), ocorre o oposto nos ensaios com vento, ou seja, os maiores valores são notados para composição com sílica ativa (Figuras 13b, 14b).

4.4 Estudo da fissuração

Da análise sobre a fissuração nas primeiras idades observa-se que a área fissurada é maior para a composição com adição de sílica ativa em ambos os ensaios, com e sem ação do vento, independentemente do teor de superplastificante (Tabela 7).

Para a composição com adição de filer nota-se ausência de fissuras do Tipo 2 nos ensaios sem vento (Tabela 8). Além disso, há uma mudança do quadro de fissuração com o aumento de teor de superplastificante. A influência da ação do vento sobre a fissura-

ção, independente do teor do aditivo superplastificante da argamassa pode ser comprovada na Tabela 8. Além do aumento da área fissurada, a ação do vento proporciona o aumento da espessura das mesmas, tendo sido mais intensiva para a composição com adição de filer basáltico.

Nota-se nos ensaios sem vento que o aumento do teor de superplastificante sobre as composições revelaram uma diminuição mais efetiva da fissuração para a composição com filer, quando analisamos a relação de fissuração total sobre a área da argamassa ensaiada.

A fissuração foi menor com o aumento do teor de superplastificante. Este fenômeno teve maior efeito para a composição com adição de filer basáltico independentemente do tipo de ação do vento.

A Tabela 9 relaciona para cada argamassa ensaiada, sua área fissurada, taxa de pressão capilar e a tensão de escoamento obtida. Nota-se que a fissuração é maior para a composição com adição de sílica ativa, que também apresenta maior taxa de pressão capilar e menores valores de tensão de escoamento.

Tabela 9 – Fissuração, taxa de pressão capilar e tensão de escoamento para argamassas com adição mineral de filer basáltico e sílica ativa

Adição mineral	Teor de superplastificante (%)	Área fissurada (mm ²)	Taxa de pressão capilar (kpa/h)	Tensão de escoamento (pa)
Filer basáltico	0,3	78,7	3,6	275
	0,5	43,4	2,5	155
Sílica ativa	0,3	209,3	4	178,7
	0,5	127,5	2,6	89

A análise isolada para cada adição mineral permite concluir que com a diminuição da tensão de escoamento ocorre a diminuição da fissuração nas composições.

5. Conclusões

As argamassas com adição de sílica ativa conferiram amplitudes de retração plástica maiores em relação à composição com adição de filer basáltico independentemente da influência da ação do vento ou teor de superplastificante.

Para os resultados de assentamento plástico, a ação do vento conferiu uma maior amplitude dos resultados obtidos para a composição com adição de sílica ativa.

Os ensaios com e sem ação do vento apresentaram amplitude e cinética das curvas de deformação diferentes para o assentamento e retração plástica. A estabilização da deformação sem ação do vento aconteceu mais tardiamente que a estabilização das deformações nos ensaios com vento.

Analisando o aumento do teor de superplastificante, a estabilização da deformação acontece mais tardiamente que a estabilização das deformações nos ensaios com menor teor de adição de superplastificante.

O aumento do teor de superplastificante proporcionou queda da tensão de cisalhamento e viscosidade aparente das amostras, induzindo a diminuição da pressão capilar. Este comportamento pode justificar a queda das amplitudes sobre a retração plástica e assentamento plástico.

Da análise sobre a fissuração nas primeiras idades, pode-se concluir que a área fissurada é maior para a composição com adição de sílica ativa tanto em ensaios com vento e sem vento, independentemente do teor de superplastificante. A imposição da ação do vento aumentou a fissuração das amostras e foi mais efetiva para a composição com adição de filer basáltico.

O aumento do teor de superplastificante produziu uma menor fissuração e foi mais efetivo para a composição com adição de filer basáltico independentemente da ação do vento. Para a fissuração nas primeiras idades o fato dos resultados da composição com adição de sílica ativa serem maiores do que a composição com adição de filer basáltico, podem ser justificados pela análise da pressão capilar, que foi maior para adição de sílica, e pelo fato das tensões de escoamento da composição com adição de sílica ativa serem menores.

Nota-se claramente uma diferença dos resultados em torno do teor ótimo para composições de argamassas de CAA's. Tanto para as argamassas com sílica ativa quanto para as de filer basáltico as diferenças são significativas.

Por fim, os resultados mostraram a sensibilidade destes materiais, quer seja pelo seu comportamento reológico, quer seja pela avaliação da retração plástica e sua consequente fissuração, mesmo em se tratando de um estudo realizado sobre um domínio e condições específicas e controladas. Em suma, os resultados observados indicam uma necessidade maior da utilização da reologia dos materiais enquanto ferramenta para auxiliar no controle de qualidade dos materiais evitando o surgimento de futuras patologias.

O estudo reológico das pastas e das argamassas podem auxiliar, e em muito, a compreensão da retração plástica e da fissuração dos concretos auto-adensáveis.

6. Agradecimentos

Agradecemos ao Laboratório de Engenharia Civil da UNESP cam-

pus de Ilha Solteira e à Companhia Energética do Estado de São Paulo – CESP pela disponibilidade e auxílio. A empresa Holcim do Brasil, que forneceu o cimento utilizado na fabricação dos concretos. A GRACE do Brasil, pelo fornecimento do superplastificante utilizado na pesquisa. A FAPESP pela ajuda financeira do projeto de pesquisa.

7. Bibliografia

- [01] TURCRY, P. Retrait et fissuration des bétons autoplaçants: influence de la formation. 2004. 223f. Tese (doutorado em engenharia civil) - Ecole Centrale de Nantes, Nantes, França, 2004.
- [02] VITA, M. O. Estudo da retração plástica e da fissuração do concreto auto-adensável nas primeiras idades: avaliação da influência dos tipos de adições minerais. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.
- [03] OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. *Journal of advanced concrete technology*, 2003. v.1. Number 1. p. 5-15.
- [04] ABNT. Concreto auto-adensável. NBR15823. Rio de Janeiro, 2010.
- [05] MELO, K. A. Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filer calcário. 2005. 180 f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [06] REIS, J. F. A. Determinação de parâmetros reológicos de concretos através do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado: estudo de caso. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.
- [07] PILEGGI, Rafael G.; CINCOTTO, Maria A.; JOHN, Vanderley M., Conceitos reológicos aplicados no desenvolvimento de argamassas. *Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil* Vol. 3, n. 2, p. 62-76, Novembro 2006.
- [08] STEIN, H.N.. Rheological behavior of suspensions. In: CHEREMISINOFF, N.P. (Ed.) *Encyclopedia of fluid mechanics: slurry flow technology*. Houston: Gulf Publishing, 1986.
- [09] BANFILL, P. F. G. The rheology of fresh mortar – a review. *ANais*, Florianópolis, VI SBTA, 2005. p. 73-82.
- [10] AGARWALA, M. K.; PATTERSON, B. R.; CLARCK, P. E. Rheological behavior of powder injection molding model slurries. *Journal of Rheology*, v. 36, n. 2, p. 319-334, 1992.
- [11] OLIVEIRA, I. R. et al. Dispersão e empacotamento de partículas: princípios básicos e aplicações em processamento cerâmico. São Paulo, 2000. 224 p.
- [12] AÏTCIN, P. C. Concreto de alto desempenho. São Paulo: Pini, 2000. 667p.
- [13] PELISSER, F.; NETO, A. B. S. S.; ROVERE, H. L.; PINTO, R. C. A. Effect of the addition of synthetic fibers to concrete thin slabs on plastic shrinkage cracking. *Construction and building materials*, 2010. v. 24. p. 2171-2176.
- [14] NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. São Paulo: Pini, 1997. 828p.
- [15] JENSEN, O. M; HANSEN P.F. Autogenous deformation and change of the relative humidity in silica fume modified cement paste. *ACI Materials Journal*, 1996, v. 93. p. 539-543.

- [16] HOLT, E.; LEIVO, M. E. Cracking risks associated with early age shrinkage. *Cement & Concrete Composites*, Kidlington, v. 26, p. 521-530, 2004.
- [17] SOROUSHAN, P. MIRZA, F. ALHOZAIMY, A. M. (a) Plastic Shrinkage Cracking of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*, V.92, No.5, 1995, p. 553-560.
- [18] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT 061/2004 – TER – Pavimento rígido – Defeitos - Terminologia. Rio de Janeiro: DNIT, 2004.]
- [19] HELENE, P. Dosagem dos concretos de Cimento Portland. In: ISAlA, G. C. (Ed.). *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 2, p. 439-471.
- [20] GOMES, P. C. C. Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete. 2002. 223 f. Tese (Doutorado em engenharia civil) - Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2002.
- [21] ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN - AMN. NM 9: concreto e argamassa - determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração. Rio de Janeiro: ABNT, 2002. 6 p.
- [22] ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN - AMN. NM 49: agregado miúdo - determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 3 p.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 9p.
- [24] ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN - AMN. NM 53: agregado graúdo - determinação de massa específica e massa aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 8 p.