



# XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Avanços no desempenho das construções – pesquisa, inovação e capacitação profissional

12, 13 E 14 DE NOVEMBRO DE 2014 | MACEIÓ | AL

## AVALIAÇÃO DA REOLOGIA E DA TRABALHABILIDADE DAS ARGAMASSAS VOLTADAS AOS CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS

MENDES, Marcus (1); BAUER, Elton (2)

(1) UnB, e-mail: mvasmendes.ifg@gmail.com (2) UnB, e-mail: elbauerlem@gmail.com

### RESUMO

Decidiu-se estudar os aspectos reológicos e de trabalhabilidade das prováveis argamassas que podem compor os concretos autoadensáveis. Sabe-se que os efeitos dos finos sobre as propriedades no estado fresco do CAA são mais relevantes do que os efeitos dos agregados graúdos. A par disso, foram avaliadas as argamassas a partir de uma proporção de argamassa referente de um concreto coeso, sendo que esta sofreu variação quanto à relação água/sólidos e o teor de superplastificante gerando nove pontos experimentais ou nove traços de argamassas. Nessas argamassas foram obtidos alguns dos parâmetros de trabalhabilidade por meio de ensaios de mini-funil e mini-slump, um parâmetro reológico que foi a tensão de escoamento (*Vane test*) e o parâmetro WFT (*water film thickness*) conhecido como controlador dos parâmetros de trabalhabilidade e de reologia. O parâmetro WFT significa a espessura da película de água envolta dos grãos de um sistema granular, quando o seu valor é positivo indica que há água suficiente para governar as propriedades de trabalhabilidade e de reologia, por outro lado, o valor é negativo indica que falta água para propiciar bons resultados sobre as propriedades de trabalhabilidade e de reologia do material cimentício em questão. Com isso, obteve-se resultados importantes no momento parcial de um estudo de doutorado. Os resultados mostram relações importantes do parâmetro WFT com os resultados de espalhamento (mini-slump) e de tensão de escoamento, sendo assim pode-se dizer que estudos em argamassas podem referenciar os prováveis concretos autoadensáveis, evitando-se assim gastos demasiados de materiais com dosagens equivocadas.

**Palavras-chave:** argamassa, concreto auto-adensável, trabalhabilidade, reologia.

### ABSTRACT

*Decided to study the rheological and workability of mortars probable aspects that can make self-compacting concrete. It is known that the effects of fines on the properties of SCC in the fresh state are more important than the effects of coarse aggregates. Along with this, the mortars were evaluated from a ratio of a cohesive referring mortar concrete, and this underwent variation for the water / solids content of superplasticizer and generating nine or nine data points traces of mortar. In these mortars were some of the parameters obtained by testing workability mini- mini- slump funnel and a rheological parameter is yield stress ( Vane test) and WFT parameter (water film thickness) known as workability controller parameters and rheology. WFT parameter means the thickness of the film of water surrounded the grains of a granular system when its value is positive indicates sufficient to govern the properties of workability and rheology, on the other hand, is negative value indicates that water shortage water to provide good results on the properties of workability and rheology of cementitious material in question. Thus, we obtained important results in the partial moment of a study of doctor thesis. The results show significant relationships with the parameter WFT results scattering (mini- slump) and yield stress, and thus it can be said that mortar studies may refer to the self-compacting concrete probable, thus avoiding spending too materials with erroneous measurements.*

**.Keywords:** mortar, self-compacting concrete, workability, rheology.

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de concreto autoadensável (CAA) é considerada complexa pelo fato deste tipo de concreto possuir uma gama maior de materiais envolvidos, como vários tipos de adições minerais e aditivos químicos. Dessa forma, torna-se mais difícil o alcance dos requisitos que conferem autoadensabilidade ao CAA, tais como, habilidade passante, habilidade de preenchimento e resistência à segregação. Para isso, é necessária a variação dos parâmetros de mistura, como o teor de água, teor de finos, proporção de agregados, adição de superplasticante e outros. As diferentes combinações desses parâmetros podem resultar em diferentes níveis de trabalhabilidade do concreto, por meio de tentativas e erros, a ponto de chegar a um nível de autoadensabilidade desejado (FUNG, 2010).

Entretanto, essa forma empírica de alcançar autoadensabilidade não é a mais adequada. Para interpretar de maneira consistente o comportamento do CAA no estado fresco, implica em analisar as combinações entre os materiais e os parâmetros que o influenciam, que ainda não são claramente conhecidos. Portanto, recomenda-se que invés de realizar um estudo sistemático de cada parâmetro envolvido, seria pertinente investigar as principais características físicas que regem a autoadensabilidade do concreto, a fim de desvendar o significado físico subjacente de cada parâmetro (FUNG, 2010).

Dentre as características físicas, pode-se citar a densidade de empacotamento e a área superficial dos sólidos do sistema de partículas, as quais têm maior relevância no que tange o controle da trabalhabilidade ou adensabilidade de qualquer material cimentício (FUNG, 2010). Essas características físicas podem ser representadas por um único parâmetro conhecido como WFT (*water film thickness*), o qual é uma extensão da teoria da espessura da pasta definida por Powers, o seu valor positivo significa a espessura média de água em volta dos grãos sólidos de um sistema granular de pastas ou argamassas. Quando o valor é negativo, deixa de ser um parâmetro físico e passa a ser um indicador que a quantidade de água não foi suficiente para preencher os vazios entre as partículas sólidas e muito menos para conferir boas propriedades no estado fresco. Recentemente, o WFT tem sido estudado e defendido como um parâmetro capaz de governar as propriedades reológicas e de trabalhabilidade (KWAN *et al.*, 2010; KWAN, WONG, 2007; FUNG, 2010).

Nesse contexto, estudos em argamassas podem referenciar concretos por meio de resultados das propriedades reológicas e de trabalhabilidade, bem como podem propiciar várias análises com maior número de variáveis, assim contribuindo para o entendimento mais consistente das propriedades estudadas com gasto menor de materiais e recurso-humano (JIN, 2002).

Por fim, pretende-se com estudos em argamassas, buscar referências de argamassas que podem alcançar concretos autoadensáveis tomando como orientação os parâmetros de trabalhabilidade, de reologia e o WFT (*water film thickness*).

## 2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

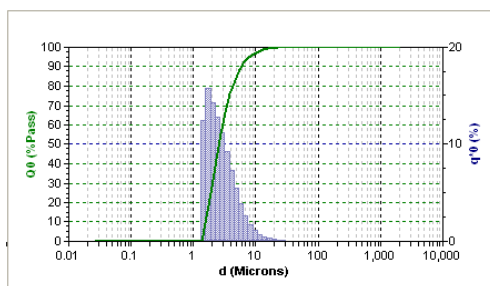
A seguir, são apresentados os materiais e os métodos empregados para avaliação das argamassas e concretos.

### 2.1 Materiais

Foram utilizados os seguintes materiais:

**Cimento CPV-ARI:** cimento de alta resistência inicial. Com massa específica de  $3,04 \text{ g/cm}^3$ , obtida pelo frasco de Le Chatelier. Quanto a sua granulometria, nota-se, na Figura 1, por meio da distribuição granulométrica a laser, que o cimento possui grãos com diâmetros que variam de  $1,5 \mu\text{m}$  a  $20 \mu\text{m}$ , aproximadamente. Há uma maior predominância de grãos com diâmetro em torno de  $1,8 \mu\text{m}$ . Desta forma, mostra-se ser um cimento de finura acentuada, o que justifica propiciar em um ganho relevante de resistência inicial nas primeiras idades.

**Figura 1 – Distribuição Granulométrica do cimento.**



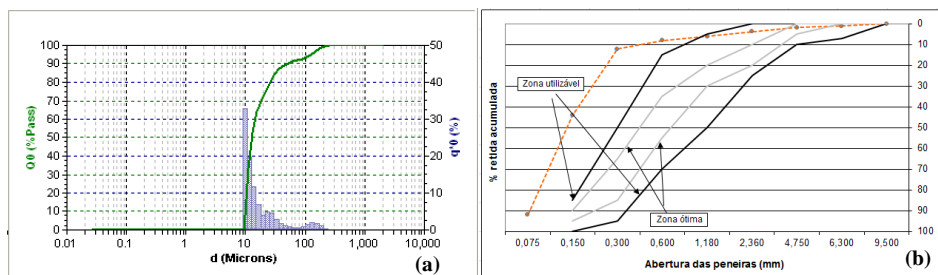
Fonte: Desenvolvida pelos autores

a) Agregados

Adotou-se a norma NBR NM 248:2003 para se determinar a distribuição granulométrica dos agregados. Para determinação da distribuição granulométrica do agregado miúdo foi incluída a peneira de abertura  $0,075 \text{ mm}$ , com intuito de verificar o teor de finos, o qual é um parâmetro importante no alcance da estabilidade do concreto auto-adensável no estado fresco. Os finos, também, foram caracterizados pelo granulômetro a laser. Em seguida, os agregados miúdos foram submetidos ao MEV (microscópico eletrônico de varredura), a fim de verificar a morfologia dos seus grãos.

**Areia rosa:** areia quartzosa, comum na região de Brasília. Possui uma massa específica de  $2,66 \text{ g/cm}^3$ , obtida pelo frasco de Chapman. A sua distribuição granulométrica não se enquadra na zona utilizável, sendo, portanto, uma areia com maior predominância de grãos de diâmetro inferior a  $0,3 \text{ mm}$ , conforme consta na Figura 2(b). Os finos equivalem a  $8\%$  da fração total. O módulo de finura é igual a  $0,76$  e diâmetro máximo de  $2,36 \text{ mm}$ . Por meio da granulometria laser, na Figura 2(a), observa-se que esta areia possui grãos de diâmetro a partir de  $10 \mu\text{m}$ .

**Figura 2 – Distribuição granulométrica da areia rosa (a) Distribuição granulométrica a laser (b) Distribuição granulométrica conforme a NBR NM 248:2003.**

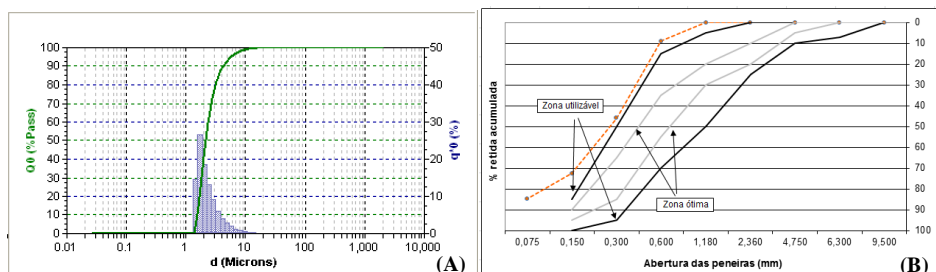


Fonte: Desenvolvida pelos autores

**Areia artificial calcária:** areia calcítica com massa específica igual a  $2,70 \text{ g/cm}^3$ . Quanto a sua distribuição granulométrica, observa-se na Figura 3 (b), que não se enquadra na zona utilizável, mas encontra-se próxima ao limite superior da zona utilizável. O módulo de finura é igual a  $1,27$  e diâmetro máximo de  $1,18 \text{ mm}$ . Os finos

correspondem a 15% da fração total. Por meio da granulometria laser, na Figura 3(a), observa-se que esta areia possui predominância de grãos com diâmetros em torno de 1,5  $\mu\text{m}$ , diferentemente da areia rosa que possui grãos a partir do diâmetro de 10  $\mu\text{m}$ .

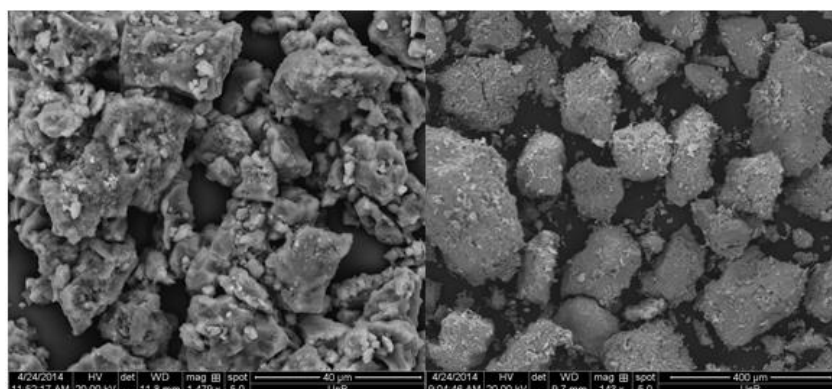
**Figura 3 – Distribuição granulométrica da areia artificial calcária (a) Distribuição granulométrica a laser (b) Distribuição granulométrica conforme a NBR NM 248:2003.**



Fonte: Desenvolvida pelos autores

A morfologia e a textura das areias rosa e calcária foram verificadas por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV) com imagens obtidas por meio de elétrons secundários (SEM). Na Figura 4, são apresentadas as imagens (SEM) das areias rosa e calcária.

**Figura 4 – Imagens que retratam a morfologia das areias obtidas por meio de elétrons secundários (SEM): (a) areia calcária (ampliada x 1479); (b) areia rosa (ampliada x143).**



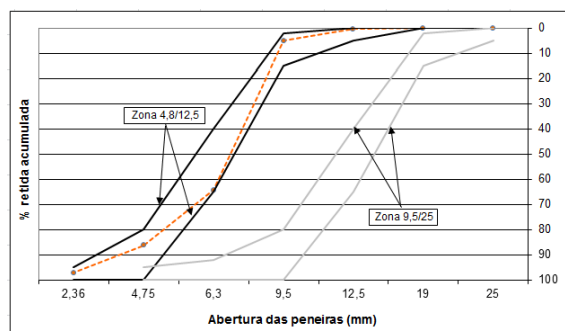
Fonte: Desenvolvida pelos autores

Na Figura 4(a), apresenta a imagem referente aos grãos de areia calcária, na qual retrata o formato angular cúbico e textura rugosa dos grãos. Enquanto que, na Figura 4 (b), retrata o formato arredondado e textura levemente áspera dos grãos de areia rosa.

Partículas angulosas têm maior área superficial e exigem uma maior quantidade de água para a mesma trabalhabilidade em concretos hidráulicos. Com relação à textura superficial do agregado, esta característica é relevante no que tange a aderência do agregado com a pasta (FARIAS, PALMEIRAS, 2007).

**Agregado graúdo:** litologia calcária com massa específica igual a 2,72g/cm<sup>3</sup>. A sua distribuição granulométrica se enquadra na zona 4,8/12,5, conforme apresenta a Figura 5. O módulo de finura é igual a 5,88 e o diâmetro máximo igual a 9,5 mm.

**Figura 5 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo conforme a NBR NM 248:2003.**



Fonte: Desenvolvida pelos autores

- b) Aditivo superplastificante: Utilizou-se um superplastificante a base de policarboxilato de sódio.

## 2.2 Métodos

Neste item, são descritos os estudos em concretos e argamassas efetuados neste trabalho. Inicialmente, foi realizado um estudo preliminar em concretos a fim de buscar um concreto coeso. Em seguida, adotou-se a proporção de argamassa que conferiu um concreto coeso, como ponto de partida para os estudos em argamassas. Dentre as argamassas geradas, buscou-se identificar quais delas poderiam alcançar os concretos autoadensáveis, tomando como orientação os resultados de trabalhabilidade, reologia e espessura de filme de água dos grãos (WFT). Para isso, foram confeccionados mais dois traços de concreto para averbar se as argamassas identificadas realmente podem referenciar um concreto autoadensável.

### 2.1 Estudo preliminar em concretos

Os traços dos concretos foram definidos tomando como base os limites de proporção dos materiais para CAA, recomendado pelo *American Concrete Institute* (ACI). Na Tabela 1, apresenta os limites das proporções dos materiais propostos pelo ACI.

**Tabela 1 – Proporções recomendadas para dosagem de CAA.**

Volume absoluto de agregado graúdo	28% a 32%
Fração de pasta (calculado sobre o volume)	34% a 40%
Fração de argamassa(calculado sobre o volume)	68% a 72%
Consumo de cimento por m <sup>3</sup>	386kg/m <sup>3</sup> a 475kg/m <sup>3</sup>

Fonte: ACI 237R-07 (2007)

Para avaliação do estado fresco do concreto, tomou-se o ensaio de espalhamento e a inspeção visual para avaliar estabilidade. Quanto ao ensaio de espalhamento, adotou-se uma faixa de tolerância de 600 mm a 800 mm. Para avaliação da estabilidade, considerou-se a resistência à segregação e a exsudação do concreto. Nesse sentido, para avaliar a resistência à segregação, observou-se a existência de uma acentuada concentração de agregado graúdo na região central do concreto espalhado e, para avaliar a exsudação, verificou-se a existência de filme d'água ou anel de exsudação em sua periferia, tais características confirmadas definem um concreto não coeso. Na Tabela 2 estão apresentadas as principais características dos concretos produzidos neste primeiro momento, como as proporções dos materiais e os resultados de resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias. De acordo com a Tabela 2, cabe enfatizar algumas características dos concretos:

- observa-se que o teor de substituição de areia artificial em substituição de areia rosa variou de 0% a 25%;
- nota-se que o consumo de cimento foi em torno de 425 kg/m<sup>3</sup>, a relação cimento/agregado foi de 1:4, assim configura-se um concreto de consumo intermediário;
- observa-se que os parâmetros, tais como, teor de argamassa, fração percentual de pasta, fração percentual de argamassa e volume percentual de agregado graúdo se mantiveram fixos;
- nota-se que o teor de argamassa manteve-se fixo em 61%, o qual configura um concreto bem argamassado, típico de um CAA. Enquanto que o concreto convencional o teor de argamassa gira em torno de 54%.

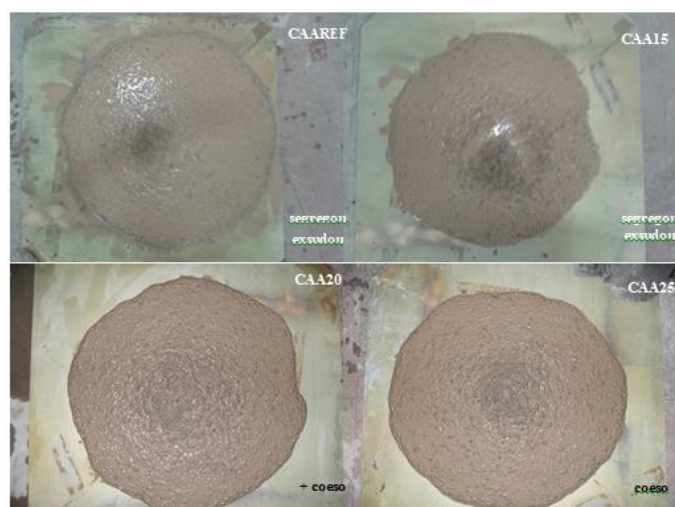
**Tabela 2 – Principais características dos concretos estudados.**

Especificações	Tipo de Concreto			
	a/s 0,45	a/s 0,45	a/s 0,45	a/s 0,45
	CAAREF	CAA15	CAA20	CAA25
	a/c 0,50	a/c 0,50	a/c 0,50	a/c 0,50
Teor de areia artificial (%) em substituição da areia rosa	0	15	20	25
Relação água/cimento	0,5	0,5	0,5	0,5
Relação cimento/agregado	1:4	1:4	1:4	1:4
Traço em massa de cimento (cimento : areia a : brita : água)	1:0:2,1:1,8:0,5	1:0,30:1,8:1,8:0,5	1:0,42:1,8:0,5	1:0,58:1,58:1,8:0,5
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	422	425,5	425,4	427,3
Teor de argamassa (%)	61	61	61	61
Fração percentual de pasta (volume)	38	38	38	38
Fração percentual de argamassa (volume)	72	72	72	72
Volume percentual de agregado graúdo	29	29	29	29
Teor de aditivo em relação à massa de cimento (%)	2	2	2	2
Slump flow (mm)	740	620	690	690
Resistência à Compressão aos 7 dias (MPa)	28,22	37,03	41,95	38,03
Resistência à Compressão aos 14 dias (MPa)	31,25	40,62	44,41	39,22
Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)	33,33	42,99	44,37	40,79

Fonte: Desenvolvida pelos autores

Na Figura 6 são apresentados os espalhamentos dos concretos estudados e, também, alguns aspectos relacionados à sua aparência. Nota-se que os concretos CAAREF e CAA15 sofreram exsudação e segregação, pois se observa uma concentração acentuada de agregado graúdo na região central do espalhamento e, além disso, verifica-se a existência de anel de exsudação na periferia do espalhamento. Esta instabilidade no estado fresco do concreto deve-se, principalmente, à insuficiência de finos. Por outro lado, os concretos CAA20 e CAA25 mostraram-se coesos, sendo o CAA20 mais coeso que o CAA25. Esta coesão se deve, principalmente, pelo fato desses concretos possuírem uma maior fração de finos.

**Figura 6 – Aspecto visual do concreto após o espalhamento.**



Fonte: Desenvolvida pelos autores

Depois da constatação que o CAA20 mostrou-se mais coeso. Decidiu-se submetê-lo aos ensaios que avaliam a capacidade de preenchimento, tais como, o slump flow e funil V, como, também, a capacidade de passagem através dos ensaios de Caixa L, Anel J e Caixa U. Na Figura 7, são apresentados os aparatos e partes da execução dos ensaios.

**Figura 7- Ensaios para verificar a autoadensabilidade do concreto.**



Fonte: Desenvolvida pelos autores

Os ensaios seguiram as recomendações de EFNARC (2005) e o conjunto de normas da NBR 15823: 2010. A seguir, os resultados do CAA20 frente aos ensaios que avaliam as habilidades de preenchimento e passagem.

**Tabela 3 – Resultados dos ensaios que avaliam as habilidades de preenchimento e passagem.**

Propriedades	Ensaio	Parâmetros	Faixa	Resultados
Capacidade de preenchimento	Slump Flow (mm)	Dfinal	600 a 800mm	710
	Funil V(s)	Tv	6 a 15 s	51
Capacidade de passagem	Caixa L	RB=H2/H1 (rel. de bloqueio)	≥ 0,80	0,31
	Anel J (mm)	BSj(blocking step)	0 a 10 mm	0
	Caixa U (mm)	R1-R2	0 a 30 mm	145

Fonte: Desenvolvida pelos autores

Constata-se, na Tabela 3, que os resultados, no geral, não estão de acordo com as tolerâncias. Cabe destacar com relação à capacidade de preenchimento, o tempo de escoamento no Funil V foi de 51 segundos, muito além da tolerância que é de 15 segundos. Isso significa que o concreto é mais viscoso, o que pode ser explicado pelo

alto teor de sólidos finos na mistura do concreto que, por sua vez, promove um maior atrito entre as partículas.

Com relação habilidade passante do concreto, observa-se que os resultados, também, não se enquadraram na tolerância apresentada na Tabela 3, tanto para o ensaio da Caixa L como para o ensaio da Caixa U. Esses resultados definem um concreto com baixa autoadensabilidade. Mais uma vez, pode-se dizer que o teor de sólidos finos fez dificultar o fluxo.

## 2.2 Argamassas estudadas

Com relação aos estudos em argamassas, tomou-se o teor de substituição de 20% de areia rosa pela areia artificial calcária como uma condição fixa, tal condição foi observada a mais propícia para se alcançar os concretos coesos. Dessa forma, as argamassas foram avaliadas frente aos ensaios de mini-slump, mini-funil V e vane test e, também, submetidas à coleta de alguns parâmetros necessários para o cálculo da espessura de água média entre os grãos, representada pelo parâmetro WFT (*water film thickness*). A seguir, na Figura 8, apresenta um memorial para calcular o parâmetro WFT, bem como os parâmetros necessários para o seu cálculo, tais como: densidade de empacotamento, índice de vazios mínimo, água excedente e área superficial total dos sólidos. Mais detalhes sobre esse cálculo encontram-se nos trabalhos seguintes: Wong (2007), Kwan *et al.* (2008), kwan *et al.* (2010) e Fung (2010).

**Figura 8 – Memorial de cálculo do parâmetro WFT.**

**CALCULO DO PARÂMETRO WFT (*water film thickness*)**

Concentração de sólidos  $\phi = \frac{M/V}{\rho_a R_a + \rho_f R_f + \rho_s R_s}$  Massa unitária Densidade de empacotamento

$\phi = 1 - \varepsilon$  (porosidade)  $= \frac{1}{1 + u(\text{índice de vazios})} = \frac{V_s}{V}$

Índice de vazios mínimo  $u_{\min} = \frac{1 - \phi}{\phi}$  Água excedente

$u_w = u_w - u_{\min}$  Densidade de empacotamento

Área superficial total dos sólidos  $A = A_\alpha \times R_\alpha + A_\beta \times R_\beta + A_\gamma \times R_\gamma$

Parâmetro WFT  $u_w^* = \frac{u_w}{A} = wft$

Fonte: Desenvolvida pelos autores

A par disso, na Figura 9 estão apresentadas as variáveis adotadas para alcançar o objetivo proposto desse trabalho, como se pode notar foram consideradas as variáveis: relação água/sólidos (em volume) e o teor de superplastificante. Nesse sentido, ensaiou-se nove pontos experimentais, os quais estão destacados de cor verde na Figura 9. Os demais pontos experimentais constatou-se que não alcançariam uma trabalhabilidade e reologia desejada, pois se notou com argamassas de relação a/s igual a 0,45, resultados não satisfatórios no que se refere à trabalhabilidade, principalmente.



**Figura 9 – Planejamento experimental do estudo em argamassas de CAA.**



Fonte: Desenvolvida pelos autores

Na Figura 10, estão apresentadas algumas etapas que foram efetuadas durante avaliação das argamassas do CAA.

**Figura 10 – Ilustração dos ensaios dos processos seguidos para avaliação das argamassas.**



Fonte: Desenvolvida pelos autores

### 3 RESULTADOS

Na Tabela 4, estão apresentados os principais resultados das argamassas frente os ensaios de trabalhabilidade, como mini-funil V e mini-slump e, também, quanto ao ensaio de *vane test* do qual se obtém a tensão de escoamento que é um parâmetro reológico.

**Tabela 4 – Resultados das argamassas frente aos ensaios que avaliam trabalhabilidade e tensão de escoamento (*Vane Test*).**

Situações	mini-Funil V (segundos)	mini-slump (mm) (espa.-100)	Vane test			
			mola	palheta	ângulo (graus)	tensão (kPa)
a/s 045 1,5sp	não esco	0	4	50mmx100mm	218	0,58
a/s 045 2,0sp	não esco	15,3	4	50mmx100mm	209	0,56
a/s 045 2,5sp	não esco	159,7	4	50mmx100mm	128	0,34
a/s 050 1,5sp	incompleto	51,7	3	50mmx100mm	143	0,52
a/s 050 2,0sp	incompleto	186,0	3	45mmx89mm	124	0,62
a/s 050 2,5sp	9,12	202,3	4	50mmx100mm	226	0,61
a/s 055 1,5sp	22,41	191,2	4	50mmx100mm	148	0,40
a/s 055 2,0sp	4,21	210,0	4	50mmx100mm	64	0,17
a/s 055 2,5sp	4,57	162,8	4	50mmx100mm	65	0,17

Fonte: Desenvolvida pelos autores

Na Tabela 5, são apresentados os resultados de WFT e, também, os principais parâmetros necessários para o seu cálculo. É importante frisar, que as superfícies específicas dos agregados graúdos foram estimadas através da distribuição granulométrica a laser, sendo que a areia artificial obteve-se um valor igual 19,13 cm<sup>2</sup>/g

e a areia rosa obteve-se um valor igual 11,54 cm<sup>2</sup>/g. Com relação ao cimento CPV-ARI foi obtido um valor igual 5333,00 cm<sup>2</sup>/g.

**Tabela 5 – Resultados das argamassas frente ao parâmetro WFT.**

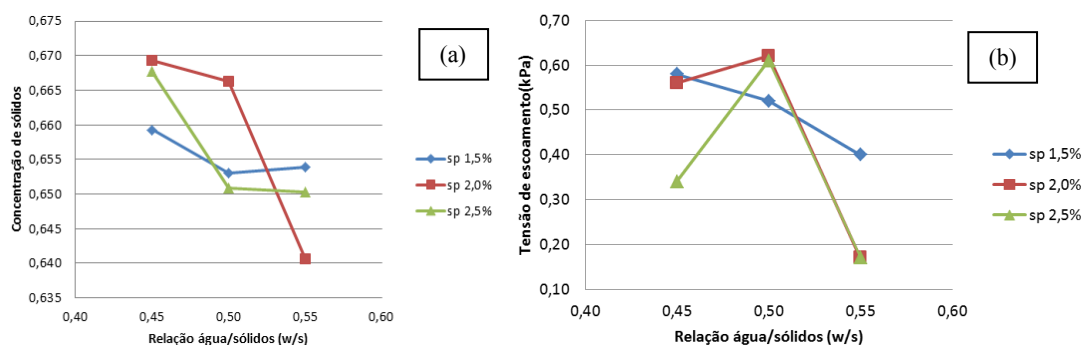
Situações	Densidade de empacotamento ( $\Phi$ )	Índice de vazios mínimo ( $u_{\min}$ )	Água excedente ( $u'_w$ )	WFT $u''_w$ ( $\mu\text{m}$ )
a/s 045 1,5sp	0,659	0,518	0,448	-0,431
a/s 045 2,0sp	0,669	0,494	0,448	-0,291
a/s 045 2,5sp	0,668	0,498	0,502	0,026
a/s 050 1,5sp	0,653	0,531	0,502	-0,019
a/s 050 2,0sp	0,666	0,501	0,502	0,006
a/s 050 2,5sp	0,651	0,536	0,555	0,122
a/s 055 1,5sp	0,654	0,529	0,555	0,165
a/s 055 2,0sp	0,641	0,561	0,555	-0,035
a/s 055 2,5sp	0,650	0,538	0,555	0,112

Fonte: Desenvolvida pelos autores

Em seguida, serão apresentados os gráficos e as análises dos resultados apresentados nas Tabelas 4 e 5.

De início, na Figura 11, são mostrados os valores de concentração de sólidos e tensão de escoamento para cada argamassa em função da relação água/sólidos, respectivamente.

**Figura 11 – (a) Concentração de sólidos em função da relação água/sólidos, (b) Tensão de escoamento em função da relação água/sólidos.**



Fonte: Desenvolvida pelos autores

Verifica-se, na Figura 11(a), que a concentração de sólidos, no geral, diminui com o aumento da relação água/sólidos devido o aumento de água na mistura e a ação do superplastificante.

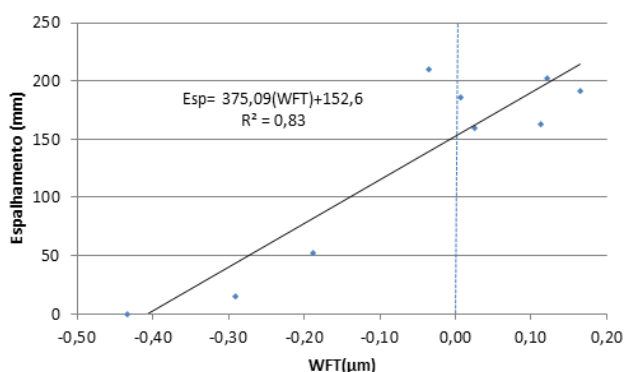
No que diz respeito ao efeito do superplastificante, nota-se que as argamassas de relação água/sólidos iguais a 0,45 e 0,50 apresentaram maiores valores de densidade de empacotamento com o incremento de 2,0% de aditivo superplastificante, tal comportamento retrata que o aditivo superplastificante propiciou uma maior dispersão das partículas, tornando-as mais compactas na mistura. Por outro lado, a argamassa de relação água/sólidos igual a 0,55 teve um comportamento inverso, isto pode ser explicado pela sua fluidez mais acentuada que fez com que as partículas sólidas se distanciassem promovendo uma menor densidade de empacotamento.

Com relação à Figura 11(b) que trata da tensão de escoamento em função da relação água/sólidos, observa-se que o aumento do teor de água tende para diminuir a tensão de escoamento pelo fato da redução do atrito entre as partículas sólidas, exceto os pontos (0,50\_sp2,0) e (0,50\_sp2,5) que não seguiram a mesma tendência. Estes últimos pontos representam as argamassas que sofreram exsudação e segregação de maneira acentuada conforme pode ser visto na Figura 13. Com isso, provavelmente houve um aumento de

concentração de sólidos na parte inferior do recipiente de ensaio do *Vane Test* que, por sua vez, promoveu um aumento do valor da tensão de escoamento dessas argamassas. É importante salientar, que se faz necessário verificar esse comportamento mais vezes, a fim de averbar essa hipótese de causa.

Quanto ao estudo do parâmetro WFT frente os parâmetros relacionados com a trabalhabilidade e reologia das argamassas. Inicialmente, pode-se destacar a regressão linear dos valores de espalhamento das argamassas em função do WFT, a qual obteve um coeficiente de determinação igual a 0,83, conforme consta na Figura 12.

**Figura 12 – Correlação entre os resultados de espalhamento da argamassa versus os valores de WFT.**



Fonte: Desenvolvida pelos autores

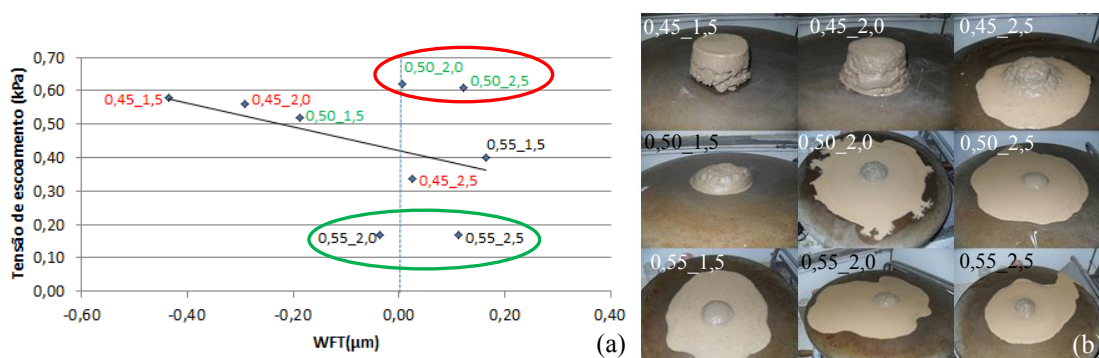
Observa-se, na Figura 12, que as argamassas com valores maiores de WFT possuem maiores espalhamentos. Isso se deve ao aumento da espessura de água envolta dos sólidos que levou a uma redução de atrito entre as partículas sólidas conferindo um maior espalhamento na mistura. Com relação aos resultados do ensaio de mini-funil V, pode-se afirmar que os seus resultados não propiciaram um comportamento consistente. Diante disso, acredita-se na necessidade de mais pontos experimentais e maior repetibilidade desse ensaio para que se possa alcançar um comportamento palpável e conclusivo.

No que tange à relação dos valores de WFT com a tensão de escoamento. Verifica-se de forma evidente, na Figura 13, uma tendência de redução da tensão de escoamento com o aumento do valor WFT. Entretanto, observa-se que os valores circunscritos de vermelho distanciaram dessa tendência, os quais representam às argamassas de relação água/sólidos igual a 0,50. Uma explicação para esse fato pode ser a segregação e a exsudação dessas argamassas que contribuíram para o aumento de concentração de sólidos na parte inferior do recipiente do ensaio de *Vane Test* refletindo no aumento dos resultados de tensão de escoamento, conforme já foi relatado acima a partir da análise do gráfico apresentado na Figura 11(b).

Quanto às argamassas que estão representadas pelos pontos circunscritos de cor verde, pode-se notar que seus valores de tensão de escoamento são baixos. Isso deve pelo fato dessas argamassas possuírem característica de argamassa fluida, sendo assim, nota-se que seus resultados estão distantes da reta referência constante na Figura 13, tal reta representa a tendência de reduzir a tensão de escoamento quando se aumenta o valor de WFT.

Diante das comparações com o parâmetro WFT. Pode-se afirmar que o WFT é um parâmetro importante e exclusivo capaz de governar a trabalhabilidade e as propriedades reológicas da argamassa, conforme Kwan *et al* (2010) já afirmaram.

**Figura 13 – Relação da tensão de escoamento com parâmetro WFT, seguido com a ilustração do aspecto visual das argamassas estudadas.**



Fonte: Desenvolvida pelos autores

Com base nos resultados de mini-slump, mini-funil V, parâmetro WFT e tensão de escoamento das argamassas, decidiu-se alcançar os concretos que cumprissem com os requisitos de autoadensabilidade, visto que o concreto com relação água/sólidos igual a 0,45 e teor de aditivo superplastificante igual a 2% não atendeu os requisitos. Para isso, buscou-se referências de argamassas que, de maneira geral, apresentaram bons resultados de trabalhabilidade e de reologia. Ademais, buscou-se argamassas que tiveram valores de WFT mais próximos de zero com diferentes relações água/sólidos.

Portanto, adotou-se as proporções das argamassas 0,50\_2,0 e 0,55\_2,0 para comporem os concretos, levando em consideração as tolerâncias prescritas pelo ACI 237R-07 (2007), na Tabela 1. A seguir, na Tabela 6 e Figura 14 são apresentadas as principais características dos concretos confeccionados por meio de referências de proporções dessas argamassas.

**Tabela 6 – Resultados dos concretos por meio de referências de argamassas.**

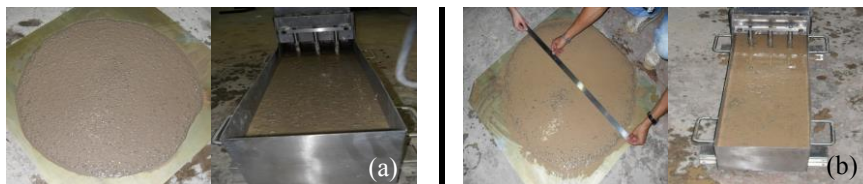
Propriedades	Ensaio	Parâmetros	Faixa	Resultados	
				C50_20	C55_20
Teor de areia artificial (%) em substituição da areia rosa				20	20
Traço em massa de cimento (cimento : areia a : areia b: brita : água)				1:1,58:0,52:1,80:0,56	1:1,58:0,52:1,80:0,56
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )				416	406
Teor de argamassa (%)(massa)				67	67
Teor de aditivo em relação à massa de cimento (%)				2,0	1,5
Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)				60,4	29,8
Capacidade de preenchimento	Slump Flow (mm)	Dfinal	600 a 800mm	800	800
	Funil V(s)	Tv	6 a 15 s	12,35	4,53
Capacidade de passagem	Caixa L	RB=H2/H1(re l. de bloqueio)	≥ 0,80	0,99	0,98
	Anel J(mm)	BSj (blocking step)	0 a 10 mm	7	0
	Caixa U(mm)	R1-R2	0 a 30 mm	5	5

Fonte: Desenvolvida pelos autores

Nota-se, na Tabela 6, que os concretos C50\_20 e C55\_20 cumpriram com os requisitos de capacidade de preenchimento e de capacidade de passagem. No entanto, quando se verifica a estabilidade do concreto no estado fresco, constata-se por meio de inspeção visual, que o C50\_20 manteve-se coeso (conforme visto na Figura 14(a)), ao contrário,

do C55\_20 que sofreu exsudação, conforme ilustra a Figura 14(b). Portanto, pode-se afirmar que os estudos em argamassas foram capazes de referenciar os prováveis concretos auto-adensáveis. Dessa forma, cabe enfatizar que a relação água/sólidos igual e próxima de 0,50, pode ser uma referencia mais favorável para o alcance dos concretos auto-adensáveis, desde que as características dos materiais e proporções sejam similares como adotadas neste estudo.

**Figura 14 – Aspectos visuais dos concretos. (a) C50\_20 (b) C55\_20.**



Fonte: Desenvolvida pelos autores

### 3 CONCLUSÕES

Com base no programa experimental dessa pesquisa, são apresentadas, neste item, as principais conclusões obtidas.

- Constatou-se que o teor de substituição de 20% da areia rosa pela areia artificial foi relevante para tornar o concreto coeso;
- Verificou-se que na medida em que se aumenta a relação água/sólidos, a tensão de escoamento tende a reduzir;
- Foi possível obter uma regressão tipo linear entre os resultados de espalhamento de mini-slump e os resultados de WFT. Com isso, concluiu-se que quanto maior o valor de WFT, maior será a espessura de água envolta dos sólidos que, por sua vez, propicia uma redução de atrito entre as partículas sólidas conferindo um maior espalhamento na mistura;
- Foi possível, também, obter uma tendência entre os resultados de tensão de escoamento e os resultados de WFT. Frente a isso, notou-se que o aumento da espessura de água entre os grãos favorece o escoamento, podendo esse efeito ser explicado, também, pela redução de atrito entre as partículas sólidas;
- Pode-se afirmar que os estudos em argamassas foram capazes de referenciar os prováveis concretos auto-adensáveis;
- Constatou-se que a relação água/sólidos igual e próxima de 0,50, pode ser uma referencia mais favorável para o alcance de concretos auto-adensáveis, desde que as características dos materiais e proporções sejam similares como adotadas nesse estudo.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823: Concreto Auto-Adensável. Rio de Janeiro, 2010.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 237R-07: Self-Consolidating Concrete, 2007.
- EFNARC. **Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete**. Ucrânia, 2005.32p.
- GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R.. Métodos de Dosagem de Concreto Autoadensável. 1ªedição, pág 165, editora PINI, 2009.
- KWAN, A. K. H.; FUNG, W. W. S.; WONG, H. H. C. Water film thickness, flowability and rheology of cement – sand mortar. *Advances in Cement Research*. v. 22, 3-14, 2010.
- FUNG, W. W. Role of water film thickness in rheology of mortar and concrete. Hong Kong. 201p. Tese (Doutorado) – Universidade de Hong Kong, 2010.
- KWAN, A. K. H; WONG, H. H. C. Effects of packing density, excess water and solid surface area on flowability of cement paste. *Advances in Cement Research*. v.20, p. 1-11, 2008.
- KWAN, A. K. H; WONG, H. H. C. Packing density of cementitious materials: part 1 – measurement using a wet packing method. *Materials and Structures*. v.41, p. 689 - 701, 2008.
- FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M. Agregados para a Construção Civil. In: ISAIA, G.C. (Ed.) **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL: Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo : Ibracon, cap.16, vol 1, 2007, p. 481 – 523.
- WONG, H. H. Effects of water content, packing density and solid surface area on cement paste rheology. Hong Kong. 201p. Tese (Doutorado) – Universidade de Hong Kong, 2007.
- JIN, J. **Properties of mortar for self-compacting concrete**. 2008. 398p. Tese (Doutorado em Engenharia) – *Department of Civil and Environmental Engineering, Universidade of London, London, 2002.*