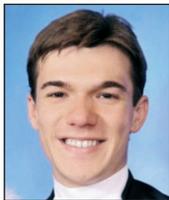


## Self-compacting concretes (SCC) – comparison of methods of dosage

### Concreto autoadensável (CAA) – comparativo entre métodos de dosagem



B. F. TUTIKIAN <sup>a</sup>  
bftutikian@unisinios.br

M. PACHECO <sup>b</sup>  
pacheco\_silva@ig.com.br

#### Abstract

The composition of a self-compacting concrete (SCC) should be defined to fulfill a number of requirements, such as self-compactability, strength and durability. This study aims to compare three methods of dosage for SCC with local materials, so as to determine which one is the most economical and rational, thus assisting the executor in making a decision and enabling economic and technical feasibility for its application. The methods used in the experimental program were: Nan Su et al., which was developed in 2001 [1]; Repette-Melo, which was proposed in 2005 [2]; and Tutikian & Dal Molin, which was developed in 2007 [3]. From the results obtained in the experimental program, it was observed that the method which presented the lowest cost and highest compressive strength at the ages of 7, 28 and 91 days was Tutikian & Dal Molin, while the one which reached the lowest chloride ion penetration, best compactness and highest elasticity modulus was Repette-Melo. In tests carried out in the fresh state, all tested methods yielded mixtures which comply with the self-compactability levels required by ABNT NBR 15823:2010 [4].

**Keywords:** self-compacting concrete, methods of dosing, properties in the fresh and hardened state.

#### Resumo

A composição de um concreto autoadensável (CAA) deve ser definida de forma a satisfazer um conjunto de requisitos, como a autocompactabilidade, resistência e durabilidade. O objetivo deste artigo é comparar três métodos de dosagem para CAA com materiais locais, a fim de determinar o mais econômico e racional, auxiliando a tomada de decisão por parte do executor e proporcionando a viabilidade econômica e técnica para aplicações. Os métodos utilizados no programa experimental foram: o de Nan Su et al., desenvolvido em 2001 [1], o de Repette-Melo, proposto em 2005 [2] e o de Tutikian & Dal Molin, elaborado no ano de 2007 [3]. A partir dos resultados obtidos no programa experimental, observou-se que o método que apresentou os menores custos e maiores resistências à compressão nas idades de 7, 28 e 91 dias foi o de Tutikian & Dal Molin e o que atingiu menor penetração de íons cloretos, melhor compactidade e maior módulo de elasticidade foi o de Repette-Melo. Nos ensaios realizados no estado fresco todos os métodos experimentados obtiveram misturas que se enquadraram na classe de autoadensabilidade requerida pela ABNT NBR 15823:2010 [4].

**Palavras-chave:** concreto autoadensável. métodos de dosagem. propriedades no estado fresco e endurecido.

<sup>a</sup> ENGENHARIA CIVIL, PPGEC, UNISINOS, bftutikian@unisinios.br – Av. Unisinios, 950, centro 6 – Exatas, São Leopoldo / RS, Brasil;

<sup>b</sup> ENGENHARIA CIVIL, UNISINOS, pacheco\_silva@ig.com.br – Av. Unisinios, 950, centro 6 – Exatas, São Leopoldo / RS, Brasil;

## 1. Introdução

O desenvolvimento do concreto autoadensável marca um grande passo em direção à eficiência e às condições de trabalho nos canteiros de obras e na indústria de pré-fabricados. Este material permite concretagens em tempos mais curtos, um melhor acabamento estético da superfície do concreto, além de apresentar melhores características no estado endurecido, conferindo estruturas com maior durabilidade (GRUNEWALD, 2004 [5]).

Os benefícios deste tipo de concreto vão além da durabilidade e da resistência. O CAA diminui a poluição sonora, já que não faz uso de vibradores, o que também contribui para a redução no consumo de energia elétrica; minimiza os riscos de acidentes causados pelo excesso de pessoas sobre as lajes, pois necessita de menos mão-de-obra; e reduz problemas ergonômicos nos trabalhadores, já que eles fazem um esforço menor no lançamento e acabamento. Segundo Tutikian (2007 [3]), o uso do CAA direciona a construção civil para uma produção industrializada, diminuindo o custo da mão-de-obra, aumentando a qualidade, a durabilidade, a confiança na estrutura e a segurança dos trabalhadores.

O CAA pode ser considerado o mais significativo avanço na tecnologia do concreto ao longo de décadas e deve substituir gradualmente parte do concreto convencional produzido atualmente pela indústria de concreto. O CAA é um material que reúne uma combinação única de desempenho, uniformidade e requisitos que não podem ser alcançados utilizando componentes convencionais e usuais de construção (SONEBI, 2004 [6]).

Tutikian (2007 [3]) descreve que o CAA atrai cada vez mais interesse no Brasil, e tem sido utilizado em indústrias de pré-fabricados e em obras correntes e especiais. Porém, os principais estudos focam as propriedades mecânicas, a durabilidade e a possibilidade de utilização com determinados tipos de materiais locais. A dosagem, que é um dos aspectos mais importantes deste concreto, vem sendo estudada superficialmente.

O CAA é mais utilizado no Japão e na Europa. No Brasil, no entanto, é preciso haver mais confiança nos métodos de dosagens para tornar o CAA mais confiável e popularizado, abrindo assim um espaço maior para a sua aplicação em qualquer lugar que haja viabilidade econômica (REVISTA TÉCNICA, 2008 [7]).

Diversos procedimentos ou recomendações internacionais e nacionais para dosagem do CAA foram publicados à medida que as pesquisas foram se intensificando. Estes métodos podem divergir em critérios para definição da composição granular, como do teor de materiais finos, da imposição de limites para a relação água/cimento, do volume de pasta, do teor de aditivo superplastificante, do uso de aditivos modificadores de viscosidade e do estudo em separado da pasta e da argamassa. Alguns métodos também consistem em seqüências de cálculos, traduzindo-se em intervalos limite para cada material na mistura.

Neste trabalho foram comparados três métodos existentes de dosagem para CAA com materiais locais, a fim de determinar o mais econômico, racional e durável, auxiliando a tomada de decisão por parte do executor e proporcionando a viabilidade econômica e técnica para aplicações práticas, podendo assim expandir os conhecimentos e o emprego do CAA. Foram escolhidos os métodos de dosagem propostos por Nan Su *et al.* [1] de 2001, por se basear em equações e cálculos empíricos; o de Repette-Melo [2], elaborado no ano de 2005 por propor uma seqüência de testes do aditivo na

pasta até o concreto para o acerto dos constituintes da mistura; e o de Tutikian & Dal Molin [3], desenvolvido em 2007 por estudar o esqueleto granular do concreto antes de torna-lo autoadensável. A autoadensabilidade do CAA no estado fresco foi comparada através dos ensaios de: espalhamento,  $t_{500mm}$ , caixa “L” e funil “V” baseados nos limites propostos pela ABNT NBR 15823:2010 [4]. Já no estado endurecido foram analisadas as características de: resistências à compressão aos 7, 28 e 91 dias, o módulo de elasticidade aos 91 dias, a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas aos 91 dias e a penetração de íons cloretos aos 28 dias, para todas as misturas. Ainda determinou-se o custo com base em valores de mercado dos componentes dos concretos.

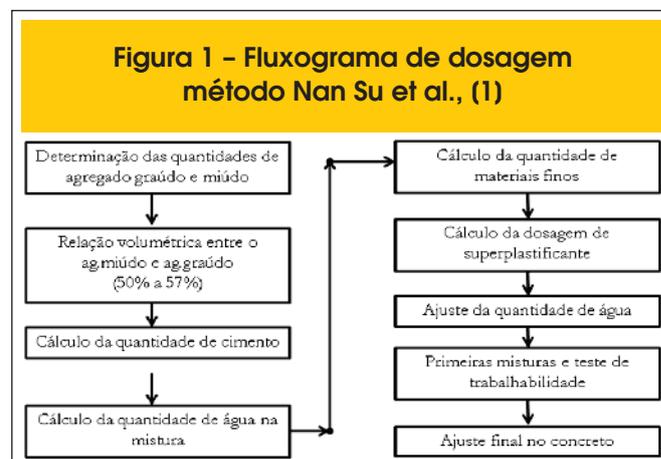
## 2. Objetivos da pesquisa

O presente trabalho tem como objetivo principal comparar técnica e economicamente os métodos de dosagem propostos por Nan Su *et al* em 2001 [1], Repette-Melo em 2005 [2] e Tutikian & Dal Molin de 2007 [3] para CAA, utilizando materiais disponíveis no estado do Rio Grande do Sul –RS, Brasil.

## 3. Materiais e programa experimental

Tendo em vista os objetivos propostos, foi elaborado e desenvolvido um programa experimental, que estabelece os ensaios realizados nos concretos bem como os materiais utilizados na pesquisa. O trabalho experimental foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção (LMC), da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Para execução de todos os concretos utilizou-se uma betoneira de eixo vertical e seguiu-se um padrão na ordem para colocação da mistura dos materiais. Primeiramente, colocou-se o agregado graúdo, após 80% da água, areia fina, cimento, aditivo e o restante da água. No total, foram dosadas oito misturas de concreto, sendo que para cada uma foram fabricadas 11 corpos-de-prova (CP's) com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, para realizar os ensaios, totalizando 88 CP's. Estes permaneceram à temperatura ambiente por 24 horas, com o topo protegido por placas de vidro. Depois, foram desformados e levados para câmara úmida, retirando deste ambiente apenas para a realização dos testes nas idades especificadas.



### 3.1 Apresentação dos Métodos de dosagem utilizados

#### 3.1.1 Método Nan Su et al [1]

O método é dividido em passos, de acordo com o esquema apresentado na Figura 1. Para definir a quantia de agregados, adota-se a relação volumétrica entre o agregado miúdo e o total de agregados (S/t), que, segundo o método, deve variar entre 50% a 57%. A partir desses valores foi fixada uma relação de S/t = 53% e analisou-se nos ensaios do estado fresco a eficácia da mistura quanto à autoadensabilidade.

Para composição do agregado graúdo, utilizou-se um percentual de 60% de brita 25 mm e 40% de brita 19 mm para após empregar na Equação 1. Este arranjo foi o que apresentou o menor número de vazios.

$$W_g = PF * W_{gL} * (1 - S/t) \quad (1)$$

Em que:

$W_g$  - quantidade de agregado graúdo em kg/m<sup>3</sup>;

$W_{gL}$  - densidade do agregado graúdo, no estado solto em kg/m<sup>3</sup> (1528 kg/m<sup>3</sup> para os materiais estudados);

PF - relação, em massa, dos agregados no estado solto e dos agregados no estado compactado (0,941 para os materiais estudados);

S/t - relação volumétrica entre o agregado miúdo e o total de agregados, que varia entre 50% e 57% (adotado 53%).

O resultado foi  $W_g = 677$  kg/m<sup>3</sup> de agregado graúdo, sendo 406,20 kg/m<sup>3</sup> para a brita de 25 mm e 270,80 kg/m<sup>3</sup> a brita de 19 mm.

O agregado miúdo, a areia regular, foi determinada através da Equação 2.

$$W_s = PF * W_{sL} * S/t \quad (2)$$

Em que:

$W_s$  - quantidade de agregado miúdo em kg/m<sup>3</sup>;

$W_{sL}$  - densidade do agregado miúdo, no estado solto em kg/m<sup>3</sup> (1470 kg/m<sup>3</sup> para os materiais estudados);

PF - relação, em massa, dos agregados no estado solto e dos agregados no estado compactado (0,902 para os materiais estudados)

S/t - relação volumétrica entre o agregado miúdo e o total de agregados, que varia entre 50% e 57% (adotado 53%).

O resultado foi  $W_s = 703$  kg/m<sup>3</sup> de agregado miúdo.

Com as quantidades de brita e areia regular definidas determina-se a quantidade de cimento. Para a obtenção da quantidade de cimento por m<sup>3</sup>, primeiramente, tem-se que adotar a resistência à compressão requerida aos 28 dias em MPa (f'c).

A f'c escolhida para o cálculo foi de 55 MPa. Com isso, supõe-se que a resistência à compressão do CAA aos 28 dias será de 55 MPa. A partir da Equação 3, tem-se então o consumo de cimento da mistura.

$$C = \frac{f'c}{0,14} \quad (3)$$

Em que:

C - consumo de cimento em kg/m<sup>3</sup>;

f'c - resistência à compressão requerida em MPa.

Com isso, o consumo de cimento foi estabelecido em 393 kg/m<sup>3</sup>. Com a quantidade de cimento já determinada, deve-se estabelecer a relação água/cimento em função das solicitações locais e da classe de agressividade do ambiente.

Para determinação da quantidade de água a ser adicionada na mistura, seguiu-se as prescrições da ABNT NBR 6118:2007 [8] e adotou-se a classe de agressividade do ambiente como III, com uma relação água/cimento  $\leq 0,50$ , que foi o limite utilizado. Através da Equação 4, tem-se então a quantidade de água na mistura.

$$W_{aC} = (a / i) * C \quad (4)$$

Com isso,  $W_{aC} = 196$  kg/m<sup>3</sup>.

O material fino selecionado para dosagem foi a areia fina. Como já se conhece as quantidades de todos os outros componentes do CAA, o volume que falta para completar 1 m<sup>3</sup> pertence ao material fino ( $V_f$ ) que deve ser encontrado com a Equação 5.

$$V_f = 1 - \frac{W_g}{1000 * G_g} - \frac{W_s}{1000 * G_s} - \frac{C}{1000 * G_c} - \frac{W_{aC}}{1000 * G_a} - V_{ar} \quad (5)$$

Em que:

$G_g$  - massa específica do agregado graúdo;

$G_s$  - massa específica do agregado miúdo;

$G_c$  - massa específica do cimento;

$G_a$  - massa específica da água;

$V_{ar}$  - quantidade de ar incorporado no CAA em (%).

A partir do resultado obtido, 0,13, aplica-se este valor na Equação 6 e tem-se o resultado final da quantia de areia fina na mistura.

$$W_f = V_f * 1000 * G_{af} \quad (6)$$

Em que:

$W_f$  - quantidade de finos em kg/m<sup>3</sup>;

$G_{af}$  - massa específica do material fino utilizado em kg/m<sup>3</sup>;

$V_f$  - volume de finos na mistura.

$W_f = 303$  kg/m<sup>3</sup>, de areia fina na mistura de CAA.

Com a quantidade de todos os agregados definidas e o consumo de cimento e água obtidos, ainda resta determinar o percentual de aditivo.

A relação aditivo/aglomerante adotada foi de 0,70% (teor de sólidos e líquidos do aditivo), valor escolhido como parâmetro inicial,

Tabela 1 – proporções obtidas na determinação de cada método

PARÂMETRO	MÉTODOS							
	Tutikian				Nan Su et al.		Repette-Melo	
1:m	3	4	5	6	4,28	3,50	3,97	4,32
w/c (kg/kg)	0,35	0,47	0,56	0,68	0,50	0,39	0,48	0,56
α (%)	64	62	60	59	67	61	60	59
C (kg/m³)	538	421	350	297	393	490	432	398
TAF (%)	20	20	20	20	18	10	10	10
TG (%)	48	48	48	48	40	50	50	50
Adt (%)	0,62	0,62	0,62	0,62	0,85	0,75	0,75	0,75
R\$	313,04	252,53	215,86	188,08	249,25	298,97	267,14	248,49

Sendo:

1:m = Traço unitário para cada família

a/c = Relação água/cimento (kg/kg)

α = Teor de argamassa (%)

C = Consumo de cimento (kg/m³)

TAF = Teor de areia fina em relação total de agregados em massa (%)

TG = Teor de agregado graúdo em relação total de agregados em massa (%)

Adt = Teor de aditivo (%) em relação ao peso do cimento

§ = Custo total para obtenção de 1m³ de concreto

sendo que este pode ser alterado conforme os resultados dos testes de trabalhabilidade.

A quantidade de água no superplastificante foi considerada como parte da água da mistura com isso calculou-se a partir da Equação 7, o quantitativo de aditivo, em kg/m³ utilizado na mistura.

$$W_{sp} = n\% * (C) \tag{7}$$

Sendo n% a relação superplastificante/aglomerante, C a quantidade de cimento por m³ na mistura, m% o teor de sólidos do superplastificante, W<sub>sp</sub> a quantidade de aditivo superplastificante utilizada e W<sub>asp</sub> a quantia de água contida no aditivo superplastificante. Com o valor de W<sub>sp</sub> = 2,75 kg/m³ de aditivo superplastificante, calcula-se, com a Equação 8, a quantia de água contida no aditivo.

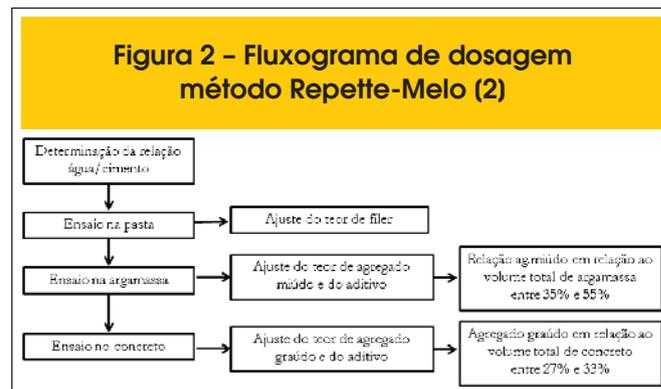
$$W_{asp} = (1 - m\%) * W_{sp} \tag{8}$$

O resultado foi de W<sub>asp</sub> = 1,65 kg/m³ de água contida no aditivo. Com o teor de água contido no aditivo superplastificante, a consumo de água inicial da mistura passou a ser de 197,65 kg/m³. A partir de todas as proporções definidas para composição do CAA, passou-se então a dosagem destes materiais em laboratório, realizando primeiramente um traço teste. Ressalta-se que as únicas quantidades que podem ser alteradas a partir deste passo são a relação água/cimento e o teor de aditivo/aglomerante.

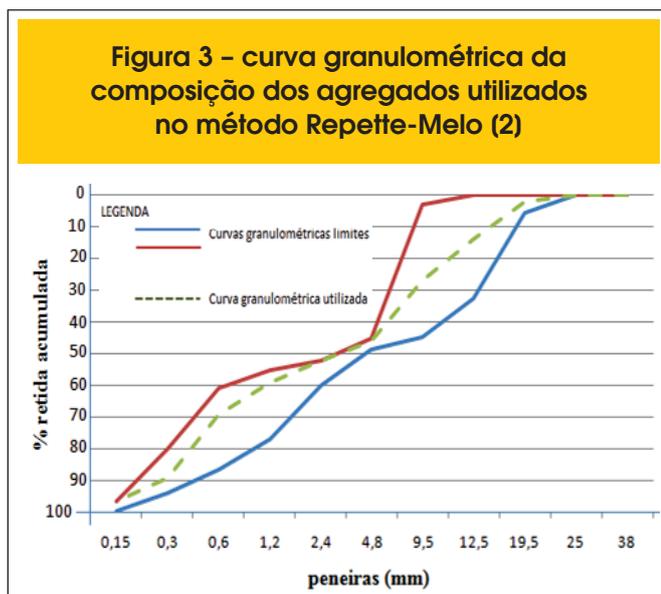
Após a mistura dos materiais na betoneira, passou-se então a realização dos testes de trabalhabilidade para verificação da auto-adensabilidade do CAA. Com base no ensaio de espalhamento realizado, verificou-se que a mistura estava pouco fluida, apresentando um resultado de espalhamento de 450 mm. A partir deste resultado foi acrescentado aditivo superplastificante para atingir melhor trabalhabilidade na mistura, antes mesmos de realizar os outros testes. Observa-se que não foi adicionado água na mistura. Após o acréscimo do teor de aditivo na mistura, realizaram-se novos ensaios de trabalhabilidade, conforme a ABNT NBR 15823:2010 [4], e constatou-se que os valores estavam dentro dos limites aceitáveis. A relação aditivo/aglomerante final da mistura foi de 0,85.

Ressalta-se que para este método foi possível criar apenas um traço para a mistura de CAA, pois o mesmo não evidencia como quantificar os traços auxiliares para dosagem.

Figura 2 – Fluxograma de dosagem método Repette-Melo (2)



**Figura 3 – curva granulométrica da composição dos agregados utilizados no método Repette-Melo (2)**



A Tabela 1 apresenta a composição do traço para este método.

### 3.1.2 Método Repette-Melo [2]

O fluxograma para obtenção da mistura de CAA por este método de dosagem é exposto na Figura 2.

O passo inicial para constituição da mistura de CAA é a composição da pasta, definindo a relação água/cimento e o volume de adição de finos.

Para determinação da relação/água cimento, baseou-se como premissa inicial a resistência à compressão em função da quantidade de água e cimento utilizada em cada traço. Com isso para definição de uma família de concreto, determinou-se inicialmente três valores de relação água/cimento, uma para o traço pobre ( $a/c$ : 0,56), uma para o rico ( $a/c$ : 0,39) e outra para o traço intermediário ( $a/c$ : 0,48), seguindo o conhecimento prévio dos materiais.

O teor de finos é determinado para cada relação água/cimento especificada, sendo dosado em substituição ao cimento, em volume. O método ressalta que nesta etapa deverá ser utilizada a percentagem de filer passante pela peneira 0,075 mm. Como material fino para proporcionamento da mistura de CAA, foi utilizada a areia fina. Devido este material não possuir uma quantidade significativa de partículas menores que 0,075 mm, não foi possível incluí-lo na composição da pasta.

No próximo passo compõe-se a argamassa da mistura, definindo-se o teor de agregado miúdo em relação ao volume total de argamassa e após o teor base do aditivo superplastificante. O teor de agregado miúdo foi ajustado apenas para uma relação água/cimento, a intermediária, sendo o percentual encontrado adotado para as demais.

Como premissa básica, o método indica que o volume de agregado miúdo em relação ao volume total de argamassa deve ser preferencialmente, não inferior a 35% e não superior a 55%.

Como agregado miúdo foi definido uma composição de areia regular e a areia fina. Para a determinação de escolha dos percentuais destes materiais tomou-se como base a curva granulométrica ótima dos agregados. A partir daí concluiu-se que o teor de agregado miúdo que

melhor se adaptou as curvas limites estabelecidas pelo método foi a composição com 80% de areia regular e 20% de areia fina.

Para definir o teor de agregado miúdo, as argamassas foram avaliadas em razão do ensaio de espalhamento, adaptado para argamassa. Através deste ensaio o teor ideal de agregado miúdo na composição da argamassa foi de 50% em relação ao volume total, atingindo resultado satisfatório dos ensaios quando o teor de aditivo foi de 0,20% (considerando apenas o teor de sólidos), pois se obteve um tempo de escoamento de 4 segundos e um espalhamento de 240 mm. Segundo o método, o teor ideal de aditivo é aquele que resulta em diâmetro de espalhamento da argamassa entre 200 e 280 mm e tempo de escoamento no funil-“V” entre 3,5 e 10 segundos.

Para determinação do teor de agregado graúdo empregou-se a argamassa com teor intermediário de água/cimento, para a confecção de uma mistura inicial para teste com 30% de agregados graúdos, em relação ao volume total de concreto. O método propõe um teor de agregado graúdo entre 27% e 33%, sendo o valor ótimo aquele que resultar em resultados satisfatórios nos ensaios de trabalhabilidade e atingir um percentual de até 0,3% de aditivo (considerando apenas o teor de sólidos). Com isso adotou-se o valor de 30%, o intermediário entre os limites propostos. A partir deste percentual realizou-se uma mistura teste com o traço intermediário a fim de verificar a aceitabilidade da proporção adotada, levando em conta a quantidade inicial de aditivo determinada na fase da argamassa.

Como agregado graúdo, foi utilizado uma mistura de 50% de brita 25 mm e 50% de brita 19 mm. Estes percentuais foram adotados com base nas análises granulométricas realizadas das britas.

A Figura 3 mostra a curva granulométrica dos agregados graúdos e miúdos, conforme os percentuais adotados e as curvas limites impostas pelo método para a determinação do arranjo granulométrico. Como se pode perceber na Figura 3, a curva granulométrica resultante da mistura dos agregados utilizados para a mistura está dentro dos limites recomendados pelo método. Caso não fosse possível enquadrar alguma composição dos agregados nas curvas limites, seria necessário especificar outros materiais com características granulométricas diferentes e que possibilitassem a viabilidade da mistura.

Segundo o método, o teor de aditivo na argamassa representa um bom indicativo do resultado que será alcançado no concreto.

**Figura 4 – Fluxograma de dosagem método Tutikian & Dal Molin (3)**

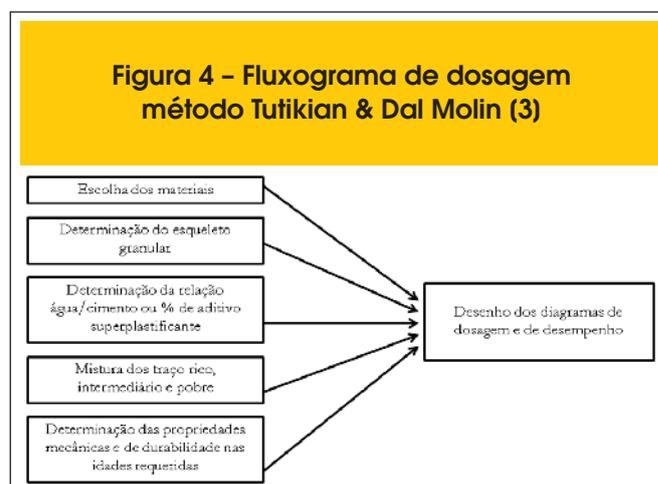


Tabela 2 – ensaio de compacidade entre a brita 25 mm e a brita 19 mm

Brita 25 mm (%)	Brita 19 mm (%)	Massa Específica Mistura (kg/m <sup>3</sup> )	Massa Unitária Compactada (kg/m <sup>3</sup> )	Índice de Vazios (%)
100	0	3065,00	1704,35	44,39
90	10	3044,50	1736,23	42,97
80	20	3024,00	1755,36	41,95
70	30	3003,50	1753,04	41,63
60	40	2983,00	1759,42	41,02
50	50	2962,50	1736,23	41,39
40	60	2942,00	1701,45	42,17
30	70	2921,50	1634,78	44,04
20	80	2901,00	1597,10	44,95
10	90	2880,50	1556,52	45,96
0	100	2860,00	1504,35	47,40

De modo geral, é necessário um incremento de aproximadamente 0,1 % em relação ao teor ótimo da argamassa. Seguindo as orientações em relação ao teor de aditivo, iniciou-se a mistura teste com um percentual de superplastificante de 0,2%. Observou-se através do ensaio de espalhamento que a mistura estava pouco fluida, a partir daí o teor de aditivo foi sendo aumentado até o limite máximo admissível, 0,3% (considerado apenas o teor de sólidos) e em caso do resultado não sendo satisfatório, dever-se-ia alterar a quantidade de agregado graúdo, em relação ao volume total de concreto e reiniciar a mistura, modificando os componentes do traço. Após o aumento de 0,1% de aditivo, realizou-se o ensaio de espalhamento novamente e verificou-se que com o acréscimo de superplastificante o resultado obtido estava em acordo com os valores estabelecidos, com isso passou-se para os outros ensaios de trabalhabilidade, os de T50, caixa 'L' e funil 'V', a fim de verificar a adequação dos mesmos com os valores indicados pela ABNT NBR 15823:2010 [4].

Com o traço intermediário teste definido, e a partir dos valores obtidos, pode-se calcular os traços finais dos CAA. Para o cálculo dos quantitativos de materiais, utilizou-se a quantidade de 1 m<sup>3</sup> de concreto, sendo este formado em volume por 30% de agregado graúdo e 70% de argamassa, sendo que da argamassa o percentual de agregado miúdo é 35% e o restante pertence a água, cimento e aditivo.

Ressalta-se que devido aos procedimentos atribuídos pelo método de dosagem, é necessário que se mantenha o mesmo volume de agregados graúdos e miúdos para todas as relações água/cimento decretadas no passo inicial do procedimento da mistura. Isso é abordado quando se recomenda que o teor de argamassa deve ser ajustado apenas para uma relação água/cimento (a intermediária, no caso da construção da curva da família de concreto com três resistências), sendo o valor encontrado adotado para as demais. Isso implica que os únicos materiais que serão alterados para cada concreto é o consumo de cimento, que provocará conse-

quentemente na mudança do consumo de aditivo e da quantidade de água. No entanto, de uma mistura para outra, apenas se adicionará água e diminuirá cimento e aditivo, considerando para este conjunto uma quantidade constante de 0,35m<sup>3</sup>.

O teor final do aditivo superplastificante foi de 0,3% (apenas teor de sólidos), igual a 0,75% se considerado o teor de sólidos e líquidos contidos no aditivo. Percentual este fixado para os outros traços com as mesmas proporções de agregados/cimento em massa, ajustando-se apenas a relação água/cimento.

A Tabela 1 apresenta a composição do traço para este método.

### 3.1.3 Método Tutikian-Dal Molin

O método é apresentado de forma esquemática na Figura 4. O primeiro passo realizado para obtenção da mistura foi a determinação do esqueleto granular. Os materiais foram empacotados, de dois em dois, dos de maior granulometria para os de menor. O primeiro pacote do ensaio de compactação foi entre a brita 25 mm e a brita 19 mm, para seguir com a compacidade com a areia regular e, por fim, com a areia fina.

A Tabela 2 mostra o resultado do empacotamento da brita 25 mm com a brita 19 mm. Observa-se que o percentual de mistura que proporcionou o menor índice de vazios foi o de 60% de brita 25 mm e 40% de brita 19 mm, com 41,02% de vazios. Ressalta-se que a massa unitária desta mistura não é maior entre todas, ou seja, a proporção ideal é sempre a que resulta um menor índice de vazios, a massa unitária compactada, serve apenas como indicativo, não sendo suficiente para a conclusão.

O segundo passo do empacotamento para a mistura de CAA foi a obtenção da compacidade entre a mistura anterior, com britas 25 mm e 19 mm, e a areia regular. A Tabela 3 apresenta o resultado do empacotamento das britas e a areia regular.

E, por fim, foi realizado o último empacotamento, entre a areia fina e os outros agregados já empacotados. A Tabela 4

Tabela 3 - ensaio de compacidade entre as britas 25 mm e 19 mm e a areia regular

Brita 25 mm e 19 mm (%)	Areia média (%)	Massa Específica Mistura (kg/m <sup>3</sup> )	Massa Unitária Compactada (kg/m <sup>3</sup> )	Índice de Vazios (%)
100	0	2983,00	1759,42	41,02
90	10	2918,70	1846,28	36,74
80	20	2854,40	1951,30	31,64
70	30	2790,10	2062,03	26,09
65	35	2757,95	2092,75	24,12
60	40	2725,80	2125,22	22,03
55	45	2693,65	2091,01	22,37
50	50	2661,50	2078,84	22,39
40	60	2597,20	2014,49	22,44
30	70	2532,90	1959,42	22,64
20	80	2468,60	1892,17	23,35
10	90	2404,30	1745,51	27,40
0	100	2340,00	1628,41	30,41

Tabela 4 - ensaio de compacidade entre as britas 25 mm e 19 mm, areia regular e areia fina

Brita 25 mm e 19 mm e Areia regular (%)	Areia fina (%)	Massa Específica Mistura (kg/m <sup>3</sup> )	Massa Unitária Compactada (kg/m <sup>3</sup> )	Índice de Vazios (%)
100	0	2725,80	2125,22	22,03
90	10	2686,22	2154,78	19,78
85	15	2657,29	2182,61	17,86
80	20	2646,64	2206,96	16,61
75	25	2626,85	2182,61	16,91
70	30	2607,06	2120,58	18,66
65	35	2587,27	2090,43	19,20
60	40	2567,48	2032,75	20,83
55	45	2547,69	1974,49	22,50
50	50	2527,90	1921,74	23,98
40	60	2488,32	1886,96	24,17
30	70	2448,74	1800,00	26,49
20	80	2409,16	1750,72	27,33
10	90	2369,58	1663,77	29,79
0	100	2330,00	1561,74	32,97

Figura 5 – Ensaio realizados no estado fresco



mostra os resultados obtidos com o ensaio de compacidade destes materiais.

Observa-se que a composição ótima foi de 80% da mistura entre as britas 25 mm e 19 mm e areia média e 20% de areia fina, resultando um teor de vazios de 16,61%. O ensaio partiu de substituições de 10 em 10%, e aumentou a precisão para 5% ao se aproximar do valor final ideal.

Os valores de ensaio de compacidade entre os materiais resultaram nas seguintes proporções para as misturas de CAA, em massa: 28,80% de brita 25 mm, 19,20% de brita 19 mm, 32% de areia regular e 20% de areia fina.

Com o ensaio de compacidade realizado, passou-se então para determinação da relação a/c e o teor de aditivo superplastificante. A partir deste ponto, adotou-se o traço intermediário I (1:1:4) para se realizar a mistura de ajuste, a fim de confirmar a relação a/c e, principalmente, determinar, experimentalmente, o teor de aditivo superplastificante. Primeiramente foi fixado um valor de aditivo, de 0,50% (considerado teores de sólido e líquido do aditivo) em relação à massa do cimento e uma relação a/c de 0,40. Com esses

valores iniciou-se a mistura intermediária e a partir dos testes realizados no estado fresco determinou-se o teor ideal final de aditivo superplastificante e a relação a/c.

A partir dos valores obtidos determinaram-se os traços finais dos CAA, sem a necessidade de substituições. Segundo o método, o ideal é a realização de quatro pontos para que as equações de comportamento possuam um coeficiente de determinação maior, permitindo que as curvas fiquem melhor ajustadas. Os traços unitários estão ilustrados na Tabela 1.

3.2 Ensaio realizados no estado fresco

No estado fresco as famílias de CAA foram testadas para avaliar as propriedades de fluidez, habilidade passante, resistência à segregação e viscosidade plástica aparente, seguindo as especificações técnicas da ABNT NBR 15823:2010 [4]. Foram realizados os ensaios de espalhamento (SF) e tempo de escoamento (VS), caixa “L” (PL) e funil “V” (VF). Na Figura 5 pode-se verificar os ensaios no estado fresco sendo realizados em laboratório.

Figura 6 – Ensaio realizados no estado endurecido



### 3.3 Ensaios realizados no estado endurecido

Para comparar as propriedades obtidas em cada família de CAA

no estado endurecido, os concretos foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias, módulo de elasticidade aos 91 dias, velocidade de propagação da onda

**Tabela 5 – propriedades químicas, físicas e mecânicas do CP-V-ARI**

Propriedades químicas		Propriedades físicas e mecânicas		
Composição química do cimento	Resultados (%)			
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	18,67	Tempo de pega	Início	02h22min
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4,07		Fim	03h04min
Óxido de cálcio (CaO)	59,90	Massa específica	(g/cm <sup>3</sup> )	3,13
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2,56		1 dia	20,5
Óxido de magnésio (MgO)	5,31	Resistência à compressão (MPa)	3 dias	33,8
Óxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	3,02		7 dias	40,5
Perda ao fogo	3,32		28 dias	48,6
CaO Livre	1,70			
Resíduos insolúveis	0,64			
Equivalente alcalino	0,63			

**Tabela 6 – características dos agregados utilizados nas misturas de CAA**

Abertura das peneiras (mm)	Quantidade Retida Acumulada (%)			
	Brita 01 (25 mm)	Brita 00 (19 mm)	Areia regular	Areia fina
# 25	0	0	0	0
# 19	7	0	0	0
# 12,5	35	16	0	0
# 9,5	70	31	0	0
# 6,3	99	86	0	0
# 4,8	100	100	0	0
# 2,4	100	100	15	0
# 1,2	100	100	32	0
# 0,6	100	100	56	3
# 0,3	100	100	97	17
# 0,15	100	100	9	84
# 0,075	100	100	100	99
Fundo (< 0,075)	100	100	100	100
Módulo de finura	6,77	6,31	2,11	1,04
Dimensão máxima	25 mm	9,5 mm	4,8 mm	0,6 mm
Massa específica	3,07 kg/dm <sup>3</sup>	2,86 kg/dm <sup>3</sup>	2,34 kg/dm <sup>3</sup>	2,33 kg/dm <sup>3</sup>
Massa unitária compactada	1,70 kg/dm <sup>3</sup>	1,50 kg/dm <sup>3</sup>	1,63 kg/dm <sup>3</sup>	1,56 kg/dm <sup>3</sup>
Massa unitária no estado solto	1,62 kg/dm <sup>3</sup>	1,39 kg/dm <sup>3</sup>	1,47 kg/dm <sup>3</sup>	1,50 kg/dm <sup>3</sup>

ultrassônica aos 91 dias e penetração de íons cloretos aos 28 dias. O ensaio de resistência à compressão, realizado de acordo com a ABNT NBR 5739:2007 [9], foi concretizado por ser a propriedade mais comumente utilizada em pesquisas e aplicações reais, e a mais lembrada por projetistas e outros profissionais da área. O ensaio de módulo de elasticidade do CAA, baseado na ABNT NBR 8522:2008 [10], foi realizado por ser uma importante característica que influencia na desforma das peças estruturais e por estar servindo como motivo para a não utilização do CAA por alguns profissionais, pois pode sofrer uma redução considerável no seu valor devido aos materiais empregados na sua composição. A ABNT NBR 8802:1994 [11] especifica a execução do procedimento de velocidade de propagação de ondas de ultrassom, que foi escolhido por ser um ensaio que depende fortemente da compactação das misturas, identificando o empacotamento entre todos os componentes. E a penetração de íons cloretos foi escolhida por ser uma representante da durabilidade, independente da aplicação. Este ensaio foi adaptado da norma ASTM 1202:2007 [12]. A Figura 6 apresenta os ensaios realizados no estado endurecido.

### 3.4 Materiais utilizados

Para a execução do trabalho experimental, foram selecionados materiais disponíveis no estado do Rio Grande do Sul - RS, econômicos e já utilizados pela indústria da construção civil para outros fins. Para determinação das características dos agregados empregados no trabalho experimental, utilizaram-se os procedimentos de acordo com as seguintes normas: as massas específicas dos agregados miúdos (areia regular e areia fina) foram realizadas através da ABNT NBR NM 52:2009 [13], enquanto que a os ensaios de massa específica dos agregados graúdos seguiram a ABNT NBR NM 53:2009 [14]. Já as massas unitárias foram feitas através da ABNT NBR NM 45:2006 [15], e as análises das composições granulométricas foram obtidas seguindo os procedimentos da ABNT NBR NM 248:2003 [16].

#### 3.4.1 Cimento

O cimento utilizado foi o CPV-ARI (cimento Portland de alta resistência inicial). Este cimento foi escolhido por ser o mais usado em indústrias de pré-fabricados, um dos locais em que o CAA pode ser empregado com mais benefícios. Na Tabela 5 apresenta-se as propriedades químicas, físicas e mecânicas.

#### 3.4.2 Agregados

Como agregado graúdo utilizou-se duas composições de britas de basalto. Já como agregado miúdo utilizou-se areia regular, proveniente de rio e para material fino foi escolhido um não pozolânico, a areia fina. Este agregado é também utilizado por algumas empresas locais, principalmente empresas prestadoras de serviço de concretagem, para a composição do CCV e pode ser estocada ao ar livre em baias relativamente simples de se construir, não necessitando grandes recursos na aquisição de um silo, por exemplo. Todos os agregados são disponíveis comercialmente na região sul do Brasil. A Tabela 6 apresenta as características dos agregados.

#### 3.4.3 Aditivo Superplastificante

Para dosar os CAA foi utilizado aditivo superplastificante de terceira geração, baseado em uma cadeia de éter policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, propiciando super plastificação e alta redução água, tornando o concreto com maior trabalhabilidade sem alteração do tempo de pega. As características são apresentadas na Tabela 7.

#### 3.4.4 Água

Foi utilizada para execução dos concretos, água proveniente

Tabela 7 – características do aditivo superplastificante

Dados técnicos		
<b>Função:</b>	Aditivo super plastificante de terceira geração para concreto	
<b>Base Química:</b>	Éter policarboxílico	
<b>Aspecto:</b>	Líquido	
<b>Cor:</b>	Branco turvo	
<b>Ação secundária:</b>	Redutor de água	
Solubilidade em água total		
Não contém cloreto de cálcio, intencionalmente adicionado, ou ingredientes a base de cloreto.		
Teste	Especificação	Unidade
Aparência	Líquido branco turvo	Visual
pH	5 – 7	-
Densidade	1,067 – 1,107	g/cm <sup>3</sup>
Sólidos	38,0 – 42,0	%
Viscosidade	< 150	cps

da rede pública de abastecimento de acordo com a ABNT NBR 15900:2009 [17].

#### 4. Resultados e discussões

Na Tabela 1 apresenta-se os traços obtidos através das atribuições impostas por cada método de dosagem realizado no programa experimental.

Os valores unitários para calcular os custos totais dos CAA, ilustrados na Tabela 1, foram repassados pelos fornecedores no mês de junho de 2011, quando custo unitário básico do Rio Grande do Sul (CUB-RS), para residências unifamiliar (R1-B) estava em R\$868,99 e o dólar paralelo em R\$1,73. O preço encontrado do cimento ARI-RS foi de 0,44 R\$/kg, as areias custavam 0,013 R\$/kg, as britas de basalto valiam 0,022 R\$/kg, o aditivo superplastificante usado estava no valor de 14,50 R\$/kg.

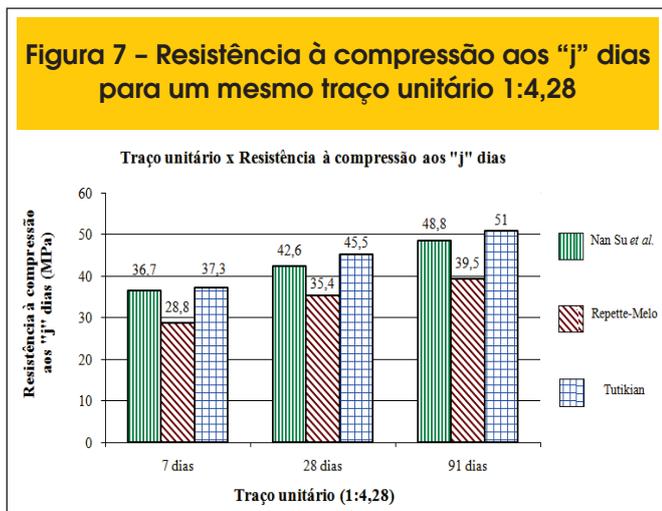
**Tabela 8 – resultados das propriedades no estado fresco**

Método	Traço (1:m)	Espalhamento		T <sub>500mm</sub>		Caixa “L”		Funil “V”	
		Resultado (mm)	Classe NBR 15823	Resultado (s)	Classe NBR 15823	Resultado (h2/h1)	Classe NBR 15823	Resultado (s)	Classe NBR 15823
Nan Su et al.	1:4,28	710	SF2	2	VS1	0,90	PJ1	9	VF2
Repette-Melo	1:3,50	690	SF2	2	VS1	0,90	PJ1	7	VF1
	1:3,97	660	SF2	2	VS1	0,90	PJ1	6	VF1
	1:4,32	610	SF1	1	VS1	0,80	PJ1	5	VF1
Tutikian	1:3	710	SF2	2	VS1	0,90	PJ1	7	VF1
	1:4	690	SF2	2	VS1	0,85	PJ1	6	VF1
	1:5	640	SF1	1	VS1	0,85	PJ1	5	VF1
	1:6	590	SF1	1	VS1	0,80	PJ1	5	VF1

**Tabela 9 – valores para as comparações entre os três métodos do programa experimental**

COMPARAÇÕES ENTRE MÉTODOS Nan Su et al., Repette-Melo e Tutikian & Dal Molin			
Propriedade	Referência	Comparação	Valores de Referência
Resistência à compressão aos 7,28 e 91 dias	Traço unitário	Resistências à compressão atingidas aos 7, 28 e 91 dias para os mesmos traços unitários.	4,28
Custo	Resistência à compressão aos 7 dias	Custo das misturas para uma mesma faixa de resistência à compressão aos 7 dias	36,7 MPa
Custo	Resistência à compressão aos 28 dias	Custo das misturas para uma mesma faixa de resistência à compressão aos 28 dias	42,6 MPa
Custo	Resistência à compressão aos 91 dias	Custo das misturas para uma mesma faixa de resistência à compressão aos 91 dias	48,8 MPa
Módulo de elasticidade	Resistência à compressão aos 91 dias	Módulo de elasticidade para uma mesma faixa de resistência à compressão aos 91 dias	48,8 MPa
Ultrassom	Resistência à compressão aos 91 dias	Ultrassom para uma mesma faixa de resistência à compressão aos 91 dias	48,8 MPa
Penetração de íons cloretos	Resistência à compressão aos 91 dias	Penetração de íons cloretos para uma mesma faixa de resistência à compressão aos 91 dias	48,8 MPa

**Figura 7 – Resistência à compressão aos “j” dias para um mesmo traço unitário 1:4,28**



**4.1 Resultados dos ensaios no estado fresco**

Os resultados dos ensaios realizados para avaliar o comportamento do CAA no estado fresco, estão apresentados na Tabela 8. A partir dos resultados atingidos no estado fresco, concluiu-se que os valores alcançados nos procedimentos realizados, para avaliar a autoadensabilidade do CAA, apresentados na Tabela 8, foram satisfatórios, pois se enquadram nos limites mencionados pela ABNT NBR 15823:2010 [4].

Em cada família realizada, verificou-se que o traço de CAA que proporcionou melhor coesão, fluidez e viscosidade foi o que apresentou maior consumo de cimento, um teor de argamassa mais elevado e consequentemente menor consumo de brita por m³, o que resulta em uma maior liberdade para o concreto fluir.

**4.2 Comparações das propriedades dos concretos no estado endurecido**

Primeiramente serão confrontadas as resistências à compressão obtidas aos 7, 28 e 91 dias para os mesmos traços unitários e após os custos para as misturas, assim como o módulo de elasticidade, a velocidade de propagação da onda de ultrassom e a penetração de íons cloretos, para uma mesma faixa de resistência à compressão.

No método Nan Su et al., 2001 [1] não foi possível realizar as equações de comportamento e o diagrama de dosagem, uma vez que através deste foi determinado apenas um traço. Em vista disso, para que as comparações pudessem ser realizadas, utilizou-se os valores bases resultantes deste método de dosagem. Para os outros dois experimentos, Repette-Melo, 2005 [2] e Tutikian & Dal Molin, 2007 [3], serão buscados o mesmo traço unitário e a resistência à compressão nas equações de comportamento, determinadas de acordo com as propriedades características destes métodos.

Ressalta-se que essa comparação torna-se válida, já que os resultados atingidos em Nan Su et al., 2001 [1] encontram-se entre os limites dos dados estabelecidos nas propriedades do estado endurecido alcançadas nos métodos de Repette-Melo, 2005 [2] e Tutikian & Dal Molin, 2007 [3].

A Tabela 9 mostra os valores fixados para as comparações, no estado endurecido, entre os três experimentos de dosagem. A ida-

de de 91 dias será a padrão para as comparações envolvendo o módulo de elasticidade, velocidade de propagação da onda de ultrassom e penetração de íons cloretos.

**4.2.1 Resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias para o mesmo traço unitário**

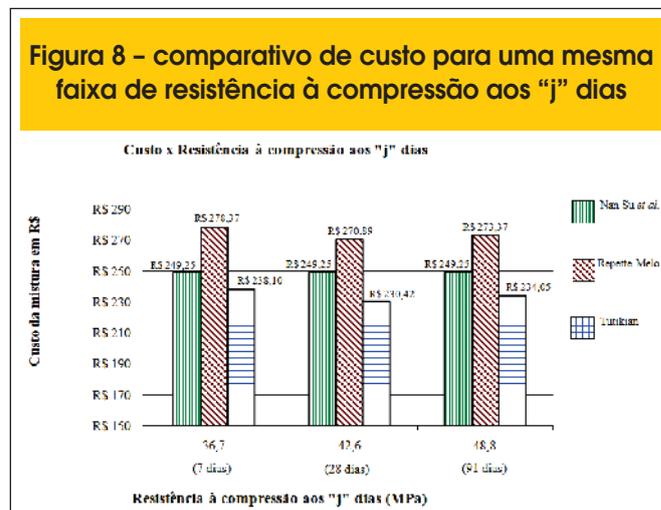
Para esta confrontação foi fixado um traço unitário (1:m) do qual buscou-se, nas equações de comportamento, as resistências à compressão atingidas aos 7, 28 e 91 dias, como é mostrado na Figura 7. Através disto pode-se analisar qual experimento alcançou a maior resistência à compressão, para um mesmo traço unitário (1:4,28). Observando a Figura 7, pode-se concluir que o método Tutikian & Dal Molin, 2007 [3] apresentou resultado de resistência à compressão aos 7 dias superior, em 1,0% do alcançado em Nan Su et al., 2001 [1] e de 29,5% em relação ao atingido em Repette-Melo, 2005 [2]. Constata-se também que aos 28 dias, o método Tutikian & Dal Molin, 2007 [3], novamente, atingiu resultado superior de resistência à compressão em relação aos outros dois métodos, sendo o valor 6,8% mais elevado do que o obtido em Nan Su et al., 2001 [1] e 28,5% mais alto do alcançado em Repette-Melo, 2005 [2]. E por fim, verifica-se a superioridade do método Tutikian & Dal Molin, 2007 [3] no quesito resistência à compressão para um mesmo traço unitário, se comparado aos outros dois métodos. Aos 91 dias este obteve resultado, em percentuais, 4,5% mais elevado do atingido através de Nan Su et al., 2001 [1] e 29,1% maior do alcançado em Repette-Melo, 2005 [2].

**4.2.2 Custo das misturas para uma mesma faixa de resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias**

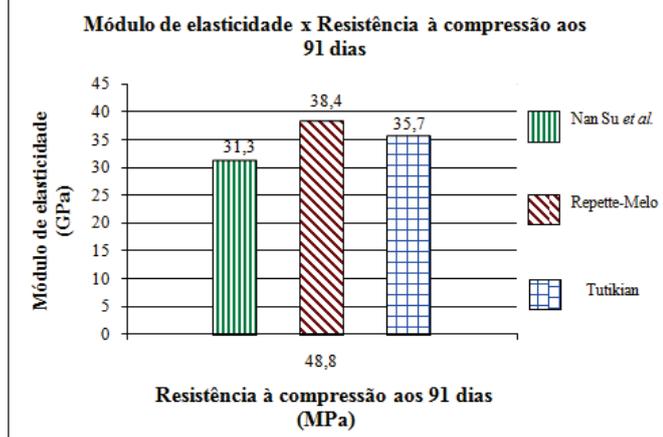
As comparações de custo, fixando-se uma resistência à compressão aos 7 dias, para todos os métodos, estão evidenciadas na Figura 8.

Com base nos dados apresentados na Figura 8, observa-se que o método Tutikian & Dal Molin, 2007 [3] apresentou para uma mesma faixa de resistência à compressão aos 7 dias, custo 4,50% mais baixo se comparado ao valor atingido por Nan Su et al., 2001 [1] e 14,5% menor que o resultado alcançado por Repette-Melo, 2005 [2].

**Figura 8 – comparativo de custo para uma mesma faixa de resistência à compressão aos “j” dias**



**Figura 9 – comparação do módulo de elasticidade para uma mesma faixa de resistência à compressão aos 91 dias para todos os métodos do programa experimental**



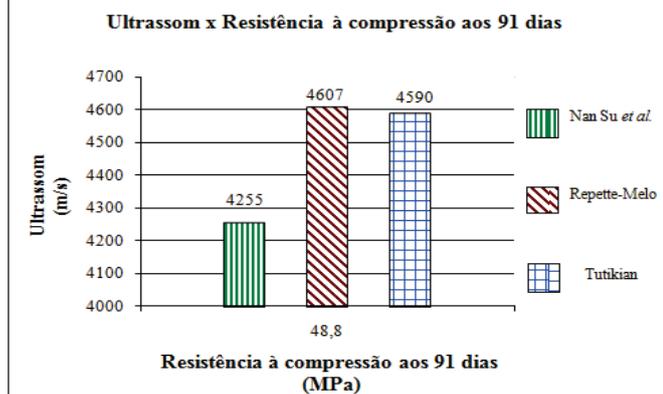
Já para uma mesma faixa de resistência à compressão aos 28 dias avalia-se que o valor obtido através do método proposto por Tutikian & Dal Molin, 2007 [3] obteve um resultado de 7,6% menor do que o encontrado em Nan Su *et al.*, 2001 [1] e 14,9% mais baixo que em Repette-Melo, 2005 [2].

Por fim, constata-se que, para uma mesma resistência à compressão aos 91 dias o método Tutikian & Dal Molin, 2007 [3], novamente obteve um valor 6,1% menor que o preço alcançado em Nan Su *et al.*, 2001 [1] e 14,4% mais baixo do resultado atingido em Repette-Melo, 2005 [2].

Esse comportamento, provavelmente, deve-se ao melhor empacotamento dos materiais promovido pelo método de dosagem e ao menor consumo de aditivo por quantidade de cimento utilizado na mistura. Um melhor empacotamento granulométrico dos agregados faz com que a mistura apresente menores espaços vazios, obtendo assim, uma estrutura mais homogênea.

Nos concretos dosados pelo método Tutikian & Dal Molin foi utili-

**Figura 10 – comparação da velocidade da onda de ultrassom para uma mesma faixa de resistência à compressão aos 91 dias para todos os métodos do programa experimental**



zada uma quantia de aditivo superplastificante em torno de 27% menor do que usado em Nan Su *et al.*, 2001 [1] e aproximadamente 17,3% mais baixo do consumido em Repette-Melo, 2005 [2], favorecendo o comparativo de custo.

#### 4.2.3 Módulo de elasticidade para uma mesma faixa de resistência à compressão aos 91 dias

A análise de desempenho realizada para todos os métodos, relacionando o módulo de elasticidade para uma mesma faixa de resistência à compressão aos 91 dias está apresentada na Figura 9. Conforme os dados apresentados na Figura 9, observa-se que o método Repette-Melo, 2005 [2] apresentou módulo de elasticidade maior, para uma resistência de 48,8 MPa aos 91 dias, sendo este 7,6% superior ao valor atingido em Tutikian & Dal Molin, 2007 [3] e 22,7% mais alto do que o resultado alcançado em Nan Su *et al.*, 2001 [1].

Os maiores resultados alcançados por Repette-Melo (2005) [2] para esta propriedade devem-se, provavelmente, a maior quantidade de agregado graúdo obtida na composição da mistura e ao menor teor de argamassa promovido pelo método de dosagem.

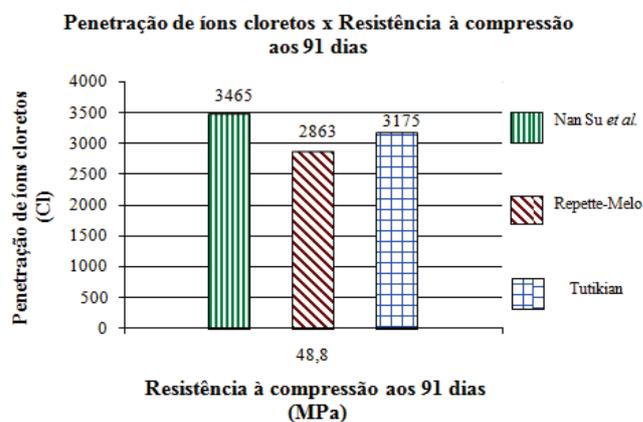
Se comparado os teores de argamassa alcançados por todos os métodos, fixando-se uma resistência à compressão aos 28 dias de 48,8 MPa, na qual foi obtida em Nan Su *et al.*, 2001 [1], pode-se evidenciar que no experimento realizado com os procedimentos de Repette-Melo, 2005 [2] a mistura apresentou um teor de argamassa de 59,9%, já Tutikian & Dal Molin, 2007 [3] 60,6% e Nan Su *et al.*, 2001 [1] um valor de 67,4%.

É importante ressaltar que no método Repette-Melo (2005) [2] foi utilizado um teor de agregado graúdo em relação total de agregados em massa de 50%, contra 48% empregado em Tutikian & Dal Molin, 2007 [3] e 40% usado em Nan Su *et al.*, 2001 [1].

#### 4.2.4 Velocidade de propagação da onda de ultrassom para uma mesma faixa de resistência à compressão aos 91 dias

As medições da velocidade de propagação das ondas de ultrassom nos concretos foram realizadas com os mesmos CP's do en-

**Figura 11 – comparação da penetração de íons cloretos para uma mesma faixa de resistência à compressão aos 91 dias para todos os métodos do programa experimental**



saio do módulo de elasticidade, assim foram definidas as mesmas faixas de resistência à compressão para as comparações, bem como a idade do ensaio aos 91 dias.

A Figura 10 ilustra as confrontações feitas para todos os métodos de dosagem, relacionando a velocidade da onda de ultrassom para uma mesma faixa de resistência aos 91 dias.

Como se pode constatar na Figura 10, o método que apresentou resultado superior foi Repette-Melo (2005) [2]. É importante destacar que a diferença deste para o resultado encontrado no método Tutikian & Dal Molin, 2007 [3] é pequena, sendo de 0,4%. Já a diferença para o valor atingido em Nan Su *et al.*, 2001 [1] foi 8,3% maior. Salienta-se que a diferença entre os valores encontrados por ambos os métodos para avaliar esta propriedade é muito pequena. Com isso pode-se considerar que o método Tutikian & Dal Molin, 2007 [3] e Repette-Melo, 2005 [2] atingiram valores similares de velocidade de propagação da onda ultrassônica.

#### 4.2.5 Penetração de íons cloretos para uma mesma faixa de resistência à compressão aos 91 dias

Por fim, a Figura 11 mostra os valores obtidos para todos os concretos para a penetração dos íons cloretos.

Este ensaio foi realizado aos 28 dias, e, para manter a coerência de comparação entre as propriedades do diagrama de desempenho, foram mantidas as mesmas faixas de resistências à compressão escolhidas para os outros itens.

Com base nos dados apresentados na Figura 11, pode-se concluir que o método Repette-Melo, 2005 [2] apresentou penetração de íons cloretos 9,8% menor que o resultado alcançados por Tutikian & Dal Molin, 2007 [3] e 17,4% mais baixo se comparado ao valor atingido por Nan Su *et al.*, 2001 [1].

A quantidade de água em relação ao consumo de cimento na mistura é um importante fator que influência na porosidade do concreto o que consequentemente também influi diretamente na penetração de íons cloretos. Com isso é importante ressaltar que o método Repette-Melo, 2005 [2] proporcionou uma relação água/cimento de 0,46, contra 0,51 encontrado em Tutikian & Dal Molin, 2007 [3] e 0,50 obtido em Nan Su *et al.*, 2001 [1]. Estes resultados foram alcançados fixando-se a resistência à compressão aos 91 dias em 48,8 MPa, atingida pelo experimento realizado com os procedimentos de Nan Su *et al.*, 2001 [1] e adequando esta as equações de comportamento identificadas pelos métodos Tutikian & Dal Molin, 2007 [3] e Repette-Melo, 2005 [2].

#### 4.3 Aspectos não quantitativos relatados na execução dos métodos de dosagem

Dentre os aspectos não quantitativos, observados durante os procedimentos para a obtenção do CAA, através dos métodos realizados no programa experimental, observou-se que nos procedimentos definidos por Nan Su *et al.*, 2001 [1] o cálculo do consumo de cimento depende exclusivamente da resistência à compressão requerida. No trabalho experimental, para a determinação da proporção de cimento na mistura de CAA, estabeleceu-se que a resistência à compressão aos 28 dias, de acordo com a fórmula, seria 55 MPa, o que resultou em uma quantia de cimento correspondente a resistência adotada. No entanto, pode-se verificar que este processo não funcionou corretamente, pois para este método atingiu-se como resistência à compressão aos 28 dias o

resultado de 44,8 MPa, 18,5% menor do que o valor definido na fórmula empírica proposta. Sabe-se que existem diversos tipos de cimento, de agregados, de aglomerantes e de aditivos que influem na resistência final, e se for pretendido estabelecer uma equação universal para o cálculo do consumo de cimento, certamente todas estas variáveis deveriam ser incluídas.

Para a definição da quantidade de aditivo, um importante fator na composição de custo das mistura do CAA, o método Repette-Melo, 2005 [2], determina um proporcionamento primeiramente na fase da pasta, um segundo passo na argamassa e por fim deve ser feito o ajuste no concreto. Esses estudos iniciais, a fim de obter o máximo desempenho do aditivo na mistura, acabaram por gerar um procedimento mais lento e trabalhoso para a dosagem do concreto. Verificou-se, através dos outros métodos que estes experimentos pouco afetam a quantidade do aditivo. Em Tutikian & Dal Molin, 2007 [3], por exemplo, que não utiliza estes processos para alcançar o consumo de superplastificante, obteve-se um percentual menor em 21% deste material na mistura, se comparado ao atingido pelo método Repette-Melo, 2005 [2]. Com isso, pode-se estabelecer que o conteúdo ideal e ótimo de aditivo depende da interação de todos os elementos do traço, ou seja, cimento, adições, areia e brita, e isso só é possível na fase do concreto.

O método Repette-Melo, 2005 [2] para determinar o percentual de agregado graúdo propõe utilizar valores de 27% a 33% em relação ao volume total de concreto. Um procedimento um tanto empírico, uma vez que inicialmente o responsável pela dosagem terá 7 alternativas para a escolha do volume de agregado graúdo na mistura, o que gerou dúvida para a escolha, assim como ocorrido em Nan Su *et al.*, 2001 [1] e adotou-se a percentagem intermediária.

## 5. Considerações finais

Neste trabalho, compararam-se tecnicamente e economicamente as características de três métodos de dosagem para a execução de CAA, com os mesmos materiais. Em vista dos objetivos propostos, após a realização da parte laboratorial, pode-se concluir que:

- A partir deste estudo, verificou-se que, para dosar CAA com os agregados coletados na região sul do Brasil, o método que apresentou menor custo e maiores resistências à compressão nas idades de 7, 28 e 91 dias, foi o de Tutikian & Dal Molin, 2007 [3] e o que atingiu menor penetração de cloretos e maior compacidade e módulo de elasticidade foi o de Repette-Melo, 2005 [2]. Nos ensaios realizados no estado fresco, todos os métodos experimentados, obtiveram misturas que se enquadraram na classe de autoadensabilidade requerida;
- Porém, ressalta-se que nas comparações realizadas entre os métodos Repette-Melo, 2005 [2] e Tutikian & Dal Molin, 2007 [3], as características que envolvem a propagação da velocidade de ultrassom atingiram valores muito próximos. Ou seja, os resultados podem ser considerados idênticos, devido ao número de CP's analisados;
- Quanto à verificação da trabalhabilidade, observa-se que os valores atingidos para cada método de dosagem ensaiado podem ser ajustados, desde que se utilize maior proporção de aditivo superplastificante. Neste trabalho isto não foi realizado, pois se fixou a quantia para atingir os valores da classe de autoadensabilidade fixada.

Estas considerações servem apenas para os concretos dosados neste trabalho com os materiais da região sul do Brasil determi-

nada conforme as proporções apresentadas. Ressalta-se que as propriedades mecânicas podem sofrer alterações se utilizados outros materiais e ou quantidade superiores ou inferiores de aditivo, por exemplo. Os critérios e aspectos de comparação sugeridos podem ser instrumentos úteis quando se trata de selecionar, dentre vários métodos, com as mesmas potencialidades de respostas, aquele mais adaptado à realidade e/ou necessidades específicas de aplicação.

## 6. Referências bibliográficas

- [01] SU, N.; HSU, K.C.; CHAI, H.W. A simple mix design method for self-compacting concrete. In: *Cement and Concrete Research*, n. 31, p. 1799-1807, 2001.
- [02] MELO, K. A. Proposição de método de dosagem de concreto autoadensável com adição de fíler calcáreo. Dissertação de mestrado, UFSC, 2005.
- [03] TUTIKIAN, B. F. Proposição de um método de dosagem experimental para concretos autoadensáveis. Dissertação de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- [04] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823: Concreto autoadensável. Rio de Janeiro, 2010.
- [05] GRÜNEWALD, S. Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete. Doctoral Thesis. Delft University of Technology, The Netherlands, 2004. 232p.
- [06] SONEBI, M. Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans. *Cement and Concrete research*, 2004.
- [07] REVISTA TÉCNICA. Artigo76078: Solução Fluída. Editora: Pini nº 132. São Paulo, 2008.
- [08] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto, Rio de Janeiro, 2007.
- [09] \_\_\_\_\_. NBR 5739: concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.
- [10] \_\_\_\_\_. NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.
- [11] \_\_\_\_\_. NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.
- [12] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C1202. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. ASTM 1202/2007.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- [14] \_\_\_\_\_. NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
- [15] \_\_\_\_\_. NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- [16] \_\_\_\_\_. NBR NM 248: agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- [17] \_\_\_\_\_. NBR 15900: Água para amassamento. Rio de Janeiro, 2009.