

## Comparative assessment of self-compacting concretes (SCC) with fly ash and fine

## *Comparativo das propriedades do concreto auto-adensável (CAA) utilizando areia fina e cinza volante*



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

**D. DAL MOLIN**<sup>b</sup>  
dmolin@ufrgs.br

### Abstract

This paper aims to contribute to decisions concerning the use of fine materials, responsible for the segregation resistance of self-compacting concrete (SCC). In this study, samples of SCC were prepared with fly ash, a pozzolanic waste, and fine sand that is a non-pozzolanic material, using the dosage method proposed by Tutikian-Dal Molin (2007) [1]. It was observed that the utilization of fly ash increased the resistance to compressive strength, mainly in more advanced ages, as well as the values of the elastic modulus and the propagation speed of ultra-sound waves. It has also decreased the penetration of chloride ions to the same strength values, where it was also observed that the final cost of the fly ash SCC was lower than the fine sand SCC for similar strength levels. Both dosage and performance diagrams were shown.

**Keywords:** self-compacting concrete (SCC), fly ash, fine sand, design method, performance diagram.

### Resumo

O objetivo deste artigo é contribuir para a tomada de decisão sobre a definição do uso de materiais finos responsáveis pela resistência à segregação do concreto auto-adensável (CAA). Neste estudo, amostras de CAA foram dosadas com cinza volante, um material pozzolânico, e areia fina, que é um material não pozzolânico, utilizando o método de dosagem proposto por Tutikian & Dal Molin (2007) [1]. Foi observado que a utilização de cinza volante aumentou a resistência à compressão, principalmente nas idades mais avançadas, assim como os valores de módulo de deformação e velocidade das ondas de ultra-som. Também diminuiu a penetração de íons cloretos, para os mesmos valores de resistência em comparação com os CAA com areia fina e o custo final dos CAA com cinza volante foi inferior. Foram apresentados tanto os diagramas de dosagem como os de desempenho.

**Palavras-chave:** concreto auto-adensável (CAA), cinza volante, areia fina, método de dosagem, diagrama de desempenho.

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

<sup>b</sup> NORIE, PPGEC, UFRGS, dmolin@ufrgs.br – Av. Osvaldo Aranha, 99, 3º Andar, Centro – Porto Alegre / RS, Brasil.

## 1. Introdução

Apesar de o concreto ser o material de construção mais utilizado no mundo, atualmente não se pode mais considerar apenas o estudo do concreto convencional (CCV). O mercado e as técnicas construtivas exigem concretos que apresentem características especiais. Helene (2005) [2] cita os de alta resistência, de alto desempenho, auto-adensáveis, com altos teores de adições e pozolanas, aparentes, coloridos, brancos, sustentáveis, entre outros. Com essa tendência, foi desenvolvido, no Japão, em 1988, um concreto capaz de se mover por conta própria e preencher, sem necessidade nenhuma de intervenção, os espaços destinados a ele na fôrma: o concreto auto-adensável (CAA) (REPETTE, 2005) [3]. O CAA é claramente uma das áreas da tecnologia do concreto que tem o maior potencial de desenvolvimento (PETERSEN e REKNES, 2005) [4].

As duas propriedades mais importantes do CAA são a trabalhabilidade e a estabilidade, as quais dependem de um proporcionamento adequado entre todos os componentes do CAA, dentre eles os materiais finos, responsáveis pela estabilidade da mistura. Este artigo objetiva contribuir para a tomada de decisão sobre a definição do uso de materiais finos responsáveis pela resistência à segregação do CAA, utilizando o método de dosagem proposto por Tutikian-Dal Molin (2007) [1]. Para a escolha entre as opções oferecidas pelo mercado, deve-se analisar as características dos materiais, como o custo de cada componente, a disponibilidade em quantidade e distâncias aceitáveis, a possibilidade de reagirem quimicamente com a água ou produtos de hidratação do cimento e, se ainda houver mais de uma opção para um dado item, é aconselhável que se privilegie aqueles com que o responsável pela dosagem já tenha trabalhado. Ainda deve-se ter em conta que, atualmente, há boas opções de finos, e muitas, inclusive, são resíduos de indústrias, que, se não utilizados no concreto terão de ser dispostos seguindo as rígidas legislações ambientais. Então, foi realizado, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), um trabalho experimental com dois componentes finos altamente usados localmente. Foram moldadas duas famílias de CAA, sendo uma com cinza volante e outra com areia fina, representando um fino pozolânico e outro não-pozolânico.

## 2. Programa experimental

Conforme a tabela 1, foram moldados 2 corpos-de-prova cilíndricos (10 x 20 centímetros) para realizar os ensaios de resistência

à compressão aos 1, 7, 28 e 91 dias, bem como 3 CP's para o módulo de elasticidade e para medir a velocidade de propagação da onda ultra sônica, mais 2 CP's para ensaiar os concretos com a penetração de íons cloretos, totalizando 13 CP's por traço.

Para todas as famílias foram determinadas as equações das linhas de tendência, junto com o coeficiente de determinação. Com isso, pode-se desenhar os diagramas de dosagem, representando as resistências à compressão, relação água/cimento, proporção da massa dos agregados secos em relação à massa do cimento e consumo de cimento por metro cúbico de concreto; e os diagramas de desempenho, representando a resistência à compressão aos 28 dias, o módulo de elasticidade, a penetração dos íons cloretos e a velocidade da onda ultra-sônica. Após, através das equações de comportamento, se calcularam, para diversos valores de resistência à compressão, todos os parâmetros já mencionados, acrescidos do custo, para, então, comparar todas as famílias de concreto.

## 3. Materiais constituintes

O método de dosagem Tutikian-Dal Molin (2007) [1], utilizado nesse trabalho, permite o proporcionamento do concreto com quaisquer materiais disponíveis, desde que cumpram alguns requisitos básicos. Para a execução deste trabalho experimental, foram selecionados materiais abundantes localmente, econômicos e já utilizados pela indústria da construção civil para outros fins. Logo, os concretos aqui realizados poderão ser reproduzidos e testados no futuro. O cimento utilizado foi o CPV – RS (cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos). Este cimento foi escolhido por ser adquirido na região e por ser o mais usado em indústrias de pré-moldados, um dos locais em que o CAA pode ser empregado com maiores benefícios.

Dentre as opções para materiais finos, foram escolhidos um não pozolânico, a areia fina, e um pozolânico, a cinza volante. Ambos são disponíveis comercialmente e econômicos. A areia fina é um agregado já utilizado por algumas empresas locais, principalmente concreteiras, para a composição do CCV e pode ser estocada ao ar livre em baias relativamente simples de se construir, não necessitando vultuosos recursos na aquisição de um silo, por exemplo. A cinza volante é um sub-produto da indústria de carvão e já é largamente utilizada pela indústria do cimento, podendo, inclusive, substituir parcialmente o clínquer. A cinza volante é um material pozolânico, logo reage quimicamente com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), componente da hidratação do cimento. O  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  é

Tabela 1 - Corpos-de-prova ensaiados

Ensaio realizado	Norma de ensaio	Idades ensaiadas	Número de CP's/por idade
Resistência à compressão	NBR 5739/94	1, 7, 28 e 91 dias	2
Módulo de elasticidade	ASTM 469/94	28 dias	3
Propagação de ondas de ultra-som	-	28 dias	3 (mesmo dos de módulo)
Penetração de íons cloretos	ASTM 1202/97	56 dias	2

**Tabela 2 – Análises granulométricas**

Diâmetro (%)	Cimento (m <sub>μ</sub> )	Cinza volante (m <sub>μ</sub> )
Até 10%	1,16	5,22
Até 50%	9,15	39,91
Até 90%	25,41	128,15
Médio	11,61	56,54

um cristal frágil, lixiviável e que não contribui na resistência à compressão do concreto. Por isso, considera-se como um benefício o fato de este composto ser consumido pela cinza volante, apesar de provocar uma ligeira queda do pH da mistura, o que pode contribuir para aumentar a velocidade de carbonatação do concreto, podendo despassivar mais facilmente as armaduras.

**Tabela 3 – Fluorescências por Raio X**

Elemento	Cimento (%)	Cinza volante (%)
CaO	65,71	3,02
SiO <sub>2</sub>	17,15	65,92
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,93	7,54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,54	18,71
SO <sub>3</sub>	3,88	0,25
MgO	1,44	0,29
K <sub>2</sub> O	1,33	2,88
TiO <sub>2</sub>	0,58	1,35
SrO	0,27	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,12	0,05
MnO	0,05	-

**Tabela 4 – Massas específicas e unitárias dos materiais utilizados**

	Cimento	Cinza volante	Areia fina	Areia regular	Agregado graúdo 9,5 mm	Agregado graúdo 19 mm
Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,92	1,92	2,65	2,64	2,82	2,82
Massa Unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	-	-	1,57	1,53	1,50	1,42

**Tabela 5 – Análises granulométricas dos agregados utilizados**

Aberturas das peneiras (mm)	Areia fina	Areia regular	Agregado graúdo 9,5 mm	Agregado graúdo 19 mm
# 19	0	0	0	1
# 12,5	0	0	0	44
# 9,5	0	0	1	81
# 6,3	0	0	53	96
# 4,75	0	3	87	99
# 2,36	0	12	99	100
# 1,18	0	29	100	100
# 600 m <sub>μ</sub>	0	54	100	100
# 300 m <sub>μ</sub>	16	87	100	100
# 150 m <sub>μ</sub>	93	98	100	100
Módulo de Finura	1,09	2,83	5,87	6,81
Dimensão Máxima	0,6 mm	4,75 mm	9,5 mm	19 mm

Tabela 6 – Traços unitários dos CAA com areia fina

Família	Traço					a/c	H (%)	Adt (%)	$\alpha$ (%)
	c	af	ar	b9	b19				
3	1	0,60	0,96	0,79	0,65	0,36	9,10	0,47	64,00
4	1	0,80	1,28	1,06	0,86	0,42	8,44	0,47	61,60
5	1	1,00	1,60	1,32	1,08	0,53	8,92	0,47	60,00
6	1	1,20	1,92	1,58	1,30	0,71	10,19	0,47	58,86
7	1	1,40	2,24	1,85	1,51	0,77	9,61	0,47	58,00

Legenda: c – cimento; af – areia fina; ar – areia regular; b9 – brita 9,5 mm; b19 – brita 19 mm; H – teor de umidade; adt – aditivo;  $\alpha$  teor de argamassa.

Tabela 7 – Consumos de materiais calculados para os CAA com areia fina

Família	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Areia fina (kg/m <sup>3</sup> )	Areia regular (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 9,5 mm (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 19 mm (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (kg/m <sup>3</sup> )
3	2381	546	327	524	431	355	199	2,57
4	2367	437	349	559	463	375	184	2,05
5	2354	360	360	576	475	389	193	1,69
6	2342	304	364	583	480	395	216	1,43
7	2338	267	373	597	493	403	205	1,25

O agregado graúdo escolhido foi a brita de basalto, também disponível comercialmente na região e comprovadamente eficiente na sua função. Já a areia de rio foi utilizada como agregado miúdo e a água foi captada diretamente na rede pública de abastecimento. Por fim, foi usado um aditivo superplastificante de terceira geração à base de policarboxilatos, com um teor de sólidos de 40%. Esse aditivo deve reduzir a água de amassamento em cerca de 20%. Porém, no caso de CAA, o aditivo é utilizado para aumentar a trabalhabilidade do concreto, mantendo a mesma relação a/c.

A tabela 2 ilustra as análises granulométricas do cimento e da cinza volante, enquanto que as fluorescências por raio X podem ser observadas na tabela 3, ensaios realizados no LACER (laboratório de cerâmica) da UFRGS.

A tabela 4 ilustra as massas específicas e unitárias dos materiais utilizados, enquanto a tabela 5 mostra as granulometrias dos agregados. As massas específicas do cimento e da cinza volante foram determinadas de acordo com a NBR NM 23/01 [5], as massas específicas dos agregados miúdos (areia regular e areia fina) foram realizadas através da NBR NM 52/03 [6], enquanto a NBR NM 53/03 [7] normalizou o ensaio de massa

específica dos agregados graúdos. Já as massas unitárias foram feitas através da NBR 7251/82 [8] e as análises granulométricas foram obtidas seguindo o procedimento da NBR NM 248/03 [9].

#### 4. Dosagem dos CAA

A dosagem dos CAA seguiu um passo-a-passo, de acordo com o método citado. A partir das proporções determinadas dos agregados, realizados através do empacotamento desses de dois em dois, pode-se calcular os traços unitários dos concretos e simplesmente misturá-los na betoneira para a determinação da relação água/cimento, do teor de aditivo superplastificante e para moldar os CP's para os ensaios futuros.

Os traços unitários do CAA com areia fina estão na tabela 6, enquanto os consumos de materiais estão na tabela 7. Observa-se que foi necessária a mistura de cinco pontos, para que se obtivesse a faixa de valores de 25 MPa a 50 MPa para a resistência à compressão aos 28 dias (fck entre 20 e 45 MPa). Os cálculos dos consumos dos componentes deste concreto foram realizados baseados na massa espe-

Tabela 8 – Propriedades dos CAA com areia fina no estado fresco

Família	slump flow (mm)	Funil V (s)	Caixa L (l <sub>2</sub> /l <sub>1</sub> )
3	680	9	0,90
4	690	9	0,95
5	680	10	0,90
6	660	11	0,90
7	670	10	1,00

Tabela 9 – Traços unitários do CAA com cinza volante

Família	Traço					a/c	H (%)	Adt (%)	$\alpha$ (%)
	c	cv	ar	b9	b19				
3	1	0,30	1,08	0,89	0,73	0,38	9,45	0,46	59,50
4	1	0,40	1,44	1,19	0,97	0,43	8,62	0,46	56,80
5	1	0,50	1,80	1,49	1,22	0,51	8,50	0,46	54,91
6	1	0,60	2,16	1,78	1,46	0,60	8,57	0,46	53,71
7	1	0,70	2,52	2,08	1,70	0,66	8,21	0,46	52,75
8	1	0,80	2,88	2,38	1,94	0,72	7,97	0,46	52,00

Legenda: c – cimento; cv – cinza volante; ar – areia regular; b9 – brita 9,5 mm; b19 – brita 19 mm; H – teor de umidade; adt – aditivo;  $\alpha$  – teor de argamassa.

Tabela 10 – Consumos de materiais calculados para os CAA com cinza volante

Família	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Cinza volante (kg/m <sup>3</sup> )	Areia regular (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 9,5 mm (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 19 mm (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (kg/m <sup>3</sup> )
3	2343	535	161	578	476	391	202	2,46
4	2333	430	172	619	511	417	185	1,98
5	2330	358	179	644	533	437	183	1,65
6	2323	306	183	660	544	446	183	1,41
7	2304	266	186	671	554	452	175	1,22
8	2301	237	189	682	564	459	170	1,09

cífica no estado fresco. Observa-se que o teor de argamassa seca variou de 58,0% até 64,0%, porém estes traços podem ser considerados da mesma família e, conseqüentemente, plotados na mesma curva de dosagem por manterem as proporções entre os agregados fixas. O teor de aditivo superplastificante, que deve ser constante para todos os traços, foi mantido em 0,47%, para conservar a possibilidade de os CAA serem viáveis economicamente. Os teores de argamassa seca elevados podem ser um indicativo de módulos de elasticidade baixos. Mas este fato será analisado na apresentação dos resultados.

Na tabela 8 estão as propriedades dos concretos no estado fresco. Os ensaios escolhidos foram o slump flow, o funil V e a caixa L., para caracterizarem os CAA. Observa-se que todos os valores estão dentro dos parâmetros estabelecidos por Tutikian (2004) [10] e a NBR 15823 [11].

O mesmo empacotamento anterior foi realizado para a mistura com cinza volante, ao invés da areia fina. Com os valores pode-se calcular todos os traços desta família de CAA.

Também para os CAA com cinza volante, a massa específica determinada no estado fresco foi a base para os cálculos dos consumos dos materiais, representados na tabela 9. Já na tabela 10 estão os traços unitários. Para esta família de concretos foi necessária a dosagem de seis traços, para a determinação das curvas de dosagem e desempenho. O teor de aditivo superplastificante

ficou bastante próximo dos utilizados nos CAA com areia fina, em 0,46%, enquanto o teor de argamassa seca foi o menor, variando entre 52% e 59,5%, devido ao teor de cinza volante ser levemente elevado em relação aos agregados totais, se comparado com os da outra família. A relação a/c e o teor de umidade se mantiveram na faixa esperada, com exceção do traço 1:8, o que indica que o concreto ficou mais seco que os demais, como pode ser observado na tabela 11, a qual expressa os resultados dos ensaios de trabalhabilidade para a família de CAA com cinza volante.

Tabela 11 – Propriedades dos CAA com cinza volante no estado fresco

Família	slump flow (mm)	Funil V (s)	Caixa L (I <sub>2</sub> /I <sub>1</sub> )
3	750	7	1,00
4	730	6	1,00
5	710	8	0,95
6	700	8	0,90
7	710	9	0,95
8	700	9	0,85

Tabela 12 – Resultados das propriedades no estado endurecido para os CAA com areia fina

Traço 1:m	a/c	Resistência à compressão (MPa)				Ec (GPa)	US (m/s)	CI (C)
		1 dia	7 dias	28 dias	91 dias			
1:3	0,36	43,1	63,9	73,3	95,0	40,6	4910	2825
		42,8	64,5	70,5	93,2	40,6	4860	3066
		-	-	-	-	40,0	4900	-
1:4	0,42	31,9	52,8	60,2	89,9	37,4	4897	3321
		33,1	53,0	59,5	94,2	38,3	4872	3054
		-	-	-	-	36,8	4835	-
1:5	0,53	21,7	40,1	44,7	69,5	35,9	4762	4091
		20,7	39,8	46,9	76,8	32,6	4774	3825
		-	-	-	-	34,6	4774	-
1:6	0,71	14,0	29,7	35,8	61,6	30,3	4680	4590
		15,9	28,2	36,9	57,4	28,5	4657	4617
		-	-	-	-	30,0	4668	-
1:7	0,77	10,6	24,1	27,3	42,7	24,1	4429	5451
		10,4	23,8	28,4	40,0	22,7	4424	5751
		-	-	-	-	20,9	4429	-

Legenda: Ec – módulo de elasticidade; US – propagação das ondas ultra-sônicas; CI – penetração de íons cloretos.

Na tabela 11 estão as propriedades dos concretos no estado fresco. Para caracterizar os CAA com cinza volante no estado fresco foram escolhidos o slump flow, o funil V e a caixa L. Observa-se que todos os valores estão dentro dos parâmetros estabelecidos por Tutikian (2004) [10] e a NBR 15823 [11].

## 5. Resultados

Observa-se na tabela 12 os resultados no estado endurecido para a família de CAA com areia fina. Um fato interessante ocorrido, foi o crescimento da resistência à compressão entre as idades de 28 para 91 dias, com alguns pontos apresentando valores mais de 60% superiores, com a média de 53%, fato que, normalmente não ocorre de forma tão incisiva para concretos sem pozolanas, apesar de o cimento utilizado, o CPV RS, possuir cerca de 15% de cinza volante em sua composição. Os valores de módulo de elasticidade e velocidade de propagação de ondas de ultra-som foram crescendo à medida que os traços ficavam mais ricos e abrangeram toda a faixa esperada, acompanhando a resistência à compressão, como esperado. E a penetração dos íons cloretos foi elevada para essa família, sendo que foi moderada para os dois traços mais ricos e alta para os traços 1:5, 1:6 e 1:7, de acordo com a classificação proposta pela ASTM 1202/97 [12]

A seguir, a tabela 13 ilustra as equações de comportamento e os coeficientes de correção para a família de CAA com areia fina. Pode-se representar, na figura 1, o diagrama de dosagem para a família de CAA com areia fina, determinado através das equações de comportamento da tabela 13. Esse gráfico representa as resistências à compressão, em várias idades, o traço unitário 1:m, o cus-

to e o consumo de cimento e o teor de argamassa, que é variável para o método utilizado. O diagrama deve ser utilizado apenas para aproximações, pois para cálculos precisos usam-se as equações de comportamento. Nota-se que a curva de custo serve, somente, para as próprias determinações, não podendo ser utilizada como passagem para o teor de argamassa. O gráfico deve sempre ser utilizado no sentido horário a partir da resistência à compressão ou no sentido anti-horário, a partir do teor de argamassa.

Com a figura 1, pode-se obter, aproximadamente, o traço para qualquer mistura que se queira, a partir de um requisito inicial, como por exemplo, a resistência à compressão. Com isso, permite-se agilizar o processo de dosagem e ter uma visão ampla de todo o comportamento da família, dentro da faixa de valores estudada. Observa-se na figura 1 o grande crescimento, já relatado, da resistência à compressão dos 28 aos 91 dias, assim como do 1 aos 7 dias. Também observa-se que a inclinação da curva do custo não acompanha a do consumo de cimento, ou seja, não há um aumento dos valores proporcional à medida que aumenta o consumo de cimento, quando a mistura fica mais rica. O quadro situado na parte inferior da figura 1 determina a proporção que deve ser utilizada entre os agregados, areia fina (af), areia regular (ar), brita 9,5mm (b9,5) e a brita 19mm (b19), para qualquer ponto dentro da faixa estudada.

E, por fim, a figura 2 representa o diagrama de desempenho para essa mesma família, o qual representa as relações entre a resistência à compressão com o módulo de elasticidade, este com a velocidade de propagação de ondas de ultra-som e esta com a penetração de íons cloretos. Logicamente o diagrama deve ser utilizado no sentido horário e para aproximações.

Por fim, são apresentados os resultados das propriedades no estado endurecido para a família dos CAA com cinza volante, conforme a tabela 14. Como já ocorreu anteriormente, foram utilizados os maiores valores das resistências à compressão, módulo de elasticidade e velocidade de propagação das ondas de ultra-som e os menores valores para a penetração de íons cloretos.

Os valores de resistência à compressão foram elevados, se comparados com o da família anterior, chegando, nos dois traços mais ricos, a 80 MPa aos 28 dias. Esses altos resultados foram ocasionados, provavelmente, devido ao método proposto considerar a cinza volante como um agregado e pelo empacotamento mais eficaz, algo benéfico para quem escolhe pozolanas como material fino.

Outro fato interessante é o pequeno crescimento de resistência à compressão dos 28 para os 91 dias. Como se utilizou a cinza volante, pozolana que reage em longas idades (mais de 28 dias), era de se esperar por um maior crescimento, o que não ocorreu.

Os resultados do módulo de elasticidade e da velocidade de propagação das ondas de ultra-som aumentaram junto com a resistência à compressão, mesmo que essas misturas apresentassem

um teor de argamassa mais elevado, o que poderia prejudicar, principalmente o módulo. Observa-se que o ensaio de velocidade de propagação das ondas de ultra-som apresentou uma alta variabilidade, se comparado com os outros ensaios. Esse fato não foi novidade, já que nesse ensaio normalmente ocorre isso. E, assim como para a outra família, o comportamento do módulo de elasticidade foi exponencial em relação a resistência à compressão e a equação linear se repetiu para as outras duas propriedades do diagrama de desempenho.

A penetração de íons cloretos foi baixa, sendo todos os traços considerados de penetração baixa, segundo a norma ASTM 1202/97 [12].

A seguir, na tabela 15, são apresentadas as equações de comportamento e os coeficientes de correlação para todas as propriedades dos CAA com cinza volante.

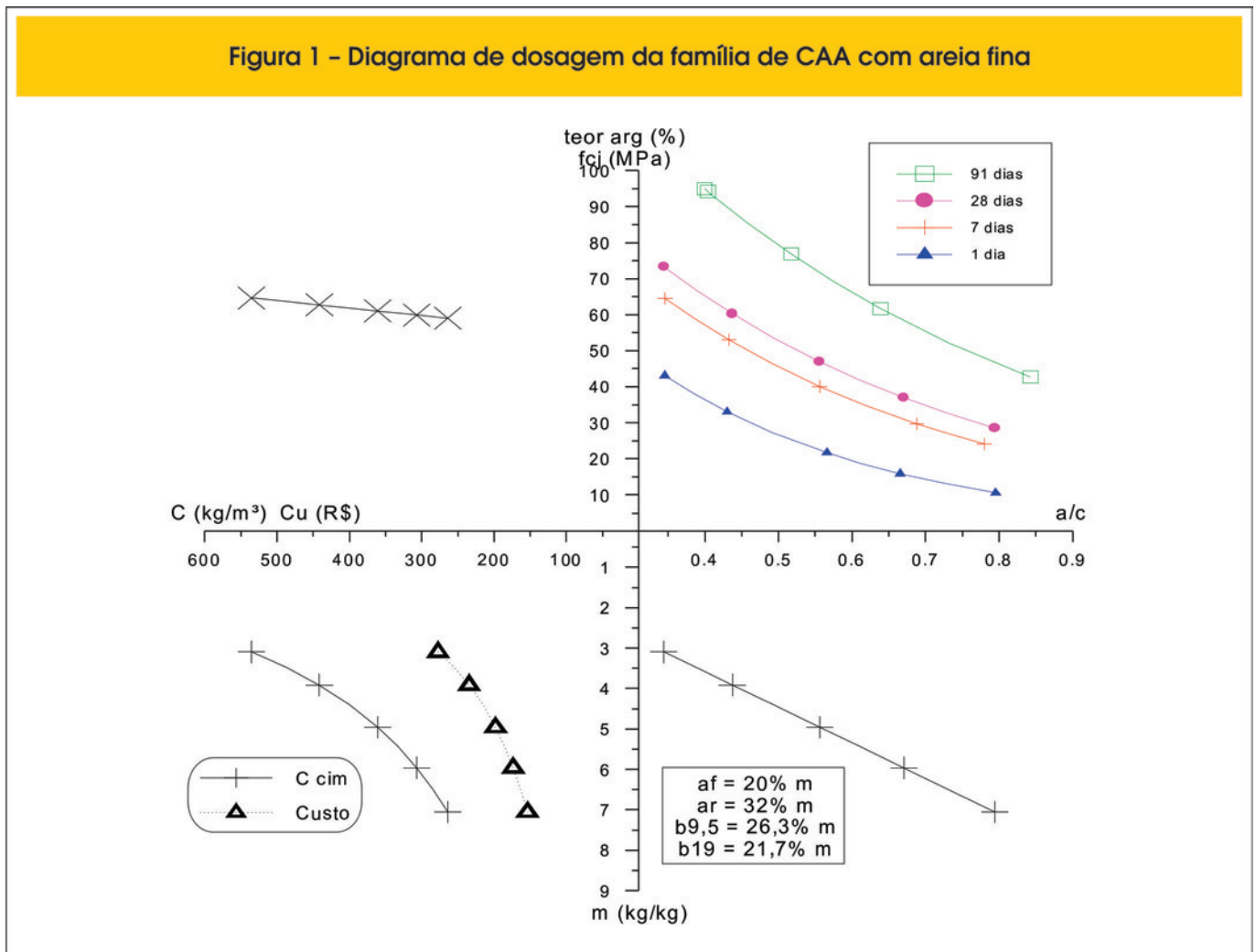
Observa-se, nos coeficientes de correlação, que todos foram superiores a 0,94, aumentando o grau de confiabilidade das equações de comportamento e, conseqüentemente, dos cálculos posteriores.

Tabela 13 – Equações de comportamento e r2 para os CAA com areia fina

Propriedade	Equação de comportamento	R <sup>2</sup>
Resistência à compressão (Lei de Abrams)	1 dia $f_{cj1d} = \frac{126,71}{22,67^{a/c}}$	0,97
	7 dias $f_{cj7d} = \frac{141,22}{9,64^{a/c}}$	0,99
	28 dias $f_{cj28d} = \frac{151,22}{8,20^{a/c}}$	0,97
	91 dias $f_{cj91d} = \frac{195,704}{6,10^{a/c}}$	0,91
Traço unitário 1:m (lei de Lyse)	$m = 8,7958 * a / c + 0,0691$	0,97
Consumo de cimento por m <sup>3</sup>	$C = \frac{2066}{m + 0,7615}$	1,00
Custo	$Cu = C * (0,467 + 0,0164 * m)$	1,00
Teor de argamassa seca	$\alpha = 0,0214 * C + 53,324$	1,00
Módulo de elasticidade	$Ec = \frac{\log(f_{cj28d}) - 0,8463}{0,0243}$	0,96
Propagação da onda de ultra-som	$US = 29,245 * Ec + 3748,5$	0,97
Penetração de íons cloretos	$Cl = -\frac{(US - 5493,9)}{0,1813}$	0,99

Legenda: fcj1d - resistência à compressão característica a 1 dia; fcj7d - resistência à compressão característica aos 7 dias; fcj28d - resistência à compressão característica aos 28 dias; fcj91d - resistência à compressão característica aos 91 dias; Ec - módulo de elasticidade; US - propagação das ondas ultra-sônicas; Cl - penetração de íons cloretos.

Figura 1 - Diagrama de dosagem da família de CAA com areia fina



Na figura 3 consta o gráfico de dosagem para essa família de CAA, lembrando que este gráfico correlaciona resistência à compressão em várias idades com a relação  $a/c$ , com o traço unitário 1:m, com o custo e com o consumo de cimento e com o teor de argamassa variável. O gráfico deve sempre ser utilizado no sentido horário a partir da resistência à compressão ou no sentido anti-horário, a partir do teor de argamassa. A curva de custo não pode ser utilizada como passagem para o teor de argamassa. O eixo 'y' positivo representa, ao mesmo tempo, a resistência à compressão e o teor de argamassa, enquanto que o eixo 'x' negativo é dividido entre o consumo de cimento e o custo.

Observa-se no gráfico de dosagem que o crescimento da resistência à compressão mais expressivo foi entre 1 e 7 dias, porém com um aumento similar entre as outras idades, chegando a valores altos aos 28 e 91 dias. Nota-se o teor de argamassa variável, novidade do método proposto, e a curva de custo, facilitando sua determinação para qualquer ponto do diagrama. Outra facilidade para futuras dosagens é a representação, no segundo quadrante, dos percentuais dos agregados, em relação ao total 'm'.

Na figura 4 está o diagrama de desempenho para a família de CAA com cinza volante. Estas curvas correlacionam a resistência à compressão, com o módulo de deformação, com a velocidade

de propagação de onda de ultra-som e com a penetração de íons cloretos. Deve ser utilizado no sentido horário.

## 6. Comparativos

Nesse item serão comparados os custos e as propriedades das duas famílias de concreto para as mesmas resistências à compressão, a uma determinada idade. Serão utilizadas as idades de 1, 7, 28 e 91 dias, e comparados os custos para estas misturas, assim como o módulo de elasticidade, a velocidade de propagação da onda de ultra-som e a penetração de íons cloretos.

Os valores que serão utilizados na comparação variam conforme a idade de ruptura, já que também mudam as necessidades. Ou seja, a resistência à compressão para um concreto a 1 dia não é a mesma para 28 dias, já que nas primeiras idades apenas se busca um módulo de elasticidade, através da verificação da resistência inicial para desfôrma, no caso de obras convencionais, ou saque de peças, no caso de indústrias de pré-fabricados. E sabe-se que a mistura atingirá resistências mais elevadas nas idades posteriores, tendo, inclusive, que respeitar os requisitos mínimos da NBR 6118/03 [13] para concretos armados ou protendidos. Então, foram fixadas as resistências à compressão de 10, 20 e 30 MPa



para 1 dia; 20, 30 e 40 MPa para 7 dias; e 40, 50 e 60 MPa para 91 dias para as comparações. A idade de 28 dias, por ser a mais considerada por projetistas e outros profissionais da área, será a idade padrão para as comparações com o módulo de elasticidade, velocidade de propagação das ondas de ultra-som e penetração de íons cloretos. Então para esta foram determinadas as resistências à compressão de 25, 30 e 40 MPa, já que essas equivalem a resistência à compressão característica utilizada normalmente de 20 a 35 MPa.

É importante ressaltar que estes valores foram escolhidos analisando as utilizações mais correntes de concreto nas obras, porém se poderia escolher outros valores, dependendo da aplicação e da opinião do profissional responsável. Com as equações de comportamento já determinadas é simples o cálculo das misturas para qualquer resistência, sendo assim, bastaria recalcular para outros valores.

### 6.1 Resistência à compressão

Na tabela 16 estão expressos todos os custos dos concretos estudados, permitindo as comparações. Na última coluna, foram cal-

culadas as diferenças de custo entre os CAA com areia fina e os CAA com cinza volante.

Observa-se que os CAA com areia fina sempre apresentaram custos superiores do que os CAA com cinza volante, para todas as idades em todas as faixas de resistências. Esse aumento de custo foi significativo, principalmente na resistência à compressão mais utilizada, 28 dias, chegando a quase 15% de acréscimo.

Na figura 5 estão representados os mesmos dados da tabela 16, porém de uma forma melhor de visualização.

### 6.2 Módulo de deformação, ultra-som e penetração de íons cloretos

Na tabela 17 estão representados os resultados de módulo de deformação ( $E_c$ ), velocidade de propagação das ondas de ultra-som e a penetração de íons cloretos para os dois tipos de concreto, com a resistência à compressão de 25, 30 e 40 MPa aos 28 dias. Observa-se que os CAA com areia fina apresentaram o módulo de elasticidade e a velocidade de propagação das ondas de ultra-som inferiores e a penetração de íons cloretos superior do que os CAA com cinza volante. Por isso, pode-se afirmar, para os mate-

Figura 2 - Diagrama de desempenho da família CAA com areia fina

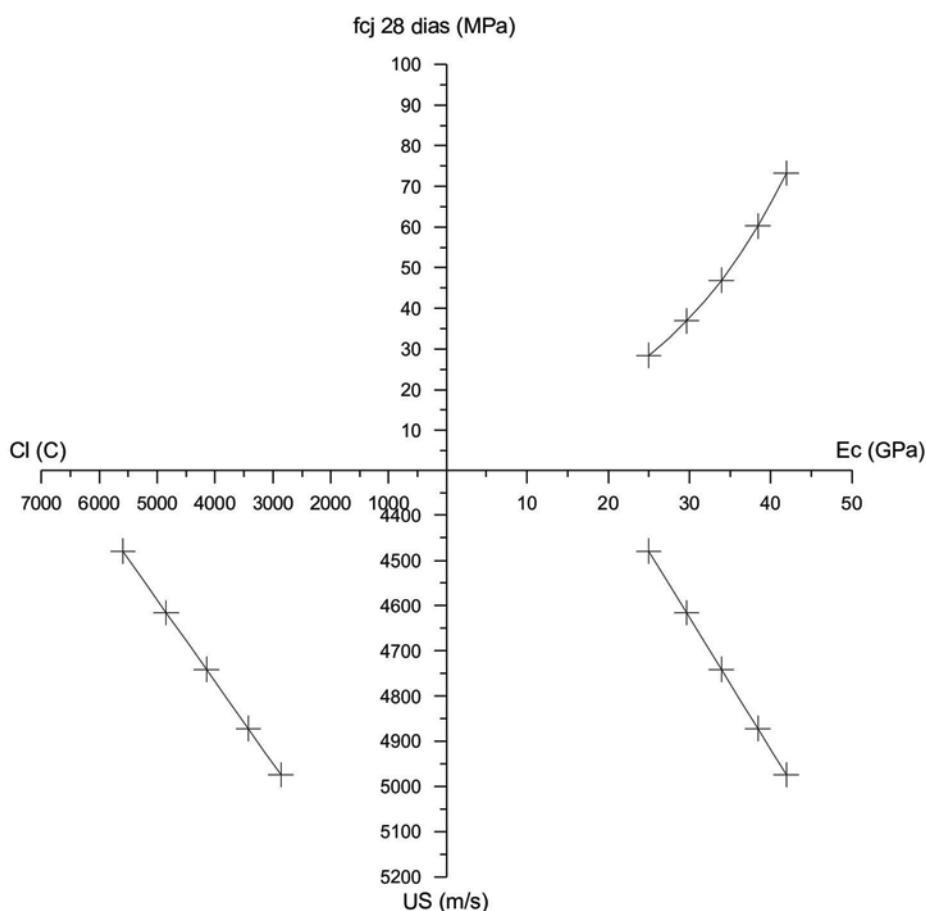


Tabela 14 – Resultados das propriedades no estado endurecido para os CAA com cinza volante

Traço 1:m	a/c	Resistência à compressão (MPa)				Ec (GPa)	US (m/s)	CI (C)
		1 dia	7 dias	28 dias	91 dias			
1:3	0,38	43,0	66,3	84,2	88,0	38,2	4910	480
		42,8	66,4	80,0	89,0	41,0	4932	450
		-	-	-	-	40,0	4900	-
1:4	0,43	36,8	63,3	80,0	84,9	37,7	4910	500
		37,9	62,6	79,9	89,0	38,4	4738	600
		-	-	-	-	34,8	4822	-
1:5	0,51	28,6	50,9	60,9	73,6	36,8	4860	612
		26,1	50,1	62,6	76,8	32,4	4850	620
		-	-	-	-	34,9	4872	-
1:6	0,60	19,5	36,8	49,9	63,5	34,3	4859	720
		19,1	35,1	52,3	61,7	31,0	4802	675
		-	-	-	-	31,3	4798	-
1:7	0,66	14,8	31,2	33,6	47,0	29,9	4810	780
		15,2	27,0	36,4	42,3	30,5	4750	775
		-	-	-	-	30,4	4780	-
1:8	0,72	11,6	28,7	37,7	45,4	29,0	4760	1000
		12,3	28,6	38,5	40,0	28,5	4750	868
		-	-	-	-	27,9	4750	-

Legenda: Ec – módulo de elasticidade; US – propagação das ondas ultra-sônicas; CI – penetração de íons cloretos.

riais utilizados nesse estudo, que o desempenho técnico dos CAA com cinza volante foi superior que os dos CAA com areia fina. Na figura 6 estão representados os mesmos dados da tabela 17, porém de uma forma melhor de visualização. Os resultados do módulo de elasticidade foram multiplicados por 100, para melhor visualização na escala utilizada.

## 7. Conclusões

Após a execução desse trabalho, principalmente a parte experimental, pode-se concluir, para os materiais usados, que a cinza volante apresentou resultados sempre superiores à areia fina, tanto no aspecto econômico quanto técnico. Além de permitir a produção de CAA mais econômicos, a utilização de cinza volante ainda resultou em valores de módulo de deformação e de propagação de ondas de ultra-som superiores e de penetração de íons cloretos inferiores do que os CAA produzidos com areia fina.

## 8. Referências bibliográficas

- [01] TUTIKIAN, B.F. Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- [02] HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland. In: Concreto: ensino, pesquisa e realizações. Ed: G.C. ISAIA. São Paulo, volume 1, capítulo 15, p.439-471, 2005.
- [03] REPETTE, W.L. Concretos de última geração: presente e futuro. In: Concreto: ensino, pesquisa e realizações. Ed: G.C. ISAIA. São Paulo, volume 2, capítulo 49, p.1509-1550, 2005.
- [04] PETERSEN, B.G; REKNES, K. Advances in self-compacting concrete with lignosulphonate superplasticizer. In: Fourth International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete. Chicago, EUA, 2005.
- [05] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 23: cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.
- [06] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.
- [07] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

Tabela 15 – Equações de comportamento e r2 para os CAA com cinza volante

Propriedade	Equação de comportamento	R <sup>2</sup>
Resistência à compressão (Lei de Abrams)	1 dia $f_{cj1d} = \frac{191,16}{45,48^{a/c}}$	1,00
	7 dias $f_{cj7d} = \frac{194,446}{15,125^{a/c}}$	0,98
	28 dias $f_{cj28d} = \frac{237,30}{13,88^{a/c}}$	0,95
	91 dias $f_{cj91d} = \frac{223,56}{9,24^{a/c}}$	0,94
Traço unitário 1:m (lei de Lyse)	$m = 14,127 * a / c - 2,2532$	0,99
Consumo de cimento por m <sup>3</sup>	$C = \frac{2116,2}{m + 0,934}$	1,00
Custo	$Cu = C * (0,4658 + 0,0205 * m)$	1,00
Teor de argamassa seca	$\alpha = 0,0251 * C + 46,038$	1,00
Módulo de elasticidade	$Ec = \frac{\log(f_{cj28d}) - 0,607}{0,0326}$	0,96
Propagação da onda de ultra-som	$US = 13,426 * Ec + 4387,3$	0,96
Penetração de íons cloretos	$Cl = -\frac{(US - 5112,9)}{0,3955}$	0,98

Legenda: fcj1d - resistência à compressão característica a 1 dia; fcj7d - resistência à compressão característica aos 7 dias; fcj28d - resistência à compressão característica aos 28 dias; fcj91d - resistência à compressão característica aos 91 dias; Ec - módulo de elasticidade; US - propagação das ondas ultra-sônicas; Cl - penetração de íons cloretos.

[08] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7251: agregado em estado solto – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

[09] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

[10] TUTIKIAN, B.F. Método para dosagem de concretos auto-adensáveis. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

[11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823: Concreto auto-adensável. Partes 1 a 6. Rio de Janeiro, 2010.

[12] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C1202. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. ASTM 1202/97.

[13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

Figura 3 - Diagrama de dosagem do CAA com cinza volante

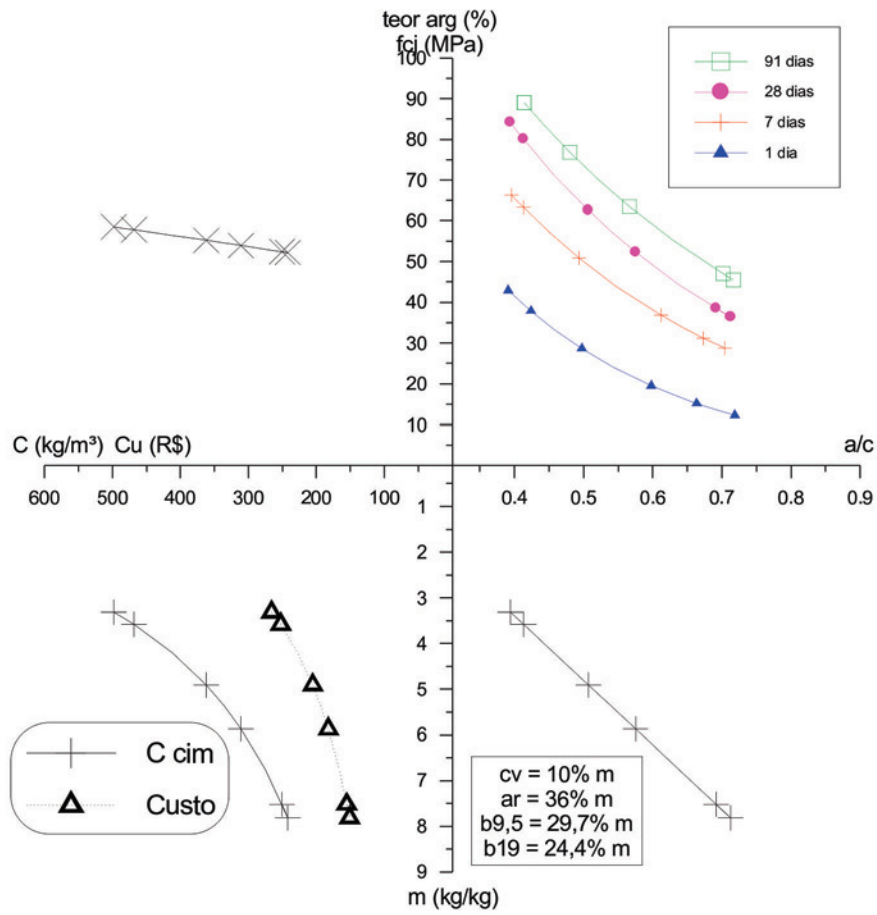


Figura 4 - Diagrama de desempenho do CAA com cinza volante

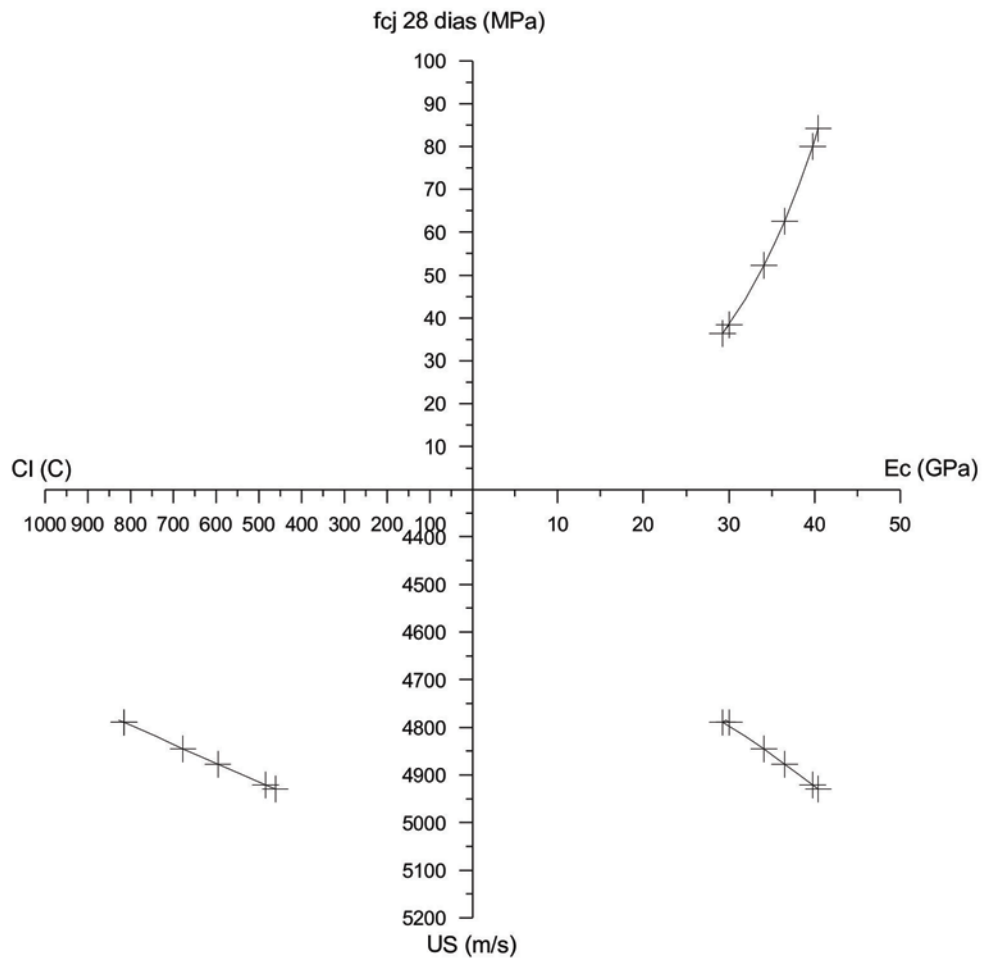


Tabela 16 - Comparativo de resistência à compressão aos 1, 7, 28 e 91 dias

Idade (dias)	fcj (MPa)	CAA areia fina	CAA cinza volante	Diferença de custo (%)
1 dia	10	151,44	141,80	6,8
	20	189,52	177,70	6,7
	30	225,91	214,12	5,5
7 dias	20	145,39	133,28	9,1
	30	171,05	155,85	9,8
	40	197,82	180,24	9,8
28 dias	25	146,26	131,13	11,5
	30	157,55	139,91	12,6
	40	180,84	158,01	14,4
91 dias	30	128,17	125,94	1,8
	40	143,61	130,30	10,2
	50	159,57	147,52	8,2

Figura 5 - Comparativo de resistência à compressão aos 1, 7, 28 e 91 dias

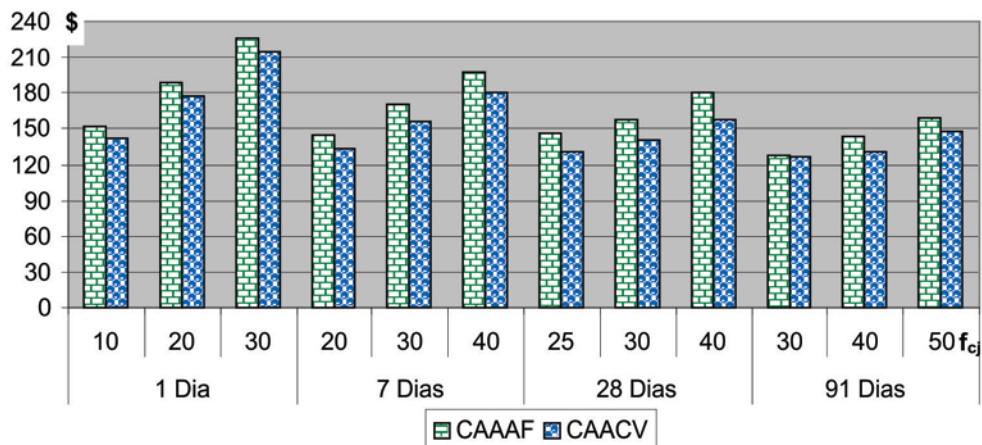


Figura 6 - Comparativo de  $E_c$ , ultra-som e cloretos para  $f_{cj}$  de 25, 30 e 40 MPa

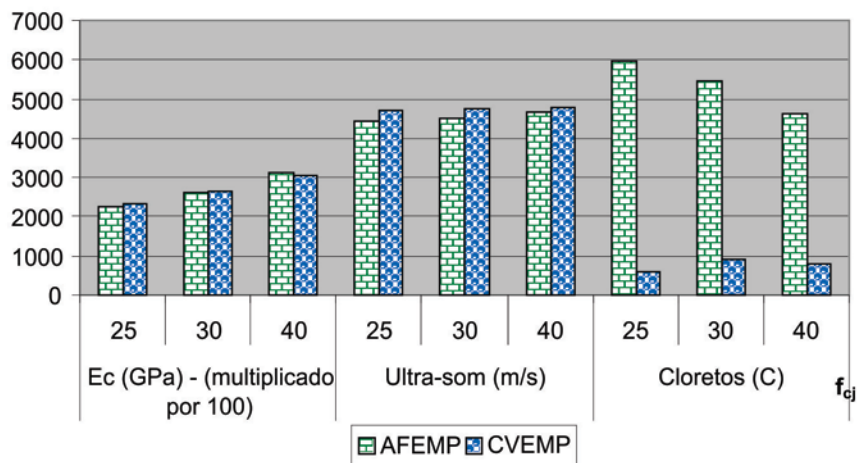


Tabela 17 - Resultados de  $E_c$ , ultra-som e cloretos

$f_{cj}$ (MPa)	CAA AF	CAA CV	CAA AF	CAA CV	CAA AF	CAA CV
	Ec (GPa)		Ultra-som		Cloretos	
25	22,70	23,21	4412	4701	5965	612
30	25,96	26,69	4508	4746	5440	929
40	31,10	30,52	4658	4797	4610	798