



Anais do
61º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2019
Outubro / 2019



@ 2019 - IBRACON - ISSN 2175-8182

Influência da Incorporação de Ar no Comportamento de Concreto Autoadensável

The Influence of Air Entraining in the Behavior of Self-Compacting Concrete

Fernando Mellin Moreira Ferreira (1); Alessandra Lorenzetti de Castro (2)

(1) Mestre, Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC / USP - fernando.mellin.ferreira@usp.br

(2) Professora Doutora, Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC / USP - alcastro@sc.usp.br
Av. Trabalhador São-carlense, 400 / São Carlos - SP / Brasil - CEP: 13566-590

Resumo

A utilização de concreto autoadensável (CAA) na construção civil brasileira vem se difundindo cada vez mais, à medida que são desenvolvidas e aprimoradas as mais diversas técnicas construtivas. O efeito de autoadensabilidade por parte do concreto pode ser obtido com uso de aditivos superplastificantes e/ou aditivos modificadores de viscosidade, associado com a incorporação de materiais de partículas finas. Em se tratando do aumento da fluidez em concretos, a utilização de aditivo incorporador de ar é outra estratégia que pode ser adotada. Esse efeito nas misturas de concreto está associado ainda a uma redução da massa específica e, conseqüentemente, redução do peso próprio da estrutura. Porém, dependendo do teor de ar incorporado, as misturas podem sofrer perdas significativas de resistência mecânica quando do estado endurecido. Assim, o presente trabalho apresenta um estudo sobre a influência da incorporação de ar no comportamento de concretos autoadensáveis tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Para isso, dois traços de CAA de referência com diferentes resistências à compressão foram desenvolvidos, sendo avaliadas as propriedades de autoadensabilidade no estado fresco, bem como as propriedades físicas e mecânicas no estado endurecido. Na sequência, as misturas de referência foram modificadas com aditivo incorporador de ar, resultando em quatro novas misturas com teor de ar incorporado variando entre 5,4% e 14,1%, repetindo-se os ensaios de caracterização tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Verificou-se uma queda significativa de resistência nos traços com ar incorporado em comparação com os de referência. No entanto, ainda com a incorporação de 14,1% de ar, foi possível produzir um concreto com resistência suficiente para fins estruturais.

Palavra-Chave: Concreto autoadensável, Incorporação de ar, Autoadensabilidade, Índices físicos, Resistência.

Abstract

The use of self-compacting concrete (SCC) in Brazilian civil construction has been spreading as more diverse construction techniques are developed and improved. The effect of self-compactability of the concrete can be obtained by using superplasticizers and/or viscosity modifying admixtures associated with the incorporation of fine particle materials. In the case of increased fluidity in concrete, the use of air-entraining admixture is another strategy that can be adopted. This effect on concrete mixtures is associated with a reduction of the density and, consequently, a reduction of the weight of the structure itself. Nevertheless, depending on the entrained air content, the concrete mixtures can suffer significant losses of mechanical strength when in the hardened state. Thus, this paper presents a study on the influence of air entraining in the behavior of self-compacting concrete both in fresh and hardened states. For this, two SCC reference mixes with different compressive strengths were developed, being evaluated the properties of self-compactability in the fresh state, as well as the physical and mechanical properties in the hardened state. Subsequently, the reference mixes were modified with air-entraining admixture, resulting in four new mixtures with entrained air content ranging from 5,4% to 14,1%, repeating the characterization tests in both fresh and hardened states. A significant drop in the strength was observed in the mixtures with entrained air compared to reference ones. However, even with the incorporation of 14,1% of air, it was possible to produce a concrete with sufficient strength for structural purposes.

Keywords: Self-compacting concrete, Air-entraining, Self-compactibility, Physical indexes, Strength.



1 Introdução

De acordo com a NBR 15823-1:2017, o concreto autoadensável (CAA) é definido como o “concreto capaz de fluir, autoadensar pelo seu peso próprio, preencher a fôrma e passar por embutidos (armaduras, dutos e insertos), enquanto mantém sua homogeneidade (ausência de segregação) nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento” (ABNT, 2017).

Em termos de composição, o CAA é um concreto que apresenta os mesmos materiais de um concreto convencional, com algumas mudanças nas características de alguns componentes, acrescido de aditivos químicos e adições minerais (GOMES; BARROS, 2009). Mehta e Monteiro (2014) esclarecem que além de agregado miúdo, agregado graúdo e cimento Portland, os ingredientes necessários para a fabricação de CAA incluem ainda aditivos superplastificantes e/ou aditivos modificadores de viscosidade, associados com a incorporação de adições minerais de partículas finas.

Em se tratando do aumento da trabalhabilidade em concretos, a utilização de aditivos incorporadores de ar é uma estratégia que pode ser adotada. Esses aditivos apresentam estrutura química típica que consiste em cadeia hidrocarbônica apolar com um grupo polar aniônico em sua extremidade, o que faz com que vazios de ar sejam incorporados e estabilizados quando da sua adição ao concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A melhora da trabalhabilidade nas misturas de concreto produzidas com aditivo incorporador de ar acontece como um efeito colateral causado pelo ar incorporado, associada a uma redução da massa específica do concreto e, conseqüentemente, redução do peso próprio da estrutura que permite que sejam consideradas cargas mais brandas no dimensionamento dos elementos estruturais.

Porém, aliado a essas vantagens em relação ao concreto fresco, as misturas de concreto com ar incorporado em determinadas quantidades sofrem perda de resistência mecânica quando do estado endurecido (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Dessa forma, o presente trabalho faz uma análise dos efeitos negativos frente às vantagens obtidas no comportamento de concretos autoadensáveis em decorrência da incorporação de ar à composição das misturas.

2 Objetivo

Avaliar a influência da incorporação de ar no comportamento de concretos autoadensáveis em relação às suas características de autoadensabilidade no estado fresco e propriedades físicas e mecânicas no estado endurecido.

3 Metodologia

O presente trabalho desenvolveu seis diferentes traços de concreto autoadensável. Inicialmente, foram propostos dois traços de referência sem incorporação de ar (traços T1 e T2) visando resistências características à compressão de 25 MPa e 40 MPa aos 28 dias de idade. Os outros quatro traços foram uma variação dos dois originais, considerando a incorporação de ar em diferentes teores. As diferentes etapas de trabalho estão apresentadas na sequência.



3.1 Método de dosagem

São muitas as metodologias de dosagem que podem ser consideradas na elaboração dos traços de CAA. Shi *et al.* (2015) destacam que os métodos de dosagem de CAA podem ser classificados em cinco categorias: métodos de dosagem empíricos; do empacotamento de agregados; de resistência à compressão; e métodos baseados em modelos estatísticos e na reologia da pasta.

Dentre as metodologias de dosagem existentes, optou-se por utilizar aquela proposta por Gomes, Gettu e Agulló (2002; 2003) pelo fato de consistir em um procedimento simples e apresentar bons resultados, como pode ser observado em Santos (2012). O método em questão pressupõe que o CAA pode ser obtido otimizando separadamente a composição da pasta e do esqueleto granular, e depois o conteúdo de pasta do concreto para obter a composição final (GOMES; GETTU; AGULLÓ, 2003; GOMES; BARROS, 2009).

Escolhido o método de dosagem do CAA, definiu-se o procedimento de mistura considerado para sua produção conforme apresentado a seguir.

3.1.1 Procedimento de mistura

Neste trabalho, os traços estudados foram misturados em betoneiras de eixo vertical com capacidade adequada ao volume considerado. O procedimento consistiu em:

- Molhar a betoneira e deixar a água escorrer antes da adição dos materiais;
- Adicionar os agregados graúdos e miúdos em sua totalidade com cerca de 50% da água total e misturar durante 1 minuto;
- Adicionar os materiais finos e o restante da água, e misturar por mais 5 minutos;
- Adicionar o aditivo superplastificante e misturar por mais 5 minutos.

Para os traços que utilizavam aditivo incorporador de ar, foi seguido o mesmo procedimento de mistura dos traços de referência, sendo o incorporador de ar adicionado após o fim da mistura com o aditivo superplastificante, conforme orientação do fabricante e indicação de Attachaiyawuth *et al.* (2016). O passo seguinte ao procedimento anterior foi:

- Adicionar o aditivo incorporador de ar e fazer medições da massa específica e, consequentemente, do teor de ar ao longo do tempo de mistura para definir o momento de parada. Isso foi feito pois a incorporação de ar se mostrou muito difícil de controlar, sendo necessário um critério de parada mais rigoroso do que simplesmente um tempo pré-estabelecido.

3.2 Medição das propriedades do concreto fresco

Visou-se a produção de concretos autoadensáveis com características adequadas para utilização na execução de paredes de concreto moldadas no local. Os limites considerados para essa classificação estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Limites considerados para produção de CAA (NBR 15823-1:2017).

Parâmetros	Slump flow (mm)	T ₅₀₀ (s)	IEV	Anel J (mm)	Caixa L (3 barras)	Funil V (s)	Coluna de Segregação
Limites Considerados	760 a 850	≤ 2	Estável	0 a 25	≥ 0,80	< 9	≤ 15%



3.3 Medição das propriedades do concreto endurecido

No presente trabalho foram realizados ensaios de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Os corpos de prova foram ensaiados nas primeiras idades com 12, 15, 18, 21 e 24 horas, e aos 7 e 28 dias. Foram consideradas 3 amostras para cada idade de cada traço proposto, com exceção de 28 dias, idade na qual foram ensaiados 5 corpos de prova. Com relação à cura, os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida até as respectivas idades de ensaio.

3.4 Incorporação de ar

O teor de ar incorporado foi determinado pelo método gravimétrico de acordo com a NBR 9833:2008 (ABNT, 2008). Para isso, durante as etapas de mistura dos traços com ar incorporado, foram feitas medidas da massa de amostras com volume conhecido de maneira a determinar o teor de ar ao longo do tempo (FERREIRA, 2019).

4 Resultados e discussão

4.1 Definição dos concretos de referência

4.1.1 Seleção dos materiais

Os materiais escolhidos para compor os traços determinados nesta pesquisa foram:

- Cimento Portland composto com escória (CPII E 32);
- Areia natural de origem quartzosa com granulometria média e fina;
- Agregado graúdo com dimensão máxima característica de 9,5 mm;
- Sílica ativa derivada do processo de produção do silício metálico ou ferro silício;
- Fíler calcário de malha 325;
- Aditivo superplastificante à base de policarboxilato;
- Aditivo incorporador de ar;
- Água proveniente da rede de abastecimento local.

4.1.2 Dosagem

As fases do concreto caracterizadas pela pasta de cimento e pelo esqueleto granular foram otimizadas seguindo o método de dosagem proposto. Na sequência, foram feitos testes no concreto em estado fresco ao se variar a quantidade de pasta em 4 diferentes volumes (36%, 38%, 40% e 42%) para cada traço, a fim de se definir o volume de pasta ideal para a mistura de concreto (FERREIRA, 2019). Considerando os limites propostos na Tabela 1, foram escolhidos os volumes de pasta adequados para cada traço: 40% (T1) e 38% (T2). A Tabela 2 apresenta o consumo de materiais para esses dois traços.

É importante destacar que o consumo de água para produção foi corrigido em função da absorção por parte dos agregados. Dessa forma, a quantidade de água adicionada à mistura foi um pouco maior do que a definida no traço considerando a relação água/cimento. O consumo de água para produção foi de 228 kg/m³ e 187 kg/m³ para os traços T1 e T2, respectivamente.

Tabela 2 – Consumo de materiais para os traços definidos.

Consumo de Materiais (kg/m ³)		
Materiais	Traço	
	T1	T2
Cimento	380	377
Sílica ativa	0	38
Fíler calcário	190	188
Água	209	170
Superplastificante	1,519	2,976
Areia fina	307	318
Areia média	461	476
Brita	902	932

As Figuras 1a e 1b permitem uma análise visual dos concretos produzidos.

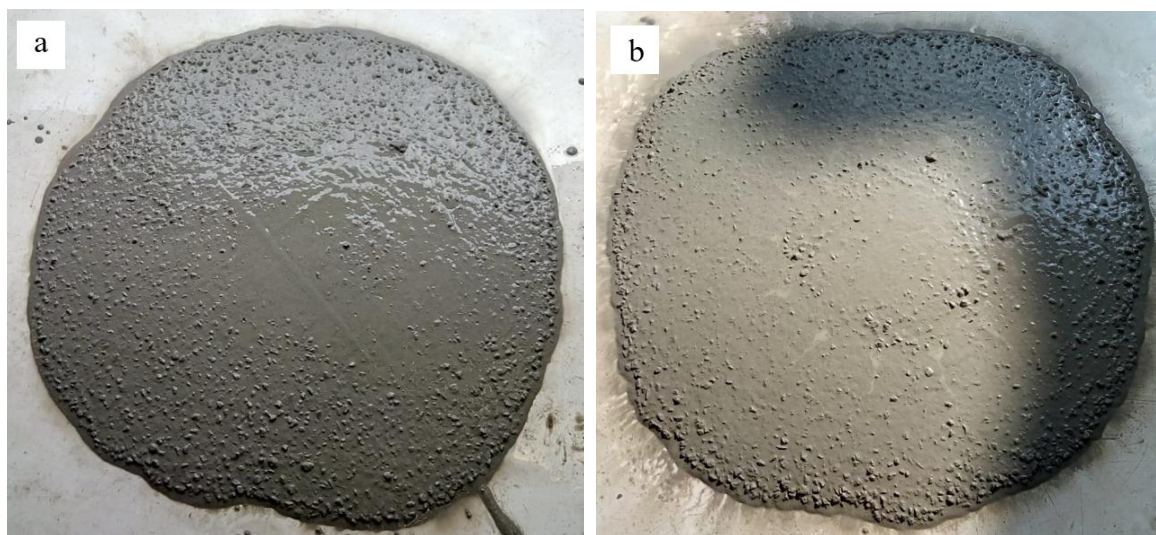


Figura 1 - Traços T1 (a) e T2 (b) de CAA produzidos.

4.2 Caracterização dos concretos de referência

A sequência do trabalho se deu com a verificação das propriedades em estado endurecido para os traços definidos e ainda com uma reavaliação das propriedades em estado fresco quando da produção dos concretos para moldagem dos corpos de prova.

4.2.1 Propriedades do concreto em estado fresco para traços de referência

As propriedades do concreto em estado fresco para os traços T1 e T2 de referência estão apresentadas nas Tabelas 3 e 4, respectivamente. O volume necessário para a concretagem de todos os corpos de prova e ainda para avaliação das propriedades em estado fresco foi de 120 litros de concreto, de maneira a compensar as possíveis perdas durante todo o processo. Para esse volume, foram consideradas 3 betonadas, com 40 litros cada. Todos os parâmetros de autoadensabilidade, com exceção do anel J, foram obtidos



na primeira betonada, enquanto que na segunda era novamente medido o espalhamento e na terceira executado o ensaio de anel J.

Tabela 3 – Traço 1 – Caracterização do concreto autoadensável em estado fresco.

Parâmetros		Limites Considerados	Primeira Betonada	Segunda Betonada	Terceira Betonada
Slump flow	Média (mm)	760 a 850 mm	750	765	-
T₅₀₀ (s)		≤ 2 s	1,36	-	-
IEV		Estável	Estável	Estável	Estável
Anel J	Média (mm)	-	-	-	735
Caixa L	H2 / H1	≥ 0,80	0,89	-	-
Funil V (s)		< 9 s	2,90	-	-
Coluna de Segregação	Massa topo / Massa base (%)	≤ 15%	1,1	-	-

Tabela 4 – Traço 2 – Caracterização do concreto autoadensável em estado fresco.

Parâmetros		Limites Considerados	Primeira Betonada	Segunda Betonada	Terceira Betonada
Slump flow	Média (mm)	760 a 850 mm	660	770	-
T₅₀₀ (s)		≤ 2 s	1,66	-	-
IEV		Estável	Estável	Estável	Estável
Anel J	Média (mm)	-	-	-	745
Caixa L	H2 / H1	≥ 0,80	0,80	-	-
Funil V (s)		< 9 s	5,41	-	-
Coluna de Segregação	Massa topo / Massa base (%)	≤ 15%	2,0	-	-

É importante destacar que a primeira betonada do traço T2 de referência apresentou espalhamento menor pois a betoneira falhou durante a mistura, ficando parada por cerca de 10 minutos, interferindo no comportamento do concreto quando do estado fresco.

4.2.2 Propriedades do concreto em estado endurecido para traços de referência

Em termos de ensaios para o estado endurecido, os resultados e análises das propriedades para os traços T1 e T2 de referência estão apresentados na sequência.

- Traço T1:

A Tabela 5 apresenta os resultados de resistência à compressão para o traço T1. Segundo NBR 12655:2015, a resistência de dosagem deve atender às condições de variabilidade decorrentes da construção. Dessa forma, o valor da resistência média determinada em laboratório deve ser corrigido com um desvio padrão dependente da condição de preparo do concreto. Considerando-se concretos nos quais o cimento e os agregados são medidos em massa e a água é medida em massa ou volume por meio de dispositivo dosador com correção em função da umidade dos agregados, o desvio padrão a ser considerado é de 4,0 MPa (ABNT, 2015).



Tabela 5 – Traço T1 – Resultados de resistência à compressão.

Resistência à Compressão (MPa)							
CP	Idade						
	12 horas	15 horas	18 horas	21 horas	24 horas	7 dias	28 dias
1	1,50	2,53	3,87	6,39	7,24	21,76	41,34
2	1,56	2,71	4,13	6,17	7,76	25,88	43,64
3	1,70	2,71	3,94	6,40	7,64	27,38	43,56
4	-	-	-	-	-	-	44,56
5	-	-	-	-	-	-	.*
Média	1,59	2,65	3,98	6,32	7,55	25,01	43,28
Desvio Padrão	0,10	0,10	0,13	0,13	0,27	2,91	1,37
CV (%)	6,37	3,89	3,37	2,06	3,59	11,60	3,20

* O equipamento utilizado para a compressão dos corpos de prova falhou durante o ensaio.

Tem-se, então, aos 28 dias de idade, uma resistência característica calculada de 36,7 MPa para o concreto produzido. De acordo com Ghazi e Al Jadiri (2010), para a relação água/cimento utilizada (0,55) era de se esperar um concreto com classe de resistência de 30 MPa.

Outra análise que pode ser feita é relacionada ao ganho de resistência em função do tempo para o concreto analisado. Segundo Battagin (2001), as resistências à compressão observadas para cimento CP II E 32 são de 23% com 1 dia e 74% aos 7 dias, quando em comparação com a resistência obtida aos 28 dias. Para o traço T1 de referência, os valores obtidos para essas relações foram de 17,4% e 57,8%, com 1 e 7 dias, respectivamente. Isso indica um ganho de resistência entre 7 e 28 dias inesperado.

- Traço T2:

A Tabela 6 apresenta os resultados de resistência à compressão para o traço T1.

Tabela 6 – Traço T2 – Resultados de resistência à compressão.

Resistência à Compressão (MPa)							
CP	Idade						
	12 horas	15 horas	18 horas	21 horas	24 horas	7 dias	28 dias
1	1,60	3,46	6,43	9,18	11,86	40,92	62,61
2	1,70	3,68	6,38	8,97	11,74	43,79	60,75
3	1,58	3,33	5,96	8,84	11,82	43,69	66,08
4	-	-	-	-	-	-	62,42
5	-	-	-	-	-	-	60,49
Média	1,62	3,49	6,26	9,00	11,81	42,80	62,47
Desvio Padrão	0,07	0,18	0,26	0,18	0,06	1,63	2,23
CV (%)	4,03	5,05	4,16	1,95	0,52	3,80	3,60

A partir da resistência à compressão média obtida aos 28 dias, determina-se o f_{ck} para o concreto em questão como sendo de 55,9 MPa (ABNT, 2015). Esperava-se, de acordo com



Ghazi e Al Jadiri (2010), que essa resistência ficasse próxima de 40 MPa para relação água/cimento igual a 0,45.

Em relação à evolução ao longo das idades, observa-se, em relação aos resultados de resistência à compressão aos 28 dias, valores de 18,9% e 68,5% para 1 e 7 dias, respectivamente. Os resultados são inferiores, mas próximos, à previsão de 23% e 74% para as respectivas idades presente em Battagin (2001).

4.3 Caracterização dos concretos com ar incorporado

Optou-se, no caso da produção de concretos autoadensáveis com ar incorporado, por 4 betonadas de 30 litros por traço para produzir o volume de material exigido pelos ensaios. Decidiu-se também pela limitação de uma variação de 2% (em valor de teor de ar) a ser respeitado entre as quatro betonadas de um mesmo traço devido às dificuldades relacionadas ao trabalho com o aditivo incorporador de ar.

Os traços obtidos a partir daqui serão denominados com base nos traços de referência. Dessa forma, o traço T1 de referência deu origem aos traços T1_1 e T1_2, enquanto que o traço T2 de referência resultou nos traços T2_1 e T2_2.

4.3.1 Propriedades do concreto em estado fresco para traços com ar incorporado

Na sequência são apresentados os resultados de caracterização em estado fresco para os quatro traços modificados a partir dos traços de referência. Estão apresentados também os teores de ar médios obtidos a cada betonada por meio de duas medições de massa. Vale destacar que a betoneira era desligada durante as pesagens para que não houvesse incorporação de ar durante o tempo necessário para obtenção das misturas.

- Traço T1_1:

Nesse concreto, foi utilizada uma massa de aditivo incorporador de ar correspondente a um teor igual a 0,2% em relação à massa de cimento, com tempo de mistura efetivo de aproximadamente 7 minutos após colocação do aditivo, totalizando mistura de 21 minutos. Os resultados de caracterização em estado fresco estão mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Traço T1_1 – Caracterização do concreto autoadensável em estado fresco.

Parâmetros		Limites Considerados	Primeira Betonada	Segunda Betonada	Terceira Betonada	Quarta Betonada
Slump flow	Média (mm)	760 a 850 mm	665	-	695	745
T ₅₀₀ (s)		≤ 2 s	0,97	-	-	-
IEV		Estável	Estável	Estável	Estável	Estável
Anel J	Média (mm)	-	-	645	-	-
Caixa L	H2 / H1	≥ 0,80	0,72	-	-	-
Funil V (s)		< 9 s	2,81	-	-	-
Coluna de Segregação	Massa topo/Massa base (%)	≤ 15%	5,6	-	-	-
Teor de Ar (%)	Média	-	6,2	5,5	5,6	4,4
	Média Geral	-	5,4			



A partir dos resultados obtidos, observa-se uma redução no valor de espalhamento em comparação ao traço T1 de referência. Esse dado apresenta diferenças em relação ao que é esperado segundo Kosmatka, Kerkhoff e Panarese (2002), ou seja, o abatimento do concreto deveria aumentar com o aumento no teor de ar. Entende-se, portanto, que o mesmo efeito deveria ser observado para o espalhamento. Essa diferença pode ser explicada pelo maior tempo de mistura necessário após a adição do incorporador de ar, fazendo com que o superplastificante perdesse eficiência. Essa perda de fluidez é observada também no ensaio com caixa L. Cabe ressaltar que o teor de aditivo superplastificante foi mantido o mesmo do concreto de referência quando da produção dos traços modificados com aditivo incorporador de ar, a fim de verificar o efeito deste aditivo sobre o comportamento dos concretos autoadensáveis.

Os resultados indicam também que o teor de ar incorporado apresentou certa variação ao longo das quatro betonadas. Ainda assim, a diferença entre a média mais alta e a mais baixa é inferior a 2% (em valor de teor de ar), limite definido anteriormente para aceitação ou não dos concretos modificados com aditivo incorporador de ar.

- Traço T1_2:

Nesse concreto, foi utilizada uma massa de aditivo incorporador de ar correspondente a um teor igual a 0,2% em relação à massa de cimento, com tempo de mistura efetivo de aproximadamente 10 minutos após colocação do aditivo, totalizando mistura de 24 minutos. Os resultados de caracterização em estado fresco estão mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Traço T1_2 – Caracterização do concreto autoadensável em estado fresco.

Parâmetros		Limites Considerados	Primeira Betonada	Segunda Betonada	Terceira Betonada	Quarta Betonada
Slump flow	Média (mm)	760 a 850 mm	725	-	685	675
T ₅₀₀ (s)		≤ 2 s	0,76	-	-	-
IEV		Estável	Estável	Estável	Estável	Estável
Anel J	Média (mm)	-	-	665	-	-
Caixa L	H2 / H1	≥ 0,80	0,78	-	-	-
Funil V (s)		< 9 s	3,13	-	-	-
Coluna de Segregação	Massa topo / Massa base (%)	≤ 15%	7,8	-	-	-
Teor de Ar (%)	Média	-	12,1	11,9	11,5	11,1
	Média Geral	-	11,7			

Conforme Tabela 8, novamente é observada uma redução do espalhamento em relação ao traço T1, justificada com o maior tempo de mistura, uma vez que o teor de aditivo foi mantido o mesmo da mistura de referência. O ensaio de Caixa L também mostra que o resultado ficou prejudicado com a perda de fluidez do concreto.

- Traço T2_1:

Nesse concreto, foi utilizada uma massa de aditivo incorporador de ar correspondente a um teor igual a 0,1% em relação à massa de cimento, com tempo de mistura efetivo de



aproximadamente 6 minutos após colocação do aditivo, totalizando mistura de 20 minutos. Os resultados de caracterização em estado fresco estão mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Traço T2_1 – Caracterização do concreto autoadensável em estado fresco.

Parâmetros		Limites Considerados	Primeira Betonada	Segunda Betonada	Terceira Betonada	Quarta Betonada
Slump flow	Média (mm)	760 a 850 mm	560	-	695	690
T ₅₀₀ (s)		≤ 2 s	1,24	-	-	-
IEV		Estável	Estável	Estável	Estável	Estável
Anel J	Média (mm)	-	-	535	-	-
Caixa L	H2 / H1	≥ 0,80	0,86	-	-	-
Funil V (s)		< 9 s	5,86	-	-	-
Coluna de Segregação	Massa topo / Massa base (%)	≤ 15%	10,3	-	-	-
Teor de Ar (%)	Média	-	8,8	9,3	8,8	9,2
	Média Geral	-	9,0			

De maneira geral, o espalhamento observado foi menor do que no traço T2 de referência. Assim como no caso dos outros traços modificados, essa variação pode ser explicada pelo maior tempo total de mistura, uma vez que o teor de aditivo foi mantido o mesmo da mistura de referência.

- Traço T2_2:

Nesse concreto, foi utilizada uma massa de aditivo incorporador de ar correspondente a um teor igual a 0,2% da massa de cimento, com tempo de mistura efetivo de aproximadamente 8 minutos após colocação do aditivo, totalizando mistura de 22 minutos. Os resultados de caracterização em estado fresco estão mostrados na Tabela 10.

Da mesma maneira que observado nos outros 3 traços modificados com aditivo incorporador de ar, o traço T2_2 apresentou perda de espalhamento em relação ao traço de referência. O ensaio da caixa L, novamente refletiu esse resultado.

Em uma análise geral, os concretos T1_1, T1_2 e T2_2 apresentaram resultados do ensaio de caixa L um pouco abaixo do limite estabelecido na Tabela 1. Com exceção do espalhamento, os outros parâmetros analisados respeitam os limites impostos em todos os 4 concretos, sendo que vale chamar atenção para o anel J, que não possui uma comparação direta com o espalhamento na mesma betonada. No caso desse ensaio, considera-se que o limite de 25 mm é respeitado com ao menos um dos espalhamentos obtidos em outras betonadas.

Os consumos de materiais dos traços modificados com aditivo incorporador de ar estão apresentados na Tabela 11.



Tabela 10 – Traço T2_2 – Caracterização do concreto autoadensável em estado fresco.

Parâmetros		Limites Considerados	Primeira Betonada	Segunda Betonada	Terceira Betonada	Quarta Betonada
Slump flow	Média (mm)	760 a 850 mm	575	600	-	610
T ₅₀₀ (s)		≤ 2 s	1,53	-	-	-
IEV		Estável	Estável	Estável	Estável	Estável
Anel J	Média (mm)	-	-	-	590	-
Caixa L	H2 / H1	≥ 0,80	0,76	-	-	-
Funil V (s)		< 9 s	3,41	-	-	-
Coluna de Segregação	Massa topo / Massa base (%)	≤ 15%	4,5	-	-	-
Teor de Ar (%)	Média	-	14,2	14,4	13,9	14
	Média Geral	-	14,1			

Tabela 11 – Consumo de materiais para os traços com ar incorporado.

Consumo de Materiais (kg/m ³)				
Materiais	Classe			
	T1_1	T1_2	T2_1	T2_2
Cimento	348	325	333	314
Sílica ativa	0	0	34	32
Fíler calcário	174	163	166	157
Água	191	179	150	142
Superplastificante	1,391	1,299	2,629	2,479
Incorporador de ar	0,696	0,65	0,333	0,628
Areia fina	281	263	281	265
Areia média	422	394	420	396
Brita	826	771	823	776

4.3.2 Propriedades do concreto em estado endurecido para traços com ar incorporado

- Traço T1_1:

A Tabela 12 apresenta os resultados de resistência à compressão para o traço T1_1.

A resistência à compressão média observada aos 28 dias define, para desvio padrão de 4,0 MPa, um f_{ck} de valor 18,9 MPa (ABNT, 2015). Esse valor faz com que o concreto T1_1 não possa ser considerado com função estrutural (ABNT, 2014).

Observa-se uma queda de cerca de 41% em relação a resistência à compressão média aos 28 dias do concreto de referência (43,3 MPa). Segundo Kosmatka, Kerkhoff e Panarese (2002), a resistência à compressão tende a ser reduzida de 2% a 6% a cada aumento de 1% no teor de ar incorporado. Isso significa que, para um teor de 5,4% a queda máxima observada deveria ser de aproximadamente 29%, valor bem abaixo do obtido com os ensaios realizados.

Com 1 dia, a resistência à compressão observada foi de 20,7% da resistência obtida com 28 dias. Aos 7 dias, esse valor subiu para 66,3%. Mais uma vez, os resultados ficaram abaixo, mas próximos, da previsão de 23% e 74% apresentadas em Battagin (2001).



Tabela 12 – Traço T1_1 – Resultados de resistência à compressão.

Resistência à Compressão (MPa)							
CP	Idade						
	12 horas	15 horas	18 horas	21 horas	24 horas	7 dias	28 dias
1	2,32	2,98	3,68	4,60	5,30	16,94	25,47
2	1,99	2,52	3,28	4,32	4,94	16,18	28,15*
3	1,15	1,75	3,01	3,90	5,59	17,55	25,46
4	-	-	-	-	-	-	25,87
5	-	-	-	-	-	-	25,08
Média	1,82	2,42	3,32	4,27	5,27	16,89	25,47
Desvio Padrão	0,60	0,62	0,33	0,35	0,33	0,69	0,32
CV (%)	33,12	25,71	10,05	8,29	6,16	4,00	1,30

* Valor de resistência descartado pelo critério de Chauvenet.

- Traço T1_2:

A Tabela 13 apresenta os resultados de resistência à compressão para o traço T1_2.

Tabela 13 – Traço T1_2 – Resultados de resistência à compressão.

Resistência à Compressão (MPa)							
CP	Idade						
	12 horas	15 horas	18 horas	21 horas	24 horas	7 dias	28 dias
1	0,70	1,42	1,98	2,78	2,95	11,93	17,32
2	0,77	0,97	1,56	2,11	2,55	13,26	17,69
3	0,51	0,68	1,37	1,97	2,67	11,52	16,66
4	-	-	-	-	-	-	18,88
5	-	-	-	-	-	-	18,86
Média	0,66	1,03	1,64	2,29	2,72	12,24	17,88
Desvio Padrão	0,13	0,37	0,31	0,44	0,20	0,91	0,97
CV (%)	20,02	36,31	19,01	19,16	7,42	7,40	5,40

A partir dos resultados apresentados pelo concreto T1_1, já era esperado que o concreto T1_2 desenvolvesse baixas resistências. Para desvio padrão de 4,0 MPa, o valor de f_{ck} para o traço em questão é de 11,3 MPa (ABNT, 2015).

A queda de resistência à compressão média aos 28 dias observada em relação ao concreto de referência é de aproximadamente 59%. Conforme Kosmatka, Kerkhoff e Panarese (2002), para um teor de ar de 11,7%, a queda de resistência observada poderia ser de até 51,5%. Portanto, a redução real de resistência à compressão foi maior do que a prevista, apesar de a ordem de grandeza ser parecida. Em comparação com a resistência à compressão média obtida aos 28 dias, observa-se valor equivalente a 15,2% com 1 dia e 68,4% aos 7 dias. As proporções apresentadas são menores que as de 23% e 74% mostradas em Battagin (2001).

- Traço T2_1:

A Tabela 14 apresenta os resultados de resistência à compressão para o traço T2_1.



Tabela 14 – Traço T2_1 – Resultados de resistência à compressão.

Resistência à Compressão (MPa)							
CP	Idade						
	12 horas	15 horas	18 horas	21 horas	24 horas	7 dias	28 dias
1	2,13	3,06	4,27	6,04	6,44	25,57	43,43
2	2,23	2,80	4,52	6,23	7,10	25,24	42,49
3	2,22	3,22	4,16	6,05	6,57	25,88	39,080*
4	-	-	-	-	-	-	43,60
5	-	-	-	-	-	-	44,31
Média	2,19	3,03	4,31	6,11	6,70	25,56	43,46
Desvio Padrão	0,05	0,22	0,18	0,10	0,35	0,32	0,75
CV (%)	2,37	7,11	4,26	1,69	5,22	1,20	1,70

* Valor de resistência descartado pelo critério de Chauvenet.

Com os resultados obtidos, determina-se o valor de f_{ck} como sendo de 36,9 MPa (ABNT, 2015). A resistência à compressão média obtida aos 28 dias é cerca de 30% menor do que a observada em relação ao concreto de referência. Para um teor de ar igual a 9%, esperava-se que a queda fosse de 16,6% a 42,7% (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2002). Assim, a redução obtida se encontra no intervalo esperado.

Com 1 dia de idade, a resistência à compressão observada era de 15,4% da obtida aos 28 dias. No caso de 7 dias, esse valor sobe para 58,8% em comparação aos mesmos 28 dias. Novamente, os valores de 23% e 74% previstos em Battagin (2001) não se adequam muito bem ao concreto em questão.

- Traço T2_2:

A Tabela 15 apresenta os resultados de resistência à compressão para o traço T2_2.

Tabela 15 – Traço T2_2 – Resultados de resistência à compressão.

Resistência à Compressão (MPa)							
CP	Idade						
	12 horas	15 horas	18 horas	21 horas	24 horas	7 dias	28 dias
1	3,31	4,88	5,92	7,09	7,89	22,20	34,19
2	3,14	3,87	5,07	6,92	7,71	24,85	36,34
3	2,55	3,49	4,97	6,62	7,17	23,64	31,64
4	-	-	-	-	-	-	34,42
5	-	-	-	-	-	-	32,91
Média	3,00	4,08	5,32	6,88	7,59	23,56	33,90
Desvio Padrão	0,40	0,72	0,52	0,24	0,37	1,33	1,76
CV (%)	13,34	17,67	9,80	3,45	4,92	5,60	5,20

Os resultados obtidos permitem a definição do valor de f_{ck} para o T2_2 como sendo de 27,3 MPa (ABNT, 2015). Dessa maneira, em termos de resistência à compressão, o traço proposto pode ser considerado como concreto estrutural (ABNT, 2014).



Anais do
61º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2019
Outubro / 2019



@ 2019 - IBRACON - ISSN 2175-8182

Observou-se queda de resistência à compressão média aos 28 dias de 45,7% em relação ao traço T2 de referência. Segundo Kosmatka, Kerkhoff e Panarese (2002), para um teor de 14,1% a queda de resistência observada deve respeitar o intervalo de 24,8% até 58,2%, o que acontece com o concreto analisado.

A resistência à compressão obtida com 1 dia foi 22,4% daquela observada aos 28 dias. Quando a comparação é feita de 7 para 28 dias, esse valor foi de 69,5%. Abaixo da expectativa apresentada por Battagin (2001).

4.3.3 Comparação de resistências para concretos produzidos

Na sequência (Figuras 2 e 3) estão apresentadas comparações para as resistências à compressão apresentadas anteriormente. Vale destacar que o tempo foi considerado em horas, de maneira a facilitar a apresentação dos resultados das primeiras idades. Dessa forma, a idade de 7 dias é representada por 168 horas, e a idade de 28 dias, por 672 horas.

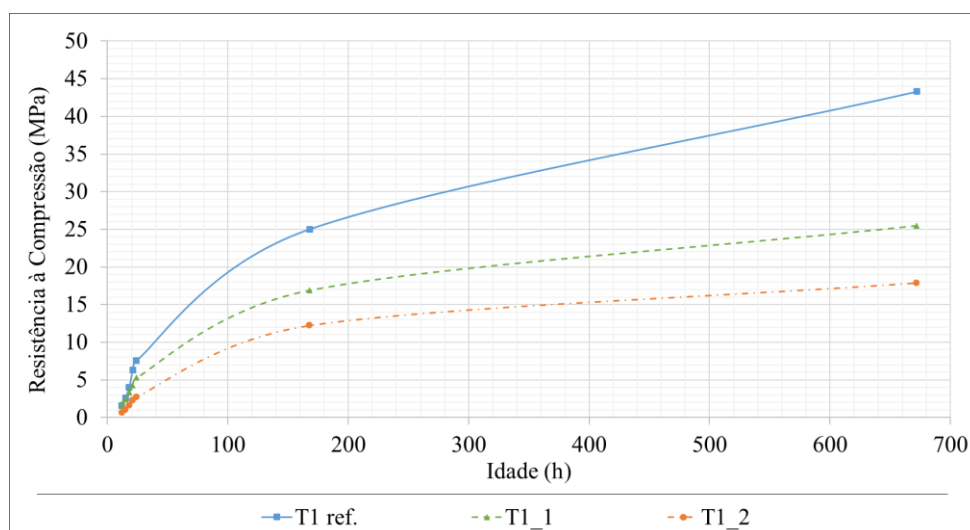


Figura 2 – Traço T1 de referência e suas variações – Evolução da resistência à compressão.

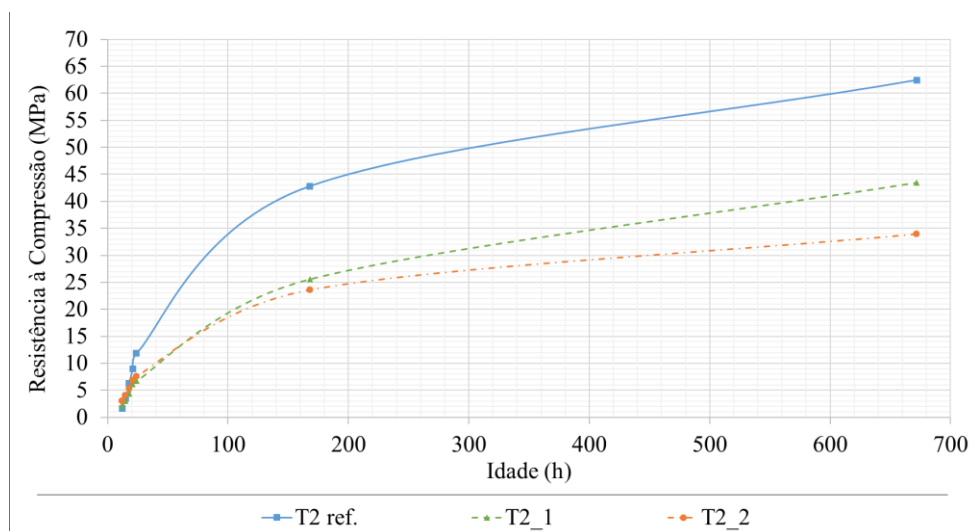


Figura 3 – Traço T2 de referência e suas variações – Evolução da resistência à compressão.



Anais do
61º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2019
Outubro / 2019



@ 2019 - IBRACON - ISSN 2175-8182

Com os resultados plotados em gráficos, percebe-se claramente as quedas de resistência decorrentes da incorporação de ar, conforme apresentado nas análises anteriores. Chama a atenção, ainda, o fato de as resistências à compressão para as primeiras idades nos traços derivados do traço T2 (Figura 3) estarem muito próximas, indicando a pequena variação de resultados.

5 Conclusões

A partir dos resultados apresentados, percebe-se a grande influência exercida pela incorporação de ar em misturas de concreto autoadensável. Em se tratando das características em estado fresco, observou-se perda de espalhamento nos concretos quando se fez uso de aditivo incorporador de ar. Porém, entende-se que essa perda foi resultado do maior tempo de mistura necessário para incorporar os teores de ar desejados quando em comparação com os traços de referência. Isso ocorre pelo fato de o aditivo superplastificante perder eficiência com o passar do tempo de mistura, além de não ter sido feita incorporação adicional de aditivo superplastificante para ajustar as propriedades de autoadensabilidade quando do uso do aditivo incorporador de ar.

No caso das análises em estado endurecido, os concretos produzidos a partir do traço T1 apresentaram queda de resistência média à compressão aos 28 dias igual a 41% para o T1_1 e 59% para o T1_2 em relação ao concreto de referência. Já para os produzidos a partir de T2, a resistência à compressão aos 28 dias foi reduzida em 30% para o T2_1 e em 46% para o T2_2 quando comparado ao traço de referência. Ainda assim, os traços T1 e T2 de referência e os T2_1 e T2_2 apresentam características e propriedades adequadas, tanto em estado fresco quanto em estado endurecido, para serem considerados como concretos autoadensáveis com função estrutural.

Além disso, os traços T2_1 e T2_2 se destacaram devido à redução no consumo de cimento decorrente do alto teor de ar incorporado (9% e 14%, respectivamente), associada à manutenção do desempenho mecânico para fins estruturais, com valores de resistência à compressão característica (36,9 MPa e 27,3 MPa, respectivamente) muito próximos de classes de utilização usuais (C35 e C25).

6 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118 – **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro. 2014. 238p.

_____. NBR 9833 – **Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro. 2008. 7p.

_____. NBR 12655 – **Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento**. Rio de Janeiro. 2015. 23p.

_____. NBR 15823-1 – **Concreto autoadensável – Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco**. Rio de Janeiro. 2017. 14p.



Anais do
61º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2019
Outubro / 2019



@ 2019 - IBRACON - ISSN 2175-8182

ATTACHAIYAWUTH, A.; SOVANNSATHYA, R.; TANAKA, K.; OUCHI, M. **Improvement of Self-Compactibility of Air-Entrained Self-Compacting Concrete with Finer Entrained Air.** Journal of Advanced Concrete Technology 14. 2016. p. 55-69.

BATTAGIN, A. F. **Cimento Portland.** In: ISAIA, G. C. CONCRETO: Ciência e tecnologia. São Paulo: Ipsis. v. 1. 2011. p. 185-232.

FERREIRA, F. M. M. **Influência da incorporação de ar em concreto autoadensável para paredes de concreto moldadas no local.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2019. 194p.

GHAZI, F. K., AL JADIRI, R. S. **New Method for Proportioning Self-Consolidating Concrete Based on Compressive Strength Requirements.** ACI Materials Journal. n. 107. 2010. p. 490-497.

GOMES, P. C. C. **Optimization and characterization of high-strength selfcompacting concrete.** Tese (Doutorado) – Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. 2002. 139p.

GOMES, P. C. C.; GETTU, R.; AGULLÓ, L. **Uma nova metodologia para obtenção de concreto autoadensável de alta resistência com aditivos minerais.** In: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto. São Paulo. 2003. 14p.

GOMES, P.C.C.; BARROS, A.R. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável.** 1 ed. São Paulo: PINI. 2009. 165p.

KOSMATKA, S. H.; KERKHOFF, B.; PANARESE, W. C. **Design and Control of Concrete Mixtures**, EB001, 14th edition, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA. 2002 358p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete – Microstructure, Properties and Materials.** 13th ed. United States: McGraw-Hill. 2014. 659p.

SANTOS, R. F. C. **Estudo de concretos auto-adensáveis, com aditivo incorporador de ar, utilizados na produção de paredes de concreto armado moldadas no local.** Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo. 2012. 181p.

Shi, C.; Wu, Z.; Lv, K.; Wu, L. **A review on mixture design methods for self-compacting concrete.** Construction and Building Materials 84. 2015. p. 387-398.