

Análise das propriedades físicas e mecânicas do Concreto autoadensável

Analysis of physical and mechanical properties of self-compacting concrete

Diego de Lima Rodrigues¹
Jhessica Glaucia Ribeiro Garçone²
Plinio Delano Francisco Nunes³
André Luis Gamino⁴

RESUMO

O concreto autoadensável (CAA) é necessário para execução de elementos estruturais com alta taxa de armaduras, grandes restrições e para locais de difícil aplicação. Com capacidade de preencher os espaços vazios somente com a força gravitacional devido a sua alta fluidez, que em sua composição utiliza aditivos e agregado miúdos de menores dimensões em um fator elevado água/cimento e assim dispensando o uso de equipamentos mecânicos para adensamento em suas aplicações, em contrapartida cria o risco de segregação dos materiais compósitos e aumento de retração e fluência. Os materiais a serem utilizados foram cimento Portland, aditivo plastificante, areias finas e médias, e como agregado graúdo pedrisco. Os resultados a serem obtidos são uma dosagem CAA com redução de cimento e água que atenda a resistência requerida e análise experimental das propriedades físicas e mecânicas. **Palavras-Chave:** Concreto autoadensável; Trabalhabilidade; Aditivos.

ABSTRACT

The self-compacting concrete (SCC) is used for the execution of structural elements with high armor rate, with big restrictions and for places of difficult application. It has the capacity to fill the empty spaces with only the gravitational force due to its high fluidity, which in its composition uses additives and aggregates of smaller dimensions in a high factor of water/cement. Therefore, it is possible to dismiss the use of mechanical equipment for densification of the concrete during its application, on the other hand creates the risk of segregation of the composite materials and increased shrinkage and creep. The materials used were Portland cement, superplasticizer additive, fine and medium sands, and gravel as coarse aggregate. The results to be obtained are a SCC dosage with reduction of cement and water that meet the required resistance of the project and experimental analysis of physical and mechanical properties. **Keywords:** Self-compacting concrete; Workability; Additives.

¹ Acadêmico de Engenharia Civil do Centro Universitário Católico Salesiano Auxilium – Araçatuba-SP.

² Acadêmico de Engenharia Civil do Centro Universitário Católico Salesiano Auxilium – Araçatuba-SP.

³ Acadêmico de Engenharia Civil do Centro Universitário Católico Salesiano Auxilium – Araçatuba-SP.

⁴ Engenheiro civil, Professor Doutor do Centro Universitário Católico Salesiano Auxilium – Araçatuba – SP.

Introdução

Segundo Okamura (1997), o CAA é um material que progrediu rapidamente na construção civil. Seu desempenho é alcançado devido sua grande fluidez e alta trabalhabilidade, possibilitando a concretagem de peças densamente armadas e em locais de difícil acesso a vibração. As características que mais se destacam nesse concreto são: capacidade de preencher todos os espaços vazios sem a necessidade de intervenção mecânica e estabilidade para o preenchimento dos espaços sem ocorrer a separação dos seus componentes.

Após ser aprovado em todos os testes ao qual foi submetido pelo grupo de pesquisadores do Japão, em 1988, foi permitido que o concreto adensável se tornasse apto e presente em edificações que necessitam de grande sofisticação em seu processo. É um material que dispensa a utilização de vibradores de imersão para o preenchimento da fôrma, pois seu próprio peso exerce essa função, com o auxílio da força gravitacional (KHAYAT, 2000).

Na execução do concreto autoadensável, é utilizado um alto teor de finos em relação ao agregado graúdo, maior quantidade de cimento e adições minerais. Com a utilização de um alto teor de finos, o concreto garante a eficácia e alta trabalhabilidade, tornando-se um elemento autonivelante, com melhor coesão da pasta e aumento da resistência inicial (GOMES, 2002). A figura 1, demonstra a trabalhabilidade do CAA, assim que lançado durante a concretagem (BASF, 2013).



Figura 1 - Lançamento do concreto autoadensável. **Fonte:** BASF (2013).

O CAA é um concreto fluído, que se molda na fôrma, dispensando a intervenção humana e mecânica. Sendo assim, ele é indicado em estruturas que possuem alta taxa de armaduras, estruturas que exijam acabamento de concreto aparente, estruturas pré-moldadas, entre outros métodos e obras arquitetônicas.

Por ser um concreto autonivelante, torna-se muito eficaz sua utilização em rampas e calçadas, pois dispensando a intervenção humana, permite que o CAA possua um acabamento superior do concreto convencional. Sua atuação é essencial em obras que exige uma utilização menor de mão de obra, restrição de poluição sonora, concretagem rápida e limitação de espaço que permita poucos equipamentos presentes no local (NUNES, 2001).

A utilização do concreto autoadensável, é consideradamente mais viável. Ele evita a poluição sonora, pois dispensa o uso de vibradores de imersão e outros equipamentos responsável pelo nivelamento do produto. Além disso, possibilita a economia de energia elétrica, devido ao curto tempo que é necessário para a execução do trabalho. Também diminui o risco de acidentes de trabalho, pois não requer muito esforço durante o lançamento (COPPOLA, 2001).

Sua execução, permite reduzir até três vezes a quantidade de operários, pois é facilmente lançado, dispensando o deslocamento e esforço durante o bombeamento. Esse fator possibilita a redução de custos com a mão de obra (NUNES, 2001).

A qualidade do CAA é medida através dos termos de consistência, ao invés da relação das propriedades mecânicas, assim como o concreto convencional. Devido a isso, observa-se que essas propriedades não podem ser avaliadas utilizando os procedimentos convencionais, por exemplo, o *slumptest*, que avalia a consistência. A fluidez do CAA, exige uma metodologia própria de avaliação, para suprir as exigências da qualidade do material, permitindo sua uniformidade e evitando falhas no decorrer da concretagem. Um dos tipos de ensaios para ser utilizado é o *slumpflow*, que é realizado no Cone de Abrams, no qual mede-se o diâmetro da abertura do concreto após seu lançamento (KHAYAT, 1999).

Com o grande crescimento da construção civil criou a necessidade de construir mais rápido para garantir a demanda exigida, contudo obtendo novos processos construtivos com o melhor custo benefício, garantindo a qualidade requerida e segurança dos trabalhadores.

Apesar das construtoras julgarem que o concreto autoadensável tem um custo mais elevado que o concreto convencional, o estudo do concreto autoadensável é de extrema importância para as obras correntes e pré-moldadas, pois possuem tecnologia e qualidade superiores às do concreto convencional, aumentando assim a qualidade da sua estrutura.

Materiais e métodos

É de suma importância, realizar um estudo, viabilizando a otimização da dosagem do concreto autoadensável, estudando sua capacidade de resistência a compressão normal, avaliando a influência dos materiais do concreto no estado fresco e endurecido

Para a realização dos ensaios, foi necessário a seleção e caracterização dos materiais empregados na fabricação do concreto autoadensável. A escolha dos elementos, foi realizada de acordo com a necessidade para a obter o material requerido.

Para a obtenção e fabricação do concreto, foi analisado inicialmente a influência da dimensão do agregado graúdo e do seu volume, de acordo com a quantidade total de concreto, para garantir um concreto estável e com resistência adequada. Essa verificação utilizou os ensaios de espalhamento, Funil-V e caixa “L”. Com isso, será possível ajustar o teor de aditivos plastificantes para atender os requisitos de auto compactabilidade, sendo avaliados em relação à segregação e resistência a compressão.

Nessa pesquisa, foi realizado a fabricação de dois tipos de concreto autoadensável, para análise individual de cada um, considerando sua eficácia, disposição no mercado e principalmente, qual é mais viável para ser aplicado em obras.

Ensaio - Espalhamento (slumpflow)

O espalhamento é o método de ensaio mais popular para avaliação das propriedades do concreto autoadensável. Com ele, é possível obter informações de fluidez e a trabalhabilidade de preenchimento em fluxo livre em sua aplicação.

O teste de espalhamento, utiliza o mesmo aparato para realização do ensaio de abatimento do concreto convencional, realizado pelo teste cone de Abrams. A diferença deles, é a forma de aplicar o concreto na forma e na dimensão da base da chapa.

O molde deverá estar limpo e umedecido, centralizado e fixado com os pés nas aletas, após isso pode iniciar o preenchimento do mesmo.

O resultado é determinado pela média aritmética de duas medidas de diâmetro, perpendiculares. A tabela 1 e figura 2, demonstra as classes de espalhamento durante o ensaio.

Tabela 1 – Classes de espalhamento – *Slumpflow*.

Classe	Espalhamento (mm)
SF1	550 a 650
SF2	660 a 750
SF3	760 a 850

Fonte: NBR 15823-2 (2010).

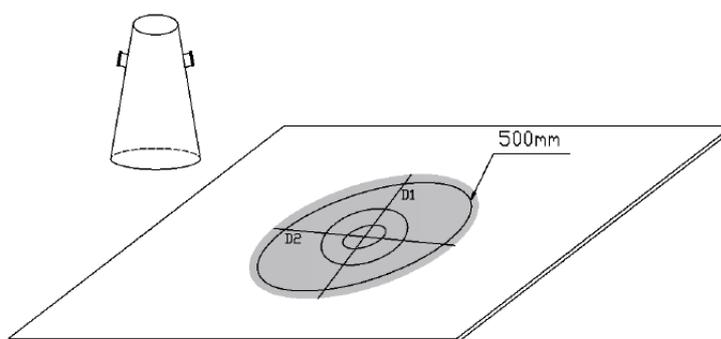


Figura 2 – Ensaio de espalhamento. **Fonte:** NBR 15823-2 (2010).

Sendo as classes SF1, SF2 e SF3, prescritas pela NBR 15823-2 (2010), levando em consideração o tipo de estrutura e armaduras a serem concretadas. Espalhamentos abaixo do limite inferior, indicam que o concreto está pouco fluido, sendo necessário uso de água ou superplastificante para fluidificar o material, já, se a medida estiver acima do limite superior, é necessário tornar o concreto mais coeso, para que não haja segregação.

Tempo de Espalhamento

Segundo Tutikian (2004), T500 (tempo de escoamento) é usado para avaliar viscosidade do concreto muito fluido. O CAA com baixa viscosidade apresenta um rápido espalhamento, porém, de curta duração. Por sua vez, o CAA com alta viscosidade se move de forma mais lenta e progressiva por um tempo mais longo.

O procedimento deste ensaio é realizado junto ao espalhamento, sendo feito um círculo de 500 mm de diâmetro centrado na base e cronômetro.

O cronômetro é acionado assim que o cone é erguido verticalmente. O resultado do T500 é o intervalo de tempo em segundos, do início ao final do escoamento do concreto, a partir do diâmetro do molde (200mm) até a marca circular (500mm) da placa base.

As classes de concreto do ensaio são VS1 e VS2, segundo NBR 15823 (2010). Concretos de classe VS1 são adequados a elementos estruturais com alta densidade de armadura, definem maior controle de exsudação e segregação, entanto, a classe VS2 é adequada para maioria das aplicações correntes, podendo apresentar efeitos negativos, com relação á superfície de acabamento, em preenchimento de cantos e demora entre sucessivas camadas

Ensaio - Funil-V

Basicamente, este ensaio é realizando preenchendo-se um funil de seções retangulares com o concreto autoadensável, aferindo- se o tempo gasto para o escoamento total da mistura. Simula uma avaliação da capacidade do concreto em passar por seções estreitas e também um indicador da viscosidade deste concreto. A relação água/cimento é diretamente proporcional ao tempo de escoamento no funil. O aumento no teor de superplastificante não gera grande influência no tempo de fluidez por este ensaio.

A resistência à segregação pode ser avaliada neste ensaio, através da repetição do processo 5 minutos após a primeira determinação, verificando se houve um acréscimo de tempo em relação a medida inicial acima de 3 segundos (EFNARC, 2002). A figura 3 demonstra o funil e suas medidas, para realização do teste.

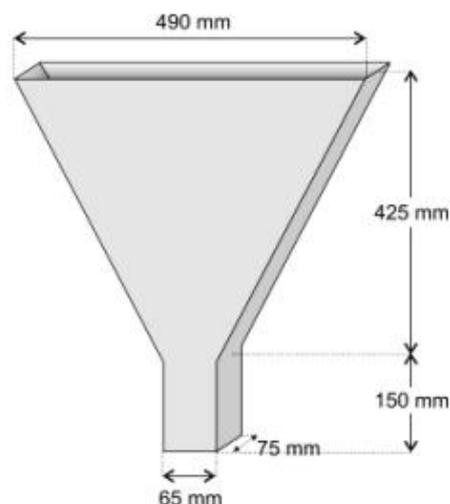


Figura 3 – Funil-V. **Fonte:** Alencar (2008)

Ensaio – Caixa “L”

A determinação final deste ensaio é testar a capacidade do concreto em passar por restrições, simulando as armaduras, bem como sua deformabilidade, resistência de bloqueio e segregação.

A parte vertical da Caixa “L” é preenchida, permitindo a passagem do material para a parte horizontal, até este escoar pelas barras verticais existentes, como ilustrado na figura 4. Também é possível medir o tempo decorrido para que o concreto atinja as distâncias de 20 e 40 cm no eixo horizontal, sendo definidos como adequados, tempos entre 1 e 2 segundos (GOMES, 2002).

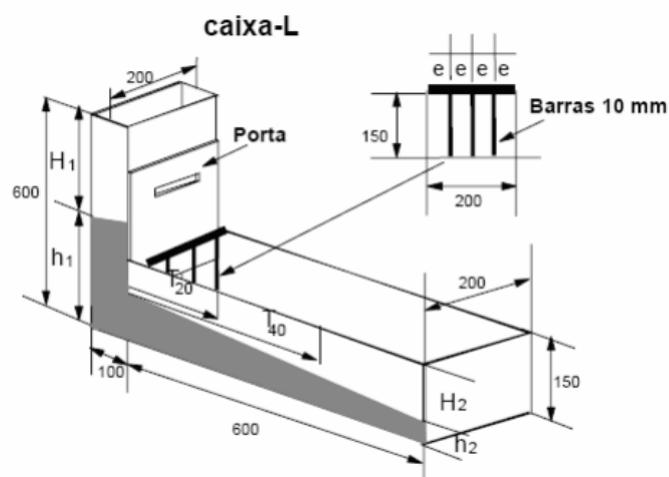


Figura 4 – Ensaio em Caixa “L”. **Fonte:** EFNARC (2002)

Ensaio de resistência a compressão

O teste de resistência do concreto foi feito pelo método do ensaio de compressão axial, demonstrados pelas fórmulas abaixo:

$$f_c = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot D^2}$$

Fonte: NBR 5739 (2018)

Onde:

f_c é a resistência a compressão em (MPa)

F é a força máxima alcançada em (N)

D é o diâmetro do corpo de prova em (mm)

Após conclusão dos ensaios de ruptura, foram feitos os cálculos de resistência média alcançada pelos rompimentos dos CP's através da fórmula abaixo.

$$f_{cm} = \sum \frac{f_{c1} + f_{c2} + \dots + f_{cn}}{n}$$

Fonte: NBR 5739 (2018)

Por recomendação da norma, NBR 5739 (2018), foi feito a estatística de desempenho descrita no anexo B, partindo do desvio padrão descrita abaixo:

$$S_c = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (f_i - f_{cm})^2}$$

Fonte: NBR 5739 (2018)

Onde:

f_{cm} é a média das resistências encontradas em (MPa)

f_i é o valor de cada resistência em (MPa)

n é o numero de exemplares

UniSALESIANO – Centro Universitário Católico Salesiano Auxilium

Com o desvio padrão calculado, foram feitos novamente os cálculos de f_{ck} para cada traço produzido, sendo adotado a seguinte fórmula.

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65 \cdot S_c$$

Fonte: NBR 5739 (2018)

Onde:

f_{cm} é resistência média a compressão de concreto, em megapascal (MPa)

f_{ck} é resistência característica a compressão de concreto, em megapascals (MPa)

S_c é o desvio-padrão, em megapascal (MPa)

$$f_{ck} =$$

Obtido o valor da resistência média do cálculo, esse valor é aplicado nas fórmulas abaixo e encontramos os tempos de ensaio.

$$T, \text{mínimo} = \frac{f_{cm}}{0,3} =$$

$$T, \text{máximo} = \frac{f_{cm}}{0,6} =$$

Os divisores 0,3 e 0,6 são valores fixados para determinação do tempo mínimo e máximo de carregamento aplicado nos corpos de prova no momento do rompimento.

Logo em seguida foi realizado cálculos para estimativa de cada concreto, utilizando a formula abaixo:

$$S_e = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{d_2 \cdot n_i}$$

Fonte: NBR 5739 (2018)

Onde:

A_i é amplitude de valores de resistência em (MPa)

d_2 é o coeficiente relacionado ao número de CP's

Revista eSALENG – Revista Eletrônica das Engenharias do UniSALESIANO. Vol.10, n1, 2022.

n_i é o número de exemplares da amostra

Com o valor de Se , é possível aplicar em formula para calcular valores de coeficiente de variação de ensaio (CVe), que foi encontrado na divisão dos valores Se e f_{cm} , representados na formula abaixo.

$$CVe = \frac{Se}{f_{cm}}$$

Fonte: NBR 5739 (2018)

Resultados e discussões

A execução dos ensaios iniciou-se com a seleção dos materiais. Essa etapa foi realizada com a escolha dos agregados, inicialmente foi selecionado visualmente a areia média e brita 0. Em seguida foi realizado o peneiramento da areia para obtenção da granulometria correta de acordo com a NBR 7211 (2009). Todos os materiais foram pesados de acordo com o traço estabelecido a partir dos testes, em seguida foram adicionados na betoneira onde foi realizado a mistura dos materiais.

Foi realizado o primeiro ensaio, utilizando um traço já calculado e usado por algumas construtoras da região, o qual dispensa a utilização de aditivos. Após estudar as características do aditivo hiperplastificante da linha MasterGlenium, foi possível a fabricação de um segundo traço que utiliza o aditivo que foi escolhido pelo fato de ser compatível com todos os tipos de cimento Portland, possuir uma alta taxa de redução de água, não alterar o tempo de pega do cimento, facilitar o adensamento e lançamento do concreto, permitir a redução do cimento, permitir a redução da permeabilidade e retração, fatores indispensáveis para fabricação do concreto autoadensável.

A fabricação do traço foi realizada através de testes, primeiramente utilizando o traço empírico 1:3:3, utilizado em estruturas convencionais, de acordo com a NBR 6118 (2014). Após esse processo, foi observado por meio dos testes de espalhamento e Caixa “L” que o traço precisava de alterações para se adequar nas exigências da NBR 15823 (2010) na fabricação e aplicação do concreto autoadensável. Conforme a análise, foi feita a alteração da quantidade de materiais, até alcançar resultados aceitáveis nos respectivos

testes. A tabela 2, demonstra o traço do concreto autoadensável com aditivo e do concreto autoadensável que dispensa o uso de aditivo.

Tabela 2: Traço para produção.

Descrição	Cimento(kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (l)	Aditivo(ml)
Com aditivo	1	2,03	2,08	0,625	0
Sem aditivo	1	2,90	2,95	0,469	70

Fonte: Autor

Tempo de mistura

Conforme padrão estabelecido para mistura de materiais e capacidade total da betoneira de conforme figura 17, foi adotado uma sequência para mistura de todos os materiais, onde foram seguidos e realizados conforme a NBR 7212 (2012)

- 1º etapa: Ligar a betoneira e colocar a brita junto com metade da quantidade prescrita de água, deixando girar por um minuto.
- 2º etapa: Colocar aos poucos a quantidade de cimento determinada para a quantidade de concreto prevista.
- 3º etapa: Adicionar a areia incluindo, ao mesmo tempo, a segunda metade da quantidade de água.
- 4º etapa: Deixar girar por 3 minutos.



Figura 5- Betoneira em produção. **Fonte:** Autor

Espalhamento (slumpflow)

Realizada em uma placa de madeirite resinada com espessura de 12mm, que foi apoiada ao solo garantindo o nivelamento e realizado as marcações de 200mm de diâmetro e 500mm de diâmetro. Com o cone de Abrams apoiado no centro da chapa foi adicionado o concreto até a sua face superior, com cronometro posicionado para início do ensaio.

Foi adotado o tempo de escoamento a partir do teste de espalhamento. O tempo foi obtido iniciando o cronômetro quando o concreto atingiu 200mm de diâmetro e encerrado quando alcançou 500mm. O tempo adquirido pelos traços estão demonstrados na tabela 3.

Tabela 3: Resultados do ensaio de espalhamento

Descrição	Classe	Tempo (s)
Concreto com aditivo	VS1	1,15
Concreto sem aditivo	VS1	0,8

Fonte: Autor

Além do tempo de escoamento, é necessário a conferência do diâmetro que o concreto que o concreto espalhou, assim como na figura 6. É necessário um espalhamento maior que 600mm e até 850mm para atingir uma habilidade de preenchimento adequada durante a concretagem. Espalhamento abaixo do limite inferior, indica que o concreto está pouco fluido, sendo necessário adição de água ou aditivo para fluidificar o material. Caso a medida estiver acima do limite superior, é necessário tornar o concreto mais coeso, para que não haja segregação. A tabela 4 e figura 6 mostra os resultados obtidos a partir do ensaio.



Figura 6- Resultados do ensaio de espalhamento. **Fonte:** Autor**Tabela 4:** Resultados do ensaio de espalhamento

Descrição	Classe	Diâmetro (mm)
Concreto com aditivo	SF1	620
Concreto sem aditivo	SF1	650

Fonte: Autor

Cavalcanti (2006) realizou o ensaio de espalhamento alcançando 770mm (SF3) de diâmetro após o cone de Abrams ser levantado utilizando 0,81 segundos para atingir a marca de 500mm. Os resultados obtidos pelos dois traços do trabalho e pelo autor Cavalcanti (2006) estão de acordo com a NBR 15823-2 (2010), sendo identificado como elementos adequados para estruturas com alta densidade.

Funil - V

Para a realização do ensaio foi fabricado um funil de placa de madeirite renisada com espessura de 12mm conforme figura 7. O concreto foi adicionado com ajuda de um recipiente plástico até a face superior do funil para se realizar o ensaio conforme figura 8. O ensaio foi realizado com os dois traços de concreto autoadensável e com o cronômetro posicionado, em seguida erguido o funil -V verticalmente, foi marcado o tempo de escoamento e logo após 5 minutos foi realizado o mesmo teste para garantir que não teve acréscimo de tempo do escoamento superior a 3 segundos, com nível de aceitação de 6 a 12 segundos a medida utilizada (EFNARC, 2002).



Figura 7- Funil - V fabricado. **Fonte:** Autor**Figura 8-** Funil - V realizando ensaio. **Fonte:** Autor

Esse ensaio simula uma avaliação da capacidade do concreto em passar por seções estreitas e indicador da viscosidade do material. O resultado obtido pelos dois traços está demonstrado na tabela 5.

Tabela 5 -Resultados do ensaio de funil - V

Descrição	1º ensaio (tempo s)	2º ensaio, após 5 minutos (tempo s)
Concreto com aditivo	7	9,2
Concreto sem aditivo	6,4	8,5

Fonte: Autor

Cavalcanti (2006) obteve um tempo de 10 segundos para a primeira realização do teste e após 5 minutos foi refeito o ensaio, onde obteve um acréscimo de 2 segundos, resultando em 12 segundos. Christiane Meneses (2006) também executou o ensaio do funil-V, primeiramente obteve um resultado 7 segundos e contabilizado 5 minutos para refazer o teste obteve o tempo de 12 segundos. Os dois autores atingiram o nível de aceitação do ensaio, assim como os resultados que foram alcançados e demonstrados na tabela 5.

Caixa “L”

Para a realização do ensaio foi fabricado uma caixa “L” com capacidade de 14 litros, utilizando uma placa de madeirite renisada com espessura de 12mm. Foi necessário marcar a caixa com as medidas de 20 cm e 40 cm para análise durante o ensaio. Foi inserido 5 barras com diâmetro de 8mm na parte vertical da caixa, afim de demonstrar a passagem do concreto pelas armaduras, conforme demonstrado na figura 9.



Figura 9- Caixa “L”. **Fonte:** Autor

Logo após produzir o traço, a parte vertical da caixa foi preenchida com o concreto até a sua face superior e foi acionado e encerrado o cronômetro entre as marcações para obter o resultado do teste. De acordo com Gomes (2002), o concreto deve atingir um tempo de escoamento entre 1 e 2 segundos, respectivamente nas medidas que foram citadas. Com abertura da chapa que impedia o escoamento foi possível visualizar a capacidade do concreto em ultrapassar as armaduras, assim como mostra a figura 10.

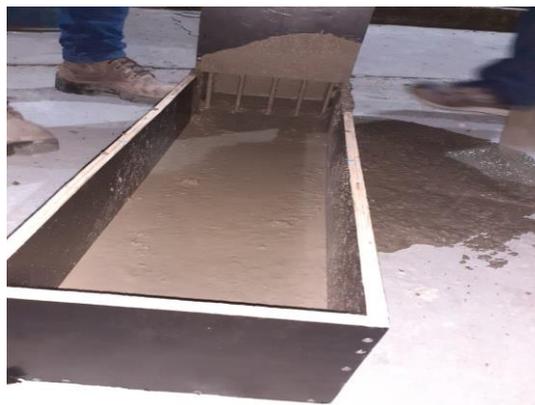


Figura 10 - Caixa “L” durante o ensaio. **Fonte:** Autor

Cavalcanti (2006) realizou o ensaio da Caixa “L” e obteve o tempo de 1,2 segundos na marca de 20cm e 2 segundos na marca de 40cm. O ensaio de Christiane Menezes (2006) obteve o tempo de 1,35 segundos na marca de 20cm e 2 segundos na marca de 40cm, podendo ser considerado resultados aceitáveis de acordo com Gomes (2002). Os resultados listados na tabela 6, permite confirmas a capacidade dos traços executados no trabalho em passar por restrições, bem como sua deformabilidade, resistência do bloqueio e resistência a segregação.

Tabela 6- Resultados do ensaio caixa “L”

Descrição	Resultado	Tempo de escoamento com 20cm (s)	Tempo de escoamento com 40cm (s)	Quantidade de concreto (l)
Concreto com aditivo	>1 e <2	1,2	1,62	14
Concreto sem aditivo	>1 e <2	1,1	1,33	14

Ensaio de resistência a compressão

O teste de resistência do concreto foi feito pelo método do ensaio de compressão axial. Os CP's foram retirados com 7, 14 e 28 dias, em seguida foi levado para realização dos ensaios no laboratório, onde foi nivelado as superfícies para que encaixe perfeitamente na máquina para realização do ensaio.

A máquina exerce uma força gradual de compressão sobre o CP até que o mesmo venha a romper conforme figura 11, a força exercida é dividida pela área do topo do CP em cm^2 , sendo necessário a medição de cada amostra. Não foi realizada a medição individual de cada amostra, sendo assim foi adotado a medida padrão de 100mm^2 . Foi obtido a relação da força em Newton (exercido pela máquina) por cm^2 , que para obter em MPa, aplicando as fórmulas, alcançando os resultados conforme tabela 7 e 8.

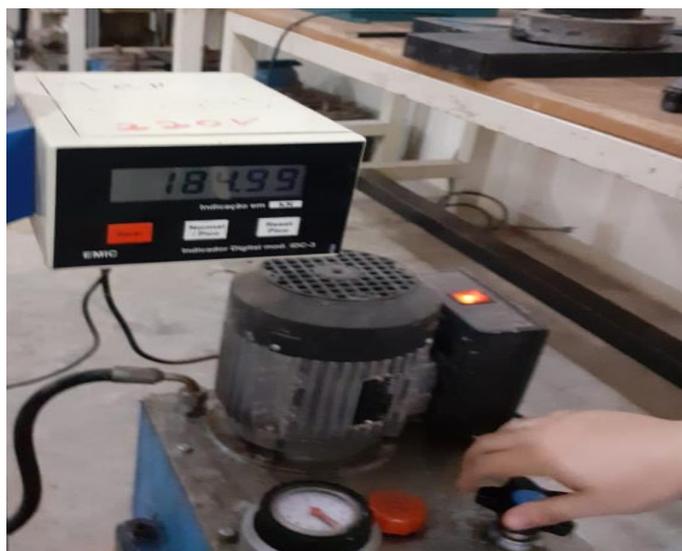


Figura 11 - Corpos de provas em ensaio. **Fonte:** Autor

Tabela 7 - Resultados do teste de compressão concreto com aditivo

Concreto	Tempo de rompimento (dias)	Carga de ruptura (N)	Resistência calculada (MPa)	Tempo de rompimento (s)	Taxa calculada (MPa/s)
Concreto com aditivo	7	154780	19,70	52	0,38
Concreto com aditivo	14	162420	20,67	65	0,32
Concreto com aditivo	28	193172	24,98	71	0,35

Fonte: Autor

Tabela 8 - Resultados do teste de compressão concreto sem aditivo

Concreto	Tempo de rompimento (dias)	Carga de ruptura (N)	Resistência calculada (MPa)	Tempo de rompimento (s)	Taxa calculada (MPa/s)
----------	----------------------------	----------------------	-----------------------------	-------------------------	------------------------

Concreto sem aditivo	7	17630	22,45	65	0,34
Concreto sem aditivo	14	18199	23,17	61	0,38
Concreto sem aditivo	28	18983	24,16	63	0,38

Fonte: Autor

Após conclusão dos ensaios de ruptura, foram feitos os cálculos de resistência média alcançada pelos rompimentos dos CP's, já mencionados na tabela 7 do concreto com aditivo, e na tabela 8 com concreto sem aditivo. Para análise das amostras, foram executados 2 traços diferentes de concreto, sendo assim, foi realizado os cálculos individualmente de acordo com a NBR 5739 (2018). É permitido obter uma taxa de até 0,40MPa/s durante o rompimento de cada amostra.

Amostras após o 28 dia de cura

1) Concreto com aditivo

$$f_{cm} = \frac{(19,70+20,67+24,98)}{3} = 21,78 \text{ (MPa)}$$

2) Concreto sem aditivo

$$f_{cm} = \frac{(22,45+23,17+24,16)}{3} = 23,26 \text{ (MPa)}$$

Por recomendação da norma, NBR 5739 (2018), foi feito a estatística de desempenho descrita no anexo B, partindo do desvio padrão de cada traço.

1) Concreto com aditivo

$$S_c = \sqrt{\frac{(0,28 + 0,33 + 0,4)}{3}} = 0,37 \text{ MPa}$$

2) Concreto sem aditivo

$$S_c = \sqrt{\frac{(0,32 + 0,33 + 0,35)}{3}} = 0,33 \text{ MPa}$$

O desvio padrão depende de variáveis estabelecidas pela NBR 5739 (2018).

A condição aplicável a todas classes de concreto, os agregados e o cimento e medido em massa, sendo que, a água de amassamento medido em volume.

Com o desvio padrão calculado, foram feitos novamente os cálculos de f_{ck} para cada traço produzido de acordo com a NBR 5739 (2018).

1) Concreto com aditivo

$$f_{ck, est} = 21,78 - 1,65 \cdot 0,37 = 21,17 \text{ MPa}$$

$$f_{ck, est} = 21,17 > 20 \text{ MPa}$$

2) Concreto sem aditivo

$$f_{ck, est} = 23,26 - 1,65 \cdot 0,33 = 22,71 \text{ MPa}$$

$$f_{ck, est} = 22,71 > 20 \text{ MPa}$$

Os valores do coeficiente d2 pode ser observado na tabela 9.

Tabela 9 – Coeficiente d2

Quantidade de corpos de prova	Coeficiente d2
2	1,128
3	1,693
4	2,059
5	2,326
6	2,534

Fonte: NBR 5739 (2018)

Logo em seguida foi realizado cálculos para estimativa de cada concreto, utilizando a fórmula da NBR 5739 (2018).

Concreto com aditivo

$$S_e = \frac{(24,98 - 19,70)}{3 \cdot 1,693} = 1,039 \text{ MPa}$$

Concreto sem aditivo

$$S_e = \frac{(24,16 - 22,45)}{3 \cdot 1,693} = 0,34 \text{ MPa}$$

Com o valor de S_e , é possível aplicar em fórmula para calcular valores de coeficiente de variação de ensaio (CVe), que foi encontrado na divisão dos valores S_e e f_{cm} , de acordo com a NBR 5739 (2018).

Concreto com aditivo

$$CVe = \frac{1,039}{20,93} = 0,049 \times 100 = 4,9\% > 5\%$$

Concreto sem aditivo

$$CVe = \frac{0,34}{23,26} = 0,01 \times 100 = 1\% \leq 3\%$$

Desse modo, os dois concretos que foram analisados, o valor dos coeficientes de variação encontrado é 4,9% para o concreto com aditivo, sendo avaliado como nível de variação bom, de acordo com NBR 5739 (2018) e o concreto sem aditivo obteve um nível de variação de 1%, considerado excelente. Analisando também os outros coeficientes, observa-se que os 2 concretos estão de acordo com a norma NBR 5739 (2018).

Com o valor de CVe , podem ser comparados na Tabela 10 que é fornecida em anexo da norma e determina os níveis de análises.

Tabela 10– Coeficiente de variação **Fonte:** NBR 5739 (2018)

Coeficiente de variação (cve) %				
Nível 1 (excelente)	Nível 2 (muito bom)	Nível 3 (bom)	Nível 4 (razoável)	Nível 5 (deficiente)
$cve \leq 3,0$	$3,0 < cve \leq 4,0$	$4,0 < cve \leq 5,0$	$5,0 < cve \leq 6,0$	$cve > 6,0$

Rompimento dos corpos de prova

Com os corpos de prova rompidos, foi possível detectar quais tipos de fissuras os traços foram submetidos. Nessa etapa foi possível observar que ambos obtiveram ruptura por esmagamento, causadas pela falta de adensamento quando o concreto foi lançado nos CP's.

O gráfico 1 possibilita a comparação da variação do ganho de resistência à compressão axial do concreto com uso de aditivo, concreto sem uso de aditivo e concreto ensaiado Tutikian (2004).

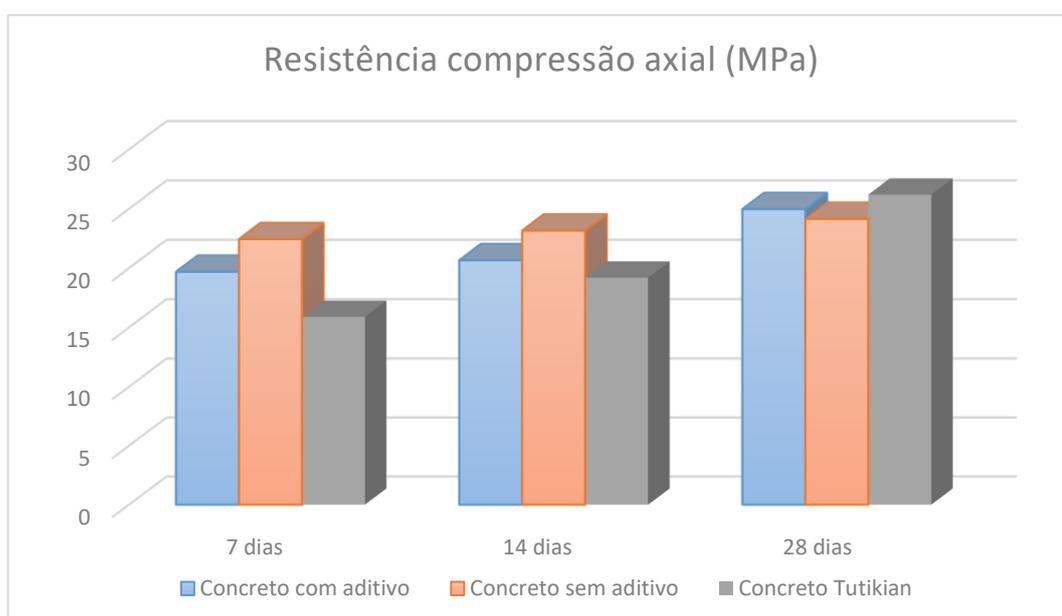


Gráfico 1 – Comparação do ganho de resistência com Tutikian (2004).

Fonte: Autor

Com os corpos de prova rompidos, foi possível detectar quais tipos de fissuras os traços foram submetidos. Nessa etapa foi possível observar que ambos obtiveram ruptura por esmagamento, causadas pela falta de adensamento quando o concreto foi lançado nos CP's. A falta de adensamento dos componentes do concreto, causa a segregação dos agregados, tornando a seção do centro ou seção inferior da amostra mais resistente que a superior, resultando em fissurações nas extremidades da mesma. A figura 12 permite observar a ruptura do concreto que utiliza aditivo plastificante e a figura 13 do concreto que dispensa o uso de aditivo.



Figura 12 – Ruptura causada por esmagamento. **Fonte:** Autor



Figura 13 – Ruptura causada por esmagamento. **Fonte:** Autor

Esse resultado implicou na resistência do traço, pois se a etapa do adensamento do concreto nos corpos de prova fosse realizada com êxito, evitaria a segregação de seus componentes possibilitando a obtenção de uma maior resistência a cargas de compressão. A resistência a segregação está relacionada com a carga que a amostra suporta até seu rompimento.

Conclusão

Na análise em relação aos dois traços de concreto ensaiado, foi possível identificar que ambos apresentaram todos os requisitos do autoadensável. Também foi observado a semelhança entre as resistências adquiridas no 28º dia de idade de cura dos concretos, onde o concreto com aditivo e menor teor de cimento alcançou

a resistência à compressão axial de 24,98 Mpa e o concreto sem aditivo e com maior teor de cimento alcançou 24,16 Mpa.

Com isso é possível afirmar que mesmo possuindo uma quantidade inferior de cimento, o qual garante a resistência do concreto, não resultou em um material menos resistente. A diferença é que o concreto sem aditivo possui uma pega acelerada, devido seu alto teor de aglomerantes (cimento), resultando em um material com alta resistência inicial.

O concreto que é caracterizado pelo uso de aditivo obteve resultados mais favoráveis nos demais ensaios que foram realizados apesar de possuir um coeficiente de variação maior, pois foi possível identificar visualmente que o traço citado permitiu que o concreto resultasse em um material mais fluído, homogêneo, coeso e com melhor desempenho em relação a trabalhabilidade.

Foi observado que o risco de segregação dos materiais compostos foi reduzido. Além disso, possibilitou a economia durante sua fabricação devido a redução da utilização de aglomerantes no traço, o qual analisado em grande escala, torna-se mais viável o uso do aditivo é capaz de substituir a necessidade de utilizar uma quantidade elevada de cimento.

Referências Bibliográficas

ALENCAR, R. S. A. **Dosagem do concreto autoadensável: produção de pré-fabricados**. 2008. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2008. Acesso em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-19092008-161938/ptbr.php>, acesso em 20 mai 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT **NBR 5739**: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 9 p. Acesso em 13 de junho de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p. Acesso em 16 de maio de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT **NBR 7211**: Agregado no estado solto. Rio de Janeiro, 1982. 11 p. Acesso em 22 de agosto de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT **NBR 15823**: Concreto autoadensável. Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010. 11 p. Acesso em 19 de abril de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 15823**: Concreto autoadensável. Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de Abrams. Rio de Janeiro, 2017. 5 p. Acesso em 19 de abril de 2019

BASF. Sistema de concreto autoadensável. **Master Builders Solutions**, [s. l.], ed. 3, p. 4-8, 2018. Disponível em: <https://www.master-builders-solutions.basf.com.br/>. Acesso em: 1 mar. 2019.

CAVALCANTI, Diogo. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto autoadensável e sua aplicação em elementos estruturais**. 2006. 141 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2006. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/bitstream/riufal/.pdf>. Acesso em: 3 de maio de 2019.

COPPOLA, L. **Reologia e proporções do concreto autoadensável**. Indústria Italiana do Cimento, v. 71, p. 56-64. 2001.

EFNARC. European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. **Especificações para concreto autoadensável**, Reino Unido, p. 12-21, 2002. Disponível em: <http://www.efnarc.org/pdf/SandGforSCC.PDF>. Acesso em: 4 ago. 2019

GOMES, P. C. C. **Otimização e caracterização do concreto autoadensável**, 2002. 139p. Tese (Doutorado), – Universidade Politécnica da Catalúnia, Barcelona, Espanha, 2002.

KHAYAT, K. H. **Teste e performance de auto consolidação do concreto**. *Jornal ACI Materiais*, v. 94, n. 4, p. 346-353, 12 out. 1999.

KHAYAT, K. H. **Otimização e performance do concreto autoadensável**. *Jornal ACI Materiais*, v. 97, n. 4, p. 526-535, 4 fev. 2000.

MENEZES, C. M. **Concreto autoadensável utilizando metacaulim e pó de pedra como adições minerais**. 2006. 121p. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5596/1/arquivo6222_1.pdf. Acesso em: 22 de setembro de 2019.

NUNES, S. C. B. **BetãoAuto-compactável: Tecnologia e Propriedades**. Pós-Graduação em Estruturas de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia do porto, Porto, 2001, p.198.

OKAMURA, H. **Auto compactação do concreto**. *Concreto Internacional*, v.19, p. 50-54, 1997.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos autoadensáveis**. 2004. 230p. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3918/000450678.pdf>. Acesso em 09 de julho de 2019.