

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO – UFPE

Emerson Felix Donato Paulino
Ramon Soares Gomes

A COMPARAÇÃO DE TRÊS ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES NA
DOSAGEM DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM 10% DE
METACAULIM

Recife, 2015

Emerson Felix Donato Paulino
Ramon Soares Gomes

A COMPARAÇÃO DE TRÊS ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES NA
DOSAGEM DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM 10% DE
METACAULIM

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Universidade Federal
de Pernambuco para obtenção do título
de bacharel em Engenharia Civil

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Prof. Arnaldo Manoel Pereira
Carneiro

Recife, 2015

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

P328c Paulino, Emerson Felix Donato.

A comparação de três aditivos superplastificantes na dosagem de concreto autoadensável com 10% de metacaulim / Emerson Felix Donato Paulino e Ramon Soares Gomes. - Recife: O Autor, 2015.
49 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia Civil, 2015.
Inclui Referências

1. Engenharia Civil. 2. Metacaulim. 3. Dosagem. 4. Concreto autoadensável. I. Gomes, Ramon Soares. II. Carneiro, Arnaldo Manoel Pereira. (Orientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2015-126

ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL

CANDIDATO(S) : 1 – Emerson Felix Donato Paulino
2 – Ramon Soares Gomes

BANCA EXAMINADORA:

Orientador: Arnaldo Manoel Pereira Carneiro

Examinador 1: Jefferson Wellano Oliveira Pinto

Examinador 2: Leonardo Correia de Oliveira

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: A COMPARAÇÃO DE TRÊS ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES NA DOSAGEM DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM 10% DE METACAULIM

LOCAL: Centro de Tecnologia e Geociências, 01/04/2015 **HORÁRIO DE INICIO:** 15 horas

Em sessão pública, após exposição de cerca de.....minutos, o(s) candidato(s) foi (foram) argüido(s) oralmente pelos membros da banca, sendo considerado(s):

1) (x) aprovado(s), pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito

() Sem revisões.

(x) Com revisões, a serem feitas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias.(o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).

2) (..) reprovado(s).

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo(s) candidato(s).

Recife, 01 de abril de 2015

Orientador:.....

Examinador 1.....

Examinador 2.....

Candidato 1.....

Candidato 2

Dedicamos este trabalho a
nossos pais, familiares e
amigos que nos apoiaram em
todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

A Polimix Agregados Ltda, na pessoa do Eng.^o Magno Silva pela doação dos agregados graúdos.

A Polimix Concreto Ltda, na pessoa do Eng.^o Protásio pela doação do cimento CP V ARI RS.

A Supermix Concreto Ltda, na pessoa do Eng.^o Alisson pela doação do agregado miúdo.

Aos fabricantes do aditivo superplastificante A, B e C não citados por questão de profissionalismo.

Aos técnicos do Laboratório de Estrutura e Materiais da UFPE, Ezequiel Muniz de Siqueira e João Maria Cazuza da Costa, pelo apoio na realização dos ensaios no laboratório.

A Deus, autor de todas as coisas, que é o Senhor da vida.

“Há três métodos para ganhar a sabedoria
primeiro, por reflexão, que é o mais nobre;
segundo, por imitação, que é o mais fácil;
e terceiro, por experiência, que é o mais amargo.”
(Confúcio)

RESUMO

O concreto autoadensável é um material que se espalha na forma sem a necessidade do adensamento. Este concreto demanda uma quantidade maior de materiais finos, que são constituídos pelo cimento e adições minerais, em comparação com o concreto convencional. O concreto autoadensável também necessita de uma quantidade menor de agregados e da utilização de aditivo superplastificante. A adição mineral utilizada neste trabalho foi o metacaulim, em substituição de 10% da massa de cimento. O tipo de cimento empregado foi o CP V ARI RS e três aditivos superplastificante de base policarboxilatos. Os agregados graúdos utilizados foram o pó de brita e britas de dimensão máxima de 12 mm e 19 mm, respectivamente B0 e B1. Misturaram-se os agregados graúdos em porcentagens variadas para obter a melhor curva granulométrica. Após a obtenção da curva ideal, realizaram-se dosagens para cada tipo de aditivo com a adição mineral e sem a substituição do metacaulim. Avaliou-se o concreto através dos requisitos de auto-compactabilidade por meio dos ensaios de espalhamento e V-Funil. Foram realizados ensaios de resistência à compressão aos 7 e 28 dias. Os aditivos superplastificantes A, B e C apresentaram teor de sólidos de 48%, 55% e 25%, respectivamente. A relação água cimento (a/c) dos concretos variou entre 0,35 e 0,56. Os resultados no ensaio de espalhamento das dosagens sem metacaulim foram, em ordem crescente, a seguinte: $C > A > B$. Os resultados com o uso de metacaulim foram: $A > C > B$. No tempo para atingir 50 cm de espalhamento os concretos sem metacaulim tiveram os maiores resultados. No ensaio do V-Funil, os concretos do aditivo A e C com metacaulim apresentaram resultados maiores que o concreto sem metacaulim e o concreto com aditivo B apresentou maiores resultados sem a utilização do metacaulim. A resistência aos 28 dias dos concretos com aditivo A e C com metacaulim foram maiores que as dosagens sem metacaulim, já a dosagem com aditivo B apresentou resultados melhores sem a utilização de metacaulim.

Palavras-chave: metacaulim, dosagem, concreto autoadensável.

ABSTRACT

The self-compacting concrete is a material that spreads in the mold without the need for densification. This particular demand for a greater amount of fines, which are formed by the cement and mineral additions as compared to conventional concrete. The self-compacting concrete also requires a smaller amount of aggregates and use of superplasticizer. The mineral admixture used in this work was the metakaolin in 10% of the cement mass substitution. The type of cement used was the CP V ARI RS and three superplasticizer additives polycarboxylates base. The coarse aggregate used were crushed rock dust and stones of maximum dimension of 12 mm and 19 mm, respectively B0 and B1. Were mixed three types of gravel in varying percentages for optimum granulometric curve. After obtaining the ideal curve, measurements were carried out for each type of mineral admixture with the additive and without the replacement of metakaolin. Evaluated the concrete through the self-compacting requirements through scattering tests and funnel-V. Resistance tests were performed to compression at 7 days and 28 days. The superplasticizer additives A, B and C had a solids content of 48%, 55% and 25%, respectively. The w / c ratio of the concrete varied between 0.35 and 0.56. The results in the test scattering of dosages without metakaolin were, in ascending order, as follows: C > A > B. The results with the use of metakaolin were: A > C > B. In the time to reach 50 cm of concrete spreading without metakaolin had the greatest results. In the V-funnel test, the concrete additive A and C with metakaolin showed higher results than the concrete without metakaolin and the concrete with additive B showed better results without the use of metakaolin. The resistance at 28 days of concrete with additive A and C were greater than metakaolin dosages without metakaolin, since dosing with additive B showed better results without the use of metakaolin.

Keywords: metakaolin, dosage, self-compacting concrete.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resistência à compressão do concreto utilizado no Artigo 1.....	14
Tabela 2: Resistência à compressão do concreto utilizado no Artigo 2.....	14
Tabela 3: Dados das dosagens do concreto utilizado no Artigo 3.....	15
Tabela 4: Ensaio no estado fresco e endurecido do concreto do Artigo 3.....	15
Tabela 5: Ensaio de espalhamento do concreto do Artigo 4.....	16
Tabela 6: Resistência à compressão do concreto do Artigo 4.....	16
Tabela 7: Agregados graúdos e características.....	20
Tabela 8: Distribuição granulométrica da mistura I.....	21
Tabela 9: Distribuição granulométrica da mistura II.....	22
Tabela 10: Distribuição granulométrica da mistura III.....	23
Tabela 11: Distribuição granulométrica da mistura IV.....	24
Tabela 12: Distribuição granulométrica da mistura V.....	25
Tabela 13: Características físicas do agregado miúdo.....	27
Tabela 14: Características dos Aditivos.....	28
Tabela 15: Ensaio piloto da Mistura I.....	34
Tabela 16: Ensaio piloto da Mistura III.....	34
Tabela 17: Ensaio piloto da Mistura IV.....	35
Tabela 18: Ensaio piloto da Mistura V.....	35
Tabela 19: Ensaio com metacaulim e aditivo A.....	37
Tabela 20: Ensaio sem metacaulim e aditivo A.....	38
Tabela 21: Ensaio com metacaulim e aditivo B.....	38
Tabela 22: Ensaio sem metacaulim e aditivo B.....	38
Tabela 23: Ensaio com metacaulim e aditivo C.....	39
Tabela 24: Ensaio sem metacaulim e aditivo C.....	39
Tabela 25: Custo dos materiais para a cidade de Recife no mês de abril de 2015.....	46
Tabela 26: Composição de 1,0 m ³ de CAA com os consumos de cada material.....	46
Tabela 27: Relação entre resistência e custo do material.....	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curva granulométrica da Brita 0.....	20
Figura 2: Curva granulométrica da Brita 1.....	20
Figura 3: Curva granulométrica da mistura I.....	22
Figura 4: Curva granulométrica da mistura II.....	23
Figura 5: Curva granulométrica da mistura III.....	24
Figura 6: Curva granulométrica da mistura IV.....	25
Figura 7: Curva granulométrica da mistura V.....	26
Figura 8: Curva granulométrica das misturas.....	26
Figura 9: Teste de espalhamento (dimensões em mm).....	31
Figura 10: Ensaio do V-Funil (dimensões em mm).....	32
Figura 11: Produção do CAA.....	36
Figura 12: Ensaio de espalhamento.....	36
Figura 13: Teste do V-Funil.....	37
Figura 14: Resultados do espalhamento.....	40
Figura 15: Resultados do tempo de espalhamento.....	41
Figura 16: Resultados do tempo do V-Funil.....	42
Figura 17: Resultados do ensaio de resistência à compressão.....	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	RESUMO DA LITERATURA	13
3	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	18
3.1	Materiais	18
3.1.1	Cimento	18
3.1.2	Metacaulim	19
3.1.3	Agregado graúdo	19
3.1.4	Agregado miúdo	27
3.1.5	Aditivos Superplastificantes	27
3.1.6	Água	29
3.2	Ensaio	29
3.2.1	Estado Fresco	29
3.2.1.1	Ensaio de Espalhamento (Slump Flow Test)	30
3.2.1.2	Ensaio do V-Funil	31
3.2.2	Estado Endurecido	33
3.3	Ensaio Piloto	33
3.4	Ensaio Definitivo	35
4	RESULTADO E ANÁLISE	40
5	CONCLUSÕES	45
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

O concreto autoadensável (CAA) é um concreto que se espalha na fôrma por meio do seu próprio peso, não necessitando do uso de vibrador. Logo, têm-se pouco ruído na concretagem, uma quantidade menor de trabalhadores na concretagem da peça estrutural, redução do tempo de concretagem e uma maior qualidade da estrutura. Em comparação com o concreto convencional, o CAA necessita de uma quantidade maior de materiais finos, preferencialmente adições. Também deve ser utilizado aditivo superplastificante, reduzindo a quantidade de água na dosagem. Surgiu no Japão e vem sendo utilizado no Brasil, principalmente pelas indústrias de pré-moldados, trazendo benefícios no aumento da produtividade e o excelente acabamento superficial das peças.

O objetivo deste trabalho é a dosagem de concreto autoadensável, substituindo 10% da massa de cimento por material pozolânico (metacaulim) comparando com o concreto sem a substituição de metacaulim. Para cada traço utilizou-se um tipo de aditivo dentre os três estudados. Baseado nos resultados do estado fresco, ensaio de espalhamento e V-Funil, e no estado endurecido, através do ensaio de resistência à compressão.

Foram estudadas cinco curvas de agregado graúdo. Primeiramente, realizou-se um ensaio piloto para verificar o comportamento de cada curva de agregado graúdo que melhor se adequasse aos ensaios do estado fresco e endurecido do concreto. Sendo escolhida a mistura III, na qual é composta de 50% de Brita 1, 30% de Brita 0 e 20% de Pó de brita. No ensaio piloto utilizou-se apenas o aditivo C. Após a escolha da mistura III como o agregado graúdo a ser trabalhado, realizou-se o ensaio definitivo, que são as dosagens de concreto para cada tipo de aditivo com a substituição de metacaulim e sem a substituição de metacaulim. No ensaio definitivo verificou-se o ensaio de espalhamento, o ensaio do V-Funil e o ensaio de resistência à compressão.

2 RESUMO DA LITERATURA

A literatura sobre o uso de adições no concreto autoadensável para melhorar seu desempenho nos estado fresco e endurecido é vasta, há muitos artigos publicados em revistas e congressos, que de modo geral enfatizam a importância do uso de uma adição inerte ou pozolânica para aumentar o teor de pasta, sem aumento do consumo de cimento, por questões tecnológicas (aumento do calor de hidratação) e econômicas (custo do cimento). Diante deste fato, foram selecionados sob a orientação do Professor Arnaldo Manoel Pereira Carneiro do portal CAPES.PERIÓDICOS, quatro artigos pertinentes ao tema, que discutem o uso do metacaulim e aditivos plastificantes para o CAA. A seguir apresenta-se um resumo dos artigos.

Artigo 1: *Effect of metakaolin dispersion on the fresh and hardened state properties of concrete (Cement and Concrete Research, v.42, p. 607-612, 2012)*

Este artigo fala do uso do metacaulim nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. O metacaulim é um material pozolânico que contém em sua composição sílica amorfa. Este componente amorfo, na presença de água, reage com hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) para formar componentes com propriedades cimentícias. A inclusão de metacaulim melhora as propriedades mecânicas, a durabilidade do concreto e também melhora o envolvimento das partículas diminuindo os vazios no concreto. O metacaulim foi utilizado como uma parte do cimento na porcentagem de 10%, 20% e 30% em substituição. Utilizou-se aditivo superplastificante, com um teor de sólidos entre 28,5 e 31,5%. O tipo de cimento foi CP I, o agregado miúdo foi areia natural silicosa e o agregado graúdo foi uma mistura de brita nº 1 e 2. No estado fresco, as dosagens apresentaram um slump de 9,0 +- 1,0 cm. No estado endurecido a Tabela 1 mostra a resistência aos 7 e 28 dias. A porcentagem de aditivo é em relação à massa de cimento mais a massa de metacaulim. Na Tabela 1, apresentada abaixo, está a resistência aos 7 e 28 dias das dosagens realizadas.

Tabela 1 - Resistência à compressão do concreto utilizado no Artigo 1

Dosagem	% metacaulim	a/c	% aditivo	fc (7dias) MPa	fc (28 dias) Mpa
1	0	0,60	0	32,8	38,1
2	10	0,65	0	32,3	37,0
3	10	0,60	0,08	34,6	39,8
4	10	0,6	0,10	32,9	42,3
5	20	0,70	0	26,3	34,3
6	20	0,60	0,15	37,5	44,6
7	30	0,75	0	20,2	30,3
8	30	0,60	0,20	36,5	45,1

Artigo 2: *Mix design method for self compacting metakaolin concrete with different properties of coarse aggregate (Materials and Design, v. 53, p.691-700, 2013)*

A dosagem de CAA não é baseada na exigência de resistência como no concreto normal. No CAA a sua auto compactabilidade pode ser alcançada por um balanço entre a fluidez e a viscosidade da pasta ou argamassa, assim para aumentar a fluidez é preciso reduzir o atrito entre as partículas do agregado. A fluidez pode ser aumentada pelo uso de aditivos superplastificantes. Além disso, a redução do agregado graúdo na mistura pode reduzir a probabilidade da colisão entre as partículas dos agregados, logo aumentando a fluidez. É possível usar agregados arredondados ou esmagados para fazer CAA, contanto que tenha uma boa graduação das partículas, evitando a segregação do concreto. Neste estudo foi utilizado cimento CP I, metacaulim em substituição ao cimento na porcentagem de 5%, 10%, 15% e 20%, aditivo superplastificante com teor de sólidos de 30%, areia a base de sílica e o agregado graúdo usado foi granito esmagado com duas formas diferentes, superfície angular e arredondada. A relação a/c foi constante e igual a 0,32. Na Tabela 2 está o resumo da resistência à compressão.

Tabela 2 - Resistência à compressão do concreto utilizado no Artigo 2

Dosagem	% Metacaulim	fc (7dias) MPa	fc (28dias) MPa
1	0	59,0	76,0
2	5	83,0	91,0
3	10	81,0	95,0
4	15	71,0	91,0

Artigo 3: *Effect of metakaolin content on the properties self-consolidating lightweight concrete (Construction and Building Materials, v.31, p. 320-325, 2012)*

Este artigo apresenta as propriedades no estado fresco e endurecido do concreto leve com xisto expandido como agregado graúdo. Os materiais utilizados foram o cimento Portland CP I, adições minerais de metacaulim e cinza volante, ambos substituídos em relação à massa de cimento. O agregado graúdo é o xisto expandido com uma dimensão nominal máxima de 12 mm e o agregado miúdo é a areia natural de rio com tamanho nominal de 4,75 mm. Utilizou-se um aditivo superplastificante com uma densidade específica de 1,06 g/cm³ e uma quantidade variável em relação à massa de cimento para atingir resultados próximos nos estados fresco e endurecido. A relação a/c é igual a 0,33. Na Tabela 3 estão os dados das dosagens.

Tabela 3 - Dados das dosagens do concreto utilizado no Artigo 3

Dosagem	% Metacaulim	% Cinza volante	Aditivo (L/m ³)
1	0	25	0,38
2	5	20	0,87
3	10	15	1,38
4	15	10	1,63

Na Tabela 4 são apresentados os resultados no estado fresco e endurecido das dosagens. No estado fresco considera-se apenas o tempo do V-Funil (Tv) e o espalhamento. A resistência fornecida é aos 28 dias.

Tabela 4 - Ensaio no estado fresco e endurecido do concreto do Artigo 3

Dosagem	Abatimento (mm)	Tv (s)	fc (28 dias) MPa
1	700	4,5	39,7
2	710	5,3	39,8
3	700	5,6	40,1
4	690	6,3	39,4

Artigo 4: *Slurry of metakaolin combined with limestone addition for self-compacted concrete. Application for precast industry. (Cement & Concrete Composites, v.44, p. 50-57, 2013)*

Este artigo investiga o desenvolvimento de novos CAA que combinam filler calcário e metacaulim para uso específico na indústria de pré-moldado. É utilizado metacaulim em substituição a 15% da massa de cimento, sem a substituição do metacaulim e o uso de metacaulim em pasta. Também se utilizou aditivo superplastificante. Devido à grande produtividade da indústria de pré-moldado as peças de concreto necessitam de uma desforma rápida e que não comprometa a durabilidade e as características mecânicas do concreto. Normalmente a desforma é realizada quando o concreto atinge entre 15 e 20 MPa. A dosagem 1 é a de referência, não contém metacaulim, $a/c = 0,46$, a dosagem de superplastificante é 4,06% a massa de cimento. A dosagem 2 contém 15% de metacaulim, $a/c = 0,48$, a dosagem de superplastificante igual a 3,87%. E a dosagem 3 contém a pasta de metacaulim. Na Tabela 5 estão os resultados de trabalhabilidade do concreto.

Tabela 5 - Ensaio de espalhamento do concreto do Artigo 4

Dosagem	Espalhamento (cm)
1	64
2	62
3	61

Na Tabela 6 estão os resultados de resistência à compressão.

Tabela 6 - Resistência à compressão do concreto do Artigo 4

Dosagem	fc (9 horas) MPa	fc (23 horas) MPa	fc (56 horas) MPa	fc (7 dias) MPa	fc (28 dias) MPa
1	10,5	38,0	42,0	55,0	67,0
2	11,0	45,0	50,5	60,5	65,0
3	14,0	46,5	50,5	63,5	71,5

Resumo:

Dos artigos citados verifica-se a predominância da utilização de metacaulim e o uso de aditivo superplastificante para a obtenção do concreto autoadensável. No primeiro artigo o concreto que não utilizou metacaulim apresentou resistência à compressão menor que as outras dosagens com a relação $a/c = 0,60$. No segundo artigo a relação a/c manteve-se constante, variando-se a substituição de metacaulim na dosagem. Apresentando os maiores resultados a dosagem com 10% de metacaulim substituída à massa de cimento. No terceiro artigo a relação a/c manteve-se constante, assim como a resistência à compressão aos 28 dias apresentou resultados próximos. Foi substituído 30% da massa de cimento por adição mineral (metacaulim e cinza volante). No teste de espalhamento do CAA, os resultados variaram entre 69 cm e 71 cm. Já no quarto artigo foram realizadas três dosagens de CAA. Uma de referência, sem a utilização de metacaulim. Outra com 15% de metacaulim em substituição à massa de cimento. E outra utilizando pasta de metacaulim, sendo esta a que obteve a maior resistência à compressão em todas as idades estudadas.

Em todos os artigos as dosagens com metacaulim obtiveram melhores resultados do que os concretos sem metacaulim, pois contribuiu no desempenho do CAA no estado fresco e endurecido; assim, neste trabalho o uso do metacaulim é considerado para alcançar um desempenho melhor do CAA nos estados fresco e endurecido, juntamente com curvas granulométricas binárias da fração do agregado graúdo, conforme descrito no item 2 do planejamento experimental.

3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Materiais

Em qualquer método de dosagem, um dos primeiros passos é a escolha dos materiais da mistura. O concreto autoadensável é um concreto que possui os mesmos materiais de um concreto convencional, com algumas mudanças nas características de alguns componentes, acrescido de aditivos e adições.

3.1.1 Cimento

No CAA, há necessidade de se utilizar uma grande quantidade de finos, que compreendem principalmente o cimento, mas seu teor deve ser limitado para evitar efeitos indesejados, como alta liberação de calor de hidratação e aumento da retração plástica, além do alto custo que este insumo representa na composição final. A EFNARC (2002) determina um limite máximo de 500 kg de cimento para cada 1,0 m³ de concreto produzido e um mínimo de 350 kg, para controlar a retração do concreto. Este teor pode ser reduzido ao se utilizar outro material cimentício, como por exemplo, o metacaulim ou a microssílica.

NUNES (2001) afirma que, quanto maior a superfície específica do cimento, menor é a tensão de escoamento e maior a viscosidade da mistura. Isto decorre do aumento da quantidade de partículas em contato com a água, diminuindo a distância e aumentando a frequência de colisão entre elas. NEVILLE (1997) destaca que cimentos mais finos apresentam elevada velocidade de hidratação contribuindo para um rápido ganho de resistência.

O cimento utilizado foi o CP V ARI RS, ele possui propriedades particulares que são responsáveis por uma qualidade superior aos outros tipos de cimento:

- Maior resistência (durabilidade) com 28 dias.

- Baixo calor de hidratação: não propicia formação de trincas nas estruturas, sendo ideal para obras de grande volume, como barragens, estradas, usinas nucleares e peças de concreto pré-moldado.
- Resistência excelente a ataques químicos, principalmente a ataques de sulfatos, cuja reação provoca a formação de minerais expansíveis que geram pequenas trincas nas estruturas. Essa propriedade deve-se à baixa concentração de C_3A na composição do cimento. Por isso, ele é adequado para obras em regiões litorâneas, onde as pequenas trincas deixariam a armadura do concreto exposta à ação salina, degradando-a.
- Baixa porosidade, o tamanho médio dos poros é quase 3 vezes menor que no Cimento Portland Comum. Com isso, a permeabilidade do Cimento CP V ARI RS a agentes agressores é consideravelmente reduzida, evitando a degradação da estrutura.

3.1.2 Metacaulim

O metacaulim é uma adição mineral, finamente moído, incorporado ao concreto com a finalidade de reduzir os custos e melhorar as propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido. Nas propriedades frescas, há melhoria com relação à fluidez, quantidade de água e ausência de segregação e/ou exsudação, e nas propriedades do concreto no estado endurecido, benefícios como: resistência, permeabilidade e durabilidade, em razão do aumento da quantidade de finos e do refinamento dos poros.

3.1.3 Agregado Graúdo

Os agregados graúdos utilizados neste trabalho foram fornecidos pela empresa Polimix Agregados, localizada em Jaboatão dos Guararapes-PE. Foram utilizados os agregados: Brita 0, Brita 1 e pó de brita. Na Tabela 7 é apresentada a característica

de cada material. E nas Figuras 1 e 2 são apresentadas as curvas granulométricas da Brita 0 e da Brita 1, respectivamente.

Tabela 7 – Agregados graúdos e características

Agregado Graúdo	Diâmetro	Principais utilizações
Pó de Brita	5,0 mm	Concreto, argamassa, asfalto, assentamento. de blocos, pré-moldados e nivelamento de pisos.
Brita 0	10,0 mm	Concreto bombeável ou convencional, argamassa, pré-moldados e asfalto.
Brita 1	19,0 mm	Concreto convencional ou bombeado, asfalto e nivelamento de pisos.

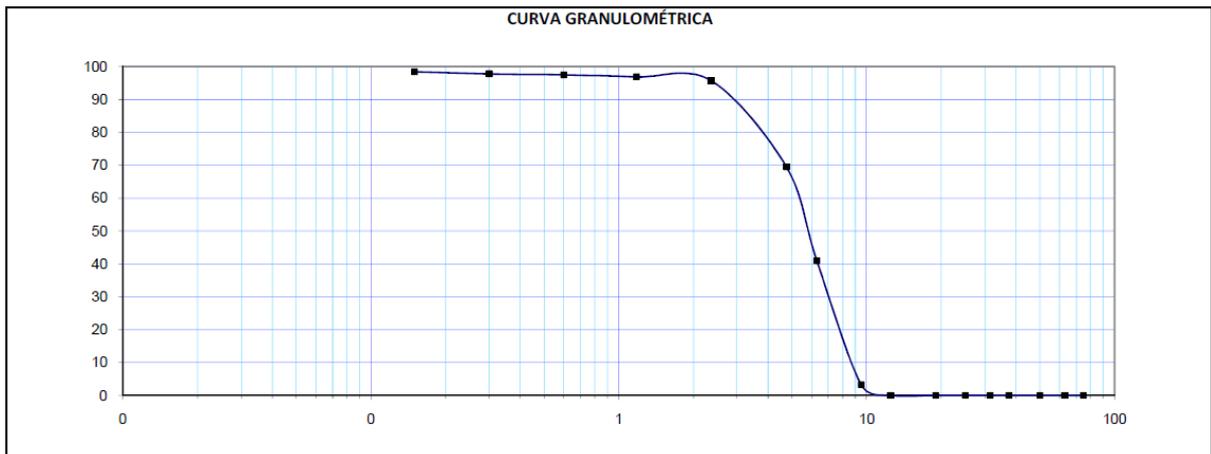


Figura 1 - Curva Granulométrica Brita 0

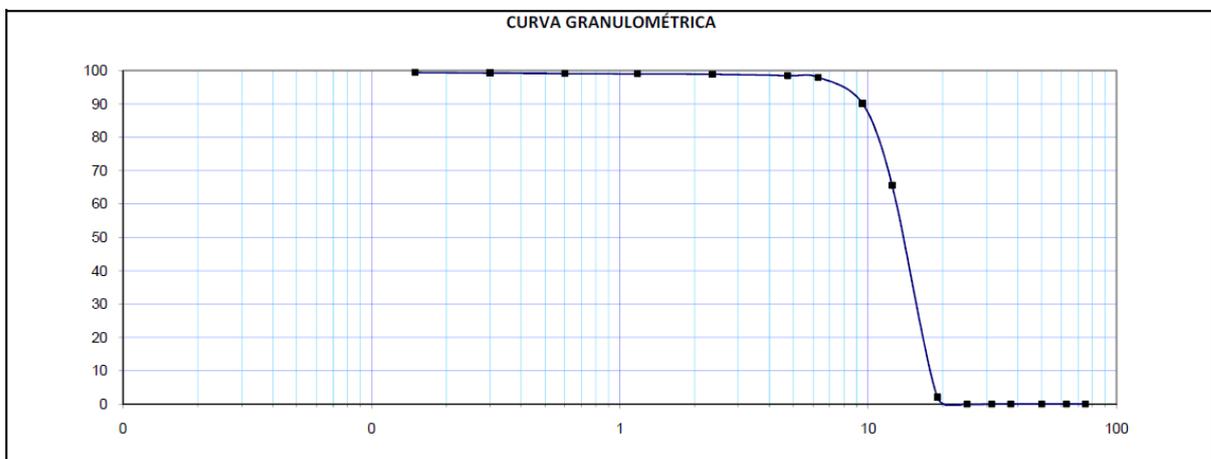


Figura 2 - Curva Granulométrica Brita 1

Antes de iniciar as dosagens, foi realizado um estudo de misturas com os três tipos de agregados graúdos. De acordo com a NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação realizou-se a distribuição granulométrica para os cinco tipos de misturas, pesando cada amostra 10 kg.

Mistura I: Brita 1: 70%; Brita 0: 20% e Pó de brita: 10%

Durante a realização do ensaio, verificou-se a massa unitária da mistura. Obtendo-se 1,52 g/cm³. Na Tabela 8 é mostrada a distribuição granulométrica da mistura I e na Figura 3 é apresentada a curva granulométrica da mistura I.

Tabela 8 – Distribuição granulométrica da mistura I

Peneira com abertura de malha	Mistura			
	Peso retido (g)	%		
		Retido	Acumulado	Passante
75 mm	0	0	0	100,00
63 mm	0	0	0	100,00
50 mm	0	0	0	100,00
37,5 mm	0	0	0	100,00
31,5 mm	0	0	0	100,00
25 mm	105	1,05	1,05	98,95
19 mm	975	9,75	10,8	89,20
12,5 mm	5465	54,65	65,45	34,55
9,5 mm	1010	10,10	75,55	24,45
6,3 mm	935	9,35	84,90	15,10
4,75 mm	385	3,85	88,75	11,25
2,36 mm	475	4,75	93,50	6,50
1,18 mm	110	1,10	94,60	5,40
600 µm	105	1,05	95,65	4,35
300 µm	125	1,25	96,90	3,10
150 µm	120	1,20	98,10	1,90
75 µm	130	1,30	99,40	0,60
Fundo	60	0,60	100,00	0,00

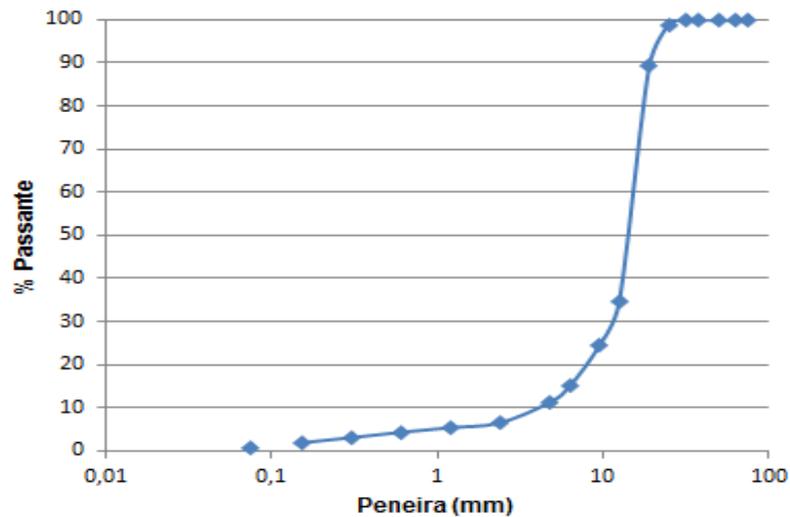


Figura 3 – Curva granulométrica da mistura I

Mistura II: Brita 1: 60%; Brita 0: 30% e Pó de brita: 10%

Durante a realização do ensaio, verificou-se a massa unitária da mistura. Obtendo-se $1,50 \text{ g/cm}^3$. Na Tabela 9 é mostrada a distribuição granulométrica da mistura II e na Figura 4 é apresentada a curva granulométrica da mistura II.

Tabela 9 – Distribuição granulométrica da mistura II

Peneira com abertura de malha	Mistura			
	Peso retido (g)	%		
		Retido	Acumulado	Passante
75 mm	0	0	0	100,00
63 mm	0	0	0	100,00
50 mm	0	0	0	100,00
37,5 mm	0	0	0	100,00
31,5 mm	0	0	0	100,00
25 mm	0	0	0	100,00
19 mm	965	9,65	9,65	90,35
12,5 mm	4585	45,85	55,50	44,50
9,5 mm	1240	12,40	67,90	32,10
6,3 mm	1375	13,75	81,65	18,35
4,75 mm	610	6,10	87,75	12,25
2,36 mm	530	5,30	93,05	6,95
1,18 mm	110	1,10	94,15	5,85
600 μm	120	1,20	95,35	4,65
300 μm	120	1,20	96,55	3,45
150 μm	130	1,30	97,85	2,15
75 μm	150	1,50	99,35	0,65
Fundo	65	0,65	100,00	0,00

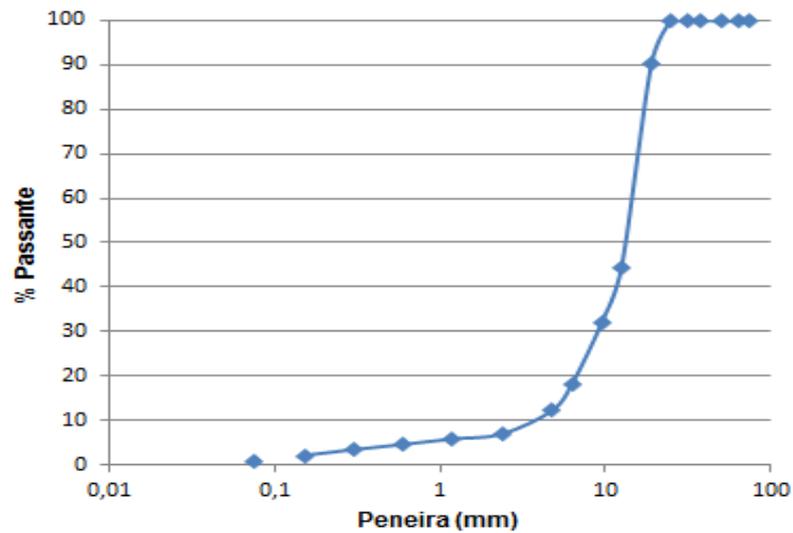


Figura 4 – Curva granulométrica da mistura II

Mistura III: Brita 1: 50%; Brita 0: 30% e Pó de brita: 20%

Durante a realização do ensaio, verificou-se a massa unitária da mistura. Obtendo-se $1,67 \text{ g/cm}^3$. Na Tabela 10 é mostrada a distribuição granulométrica da mistura III e na Figura 5 é apresentada a curva granulométrica da mistura III.

Tabela 10 – Distribuição granulométrica da mistura III

Peneira com abertura de malha	Mistura			
	Peso retido (g)	%		
		Retido	Acumulado	Passante
75 mm	0	0	0	100,00
63 mm	0	0	0	100,00
50 mm	0	0	0	100,00
37,5 mm	0	0	0	100,00
31,5 mm	0	0	0	100,00
25 mm	155	1,55	1,55	98,45
19 mm	1035	10,35	11,90	88,10
12,5 mm	3580	35,80	47,70	52,30
9,5 mm	1150	11,50	59,20	40,80
6,3 mm	1385	13,85	73,05	26,95
4,75 mm	605	6,05	79,10	20,90
2,36 mm	800	8,00	87,10	12,90
1,18 mm	235	2,35	89,45	10,55
600 μm	230	2,30	91,75	8,25
300 μm	235	2,35	94,10	5,90
150 μm	370	3,70	97,80	2,20
75 μm	195	1,95	99,75	0,25
Fundo	25	0,25	100,00	0,00

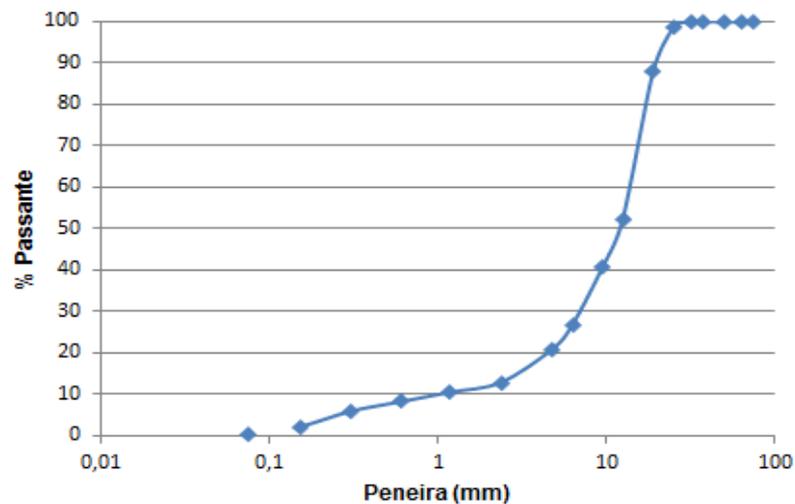


Figura 5 – Curva granulométrica da mistura III

Mistura IV: Brita 1: 40%; Brita 0: 40% e Pó de brita: 20%

Durante a realização do ensaio, verificou-se a massa unitária da mistura. Obtendo-se 1,66 g/cm³. Na Tabela 11 é mostrada a distribuição granulométrica da mistura IV e na Figura 6 é apresentada a curva granulométrica da mistura IV.

Tabela 11 – Distribuição granulométrica da mistura IV

Peneira com abertura de malha	Mistura			
	Peso retido (g)	%		
		Retido	Acumulado	Passante
75 mm	0	0	0	100,00
63 mm	0	0	0	100,00
50 mm	0	0	0	100,00
37,5 mm	0	0	0	100,00
31,5 mm	0	0	0	100,00
25 mm	130	1,30	1,30	98,70
19 mm	870	8,70	10,00	90,00
12,5 mm	3380	33,80	43,80	56,20
9,5 mm	1190	11,90	55,70	44,30
6,3 mm	1750	17,50	73,20	26,80
4,75 mm	935	9,35	82,55	17,45
2,36 mm	910	9,10	91,65	8,35
1,18 mm	160	1,60	93,25	6,75
600 µm	145	1,45	94,70	5,30
300 µm	155	1,55	96,25	3,75
150 µm	245	2,45	98,70	1,30
75 µm	110	1,10	99,80	0,20
Fundo	20	0,20	100,00	0,00

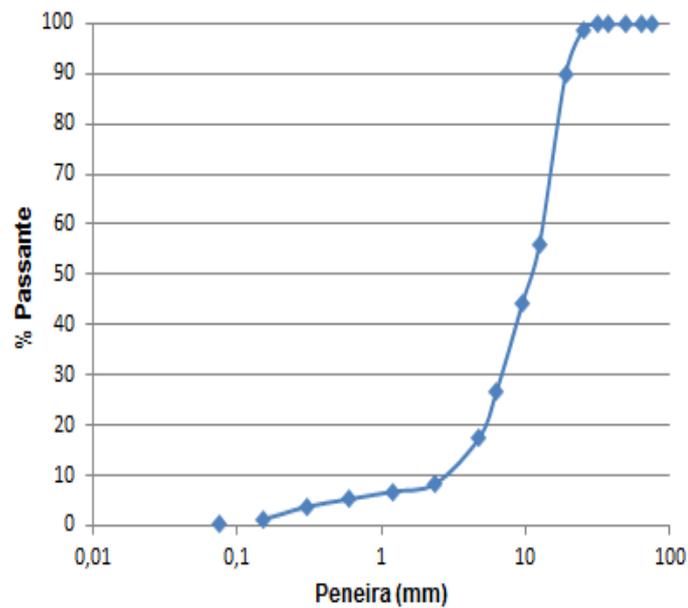


Figura 6 – Curva granulométrica da mistura IV

Mistura V: Brita 1: 30%; Brita 0: 30% e Pó de brita: 40%

Durante a realização do ensaio, verificou-se a massa unitária da mistura. Obtendo-se $1,76 \text{ g/cm}^3$. Na Tabela 12 é mostrada a distribuição granulométrica da mistura V e na Figura 7 é apresentada a curva granulométrica da mistura V.

Tabela 12 – Distribuição granulométrica da mistura V

Peneira com abertura de malha	Mistura			
	Peso retido (g)	%		
		Retido	Acumulado	Passante
75 mm	0	0	0	100,00
63 mm	0	0	0	100,00
50 mm	0	0	0	100,00
37,5 mm	0	0	0	100,00
31,5 mm	0	0	0	100,00
25 mm	30	0,30	0,30	99,70
19 mm	370	3,70	4,00	96,00
12,5 mm	2310	23,10	27,10	72,90
9,5 mm	960	9,60	36,70	63,30
6,3 mm	1450	14,50	51,20	48,80
4,75 mm	795	7,95	59,15	40,85
2,36 mm	1440	14,40	73,55	26,45
1,18 mm	480	4,80	78,35	21,65
600 μm	490	4,90	83,25	16,75
300 μm	600	6,00	89,25	10,75
150 μm	700	7,00	96,25	3,75
75 μm	330	3,30	99,55	0,45
Fundo	45	0,45	100,00	0,00

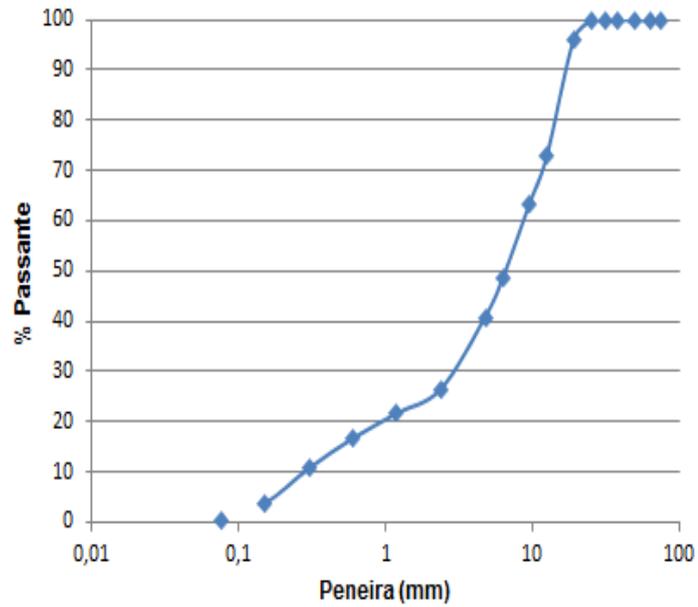


Figura 7 – Curva granulométrica da mistura V

Na Figura 8 apresentam-se todas as cinco curvas granulométricas.

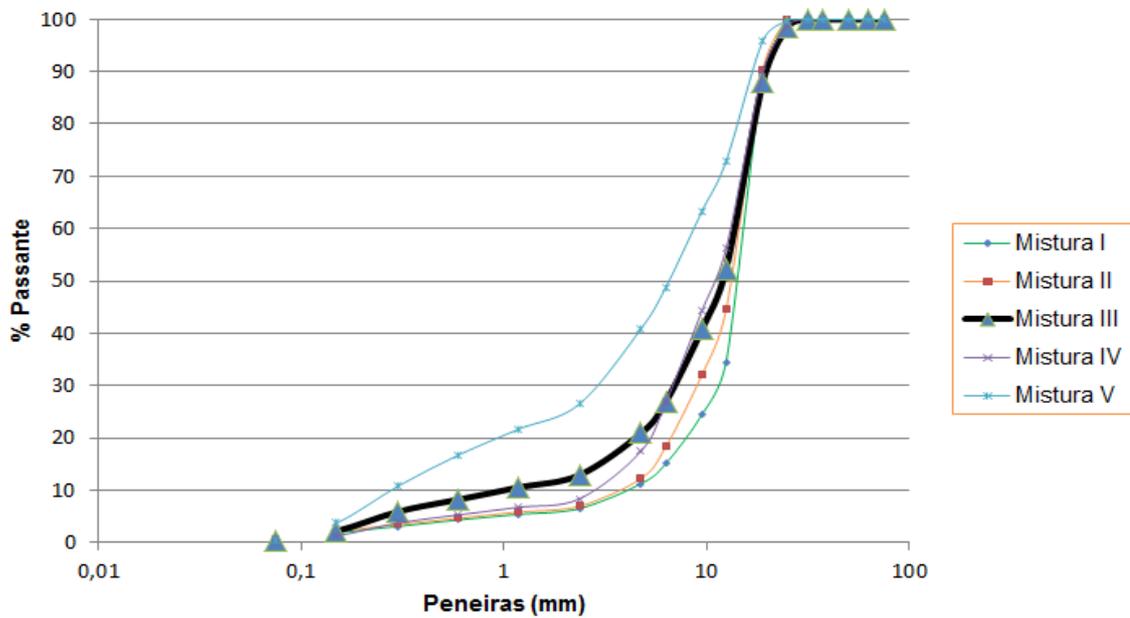


Figura 8 – Curva granulométrica das misturas

3.1.4 Agregado Miúdo

A areia utilizada foi de Caxitú. Ela encontra-se disponível comercialmente, é proveniente da Paraíba no Município do Conde numa região denominada Caxitú. O agregado é coletado do rio e é considerado fino por ter módulo de finura inferior a 2,0. O agregado possui as características físicas descritas na Tabela 13.

Tabela 13 – Características físicas do agregado miúdo

Características Físicas	Unidade (g/cm ³)
Módulo de finura	1,91
Massa específica	2,65

3.1.5 Aditivo Superplastificante

É inevitável o uso de aditivo superplastificante no concreto autoadensável, pois ele é responsável por uma das principais propriedades do CAA, a fluidez. Sem o superplastificante seria impossível pensar em concreto autoadensável.

Os superplastificantes são uma categoria especial de agentes redutores de água, formulados a partir de materiais que permitem a redução de água na dosagem do concreto e melhora a trabalhabilidade do concreto. Em geral, são empregados na produção de concretos de alto desempenho, particularmente quando é exigida alta fluidez com baixa relação água/cimento. (GOMES, 2009).

Neste trabalho foram utilizados três tipos de Aditivos superplastificante: A, B e C. Todos contêm em sua composição básica policarboxilatos e são isentos de cloreto.

Aditivo A

Este aditivo apresenta uma massa específica de 1,07 g/cm³, de cor castanho e a especificação do fabricante é de usar 0,7 a 1,5% sobre a massa de cimento utilizada na dosagem. Colocou-se uma amostra deste aditivo na estufa à temperatura de

100°C, durante 48 horas, para obter o teor de partícula sólida existente. Após a retirada da estufa, a amostra apresentou 48,0% de partícula sólida.

Aditivo B

Este aditivo apresenta uma massa específica de 1,06 g/cm³, de cor amarelo claro e a especificação do fabricante é de usar 0,15 a 0,8% sobre a massa de cimento utilizada na dosagem. Colocou-se uma amostra deste aditivo na estufa à temperatura de 100°C, durante 48 horas, para obter o teor de partícula sólida existente. Após a retirada da estufa, a amostra apresentou 55,4% de partícula sólida.

Aditivo C

Este aditivo apresenta uma massa específica de 1,09 g/cm³, de coloração amarelado e a especificação do fabricante é de usar 0,3 a 1,0% sobre a massa de cimento utilizada na dosagem. Colocou-se uma amostra deste aditivo na estufa à temperatura de 100°C, durante 48 horas, para obter o teor de partícula sólida existente. Após a retirada da estufa, a amostra apresentou 25,5% de partícula sólida.

Na Tabela 14 são apresentadas as características dos três aditivos.

Tabela 14 – Características dos Aditivos

Aditivo	Massa específica (g/cm ³)	Recomendação de utilização	Teor de Sólidos
A	1,07	0,7 a 1,5% da massa de cimento	48,0 %
B	1,06	0,15 a 0,8% da massa de cimento	55,4%
C	1,09	0,3 a 1,0% da massa de cimento	25,5%

3.1.6 Água

O elemento a ser utilizado é a água potável, material que exige pouco controle de qualidade, geralmente, realizado entre os componentes do concreto, é certamente o parâmetro mais importante no controle das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. Elevada quantidade de água pode comprometer a resistência mecânica do concreto. Seu uso no concreto é expresso como uma relação água cimento (a/c), por peso ou volume, relação água/materiais cimentícios, água/materiais finos etc. Em função do tipo de concreto, a relação a/c varia substancialmente, ou seja, para concretos de alto desempenho, a/c está na faixa de 0,35, enquanto para concretos convencionais está na faixa de 0,50.

A quantidade de água de uma mistura é dividida basicamente em quatro partes: uma para hidratação do cimento, uma para absorção dos agregados e materiais finos, uma para preencher a porosidade do esqueleto granular, e uma para garantir a fluidez do concreto.

3.2 Ensaio

3.2.1 Estado Fresco

Diversos métodos de ensaios e procedimentos são utilizados para avaliação das propriedades do concreto autoadensável, alguns já são normalizados e outros foram desenvolvidos durante as pesquisas para avaliação de CAA em seus estudos e propostos como ensaio. Neste trabalho realizaram-se o ensaio de espalhamento e o ensaio do V-Funil.

3.2.1.1 Ensaio de Espalhamento (Slump Flow Test)

Este ensaio consiste em verificar se o concreto sob a força provocada pelo seu próprio peso é capaz de espalhar-se até atingir determinado diâmetro em certo tempo e uma dimensão limite. O ensaio é utilizado para verificar a capacidade de preenchimento do CAA e está diretamente relacionado com a sua fluidez. É o ensaio mais utilizado em laboratório e no local da construção pela sua facilidade de execução, rapidez e por usar um equipamento, cone de Abrams, que é bastante utilizado em concretos convencionais.

Para a execução deste ensaio, são necessários os seguintes equipamentos:

- Uma base quadrada reta, lisa e de material sólido que não solte material, com aresta de, no mínimo, 90 cm.
- Cone de Abrams (diâmetro superior de 10 cm e inferior de 20 cm, com altura de 30 cm).
- Uma colher do tipo concha ou um balde.
- Um cronômetro.
- Uma trena ou régua de, no mínimo, 90 cm.

A base de dimensões quadrada é posicionada em uma superfície horizontalmente nivelada e regular. Duas marcas circulares, uma de 20 cm e outra de 50 cm de diâmetro são feitas no centro da base. As superfícies da base e do interior do cone são pré-umedecidas. O cone é então colocado na marca circular central da base, com 20 cm de diâmetro, e fixado pelo peso do operário, a fim de evitar qualquer vazamento de concreto. Uma amostra representativa, entre 6 e 7 litros, de CAA é retirada da mistura e colocada dentro do cone sem nenhum tipo de compactação ou adensamento mecânico. O excesso de concreto no topo do cone e algum concreto remanescente na base de ensaio devem ser removidos.

Depois da retirada do excesso de concreto, o cone é suavemente levantado, perpendicular à placa, em um único movimento, de modo que permita ao CAA fluir livremente sem obstrução do cone, em seguida, o cronômetro é acionado.

Quando o concreto atinge a marca circular feita na placa com diâmetro de 50 cm, o cronômetro é parado e o tempo registrado. Esse tempo é denominado tempo de fluxo T_{50} .

Terminado o espalhamento do concreto, medem-se, com uma régua ou trena, dois diâmetros perpendiculares d_1 e d_2 e calcula-se a média desses, que é denominado diâmetro final de espalhamento d .

O diâmetro final de espalhamento d para CAA está entre 60 e 80 cm e o tempo de fluxo T_{50} , entre 2 e 7 segundos (GOMES, 2009).

Na Figura 9 é apresentado o ensaio de espalhamento.

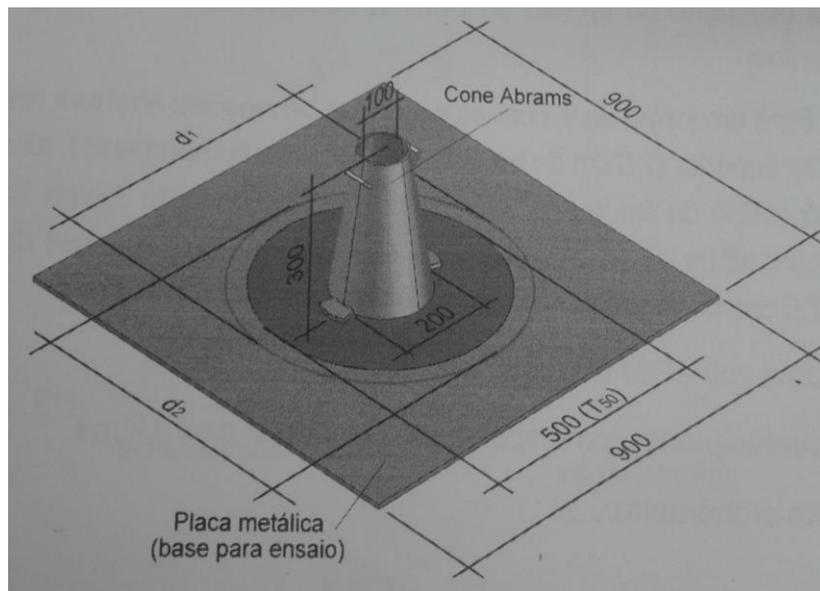


Figura 9 - Teste de espalhamento (dimensões em mm)

3.2.1.2 Ensaio do V-Funil

O ensaio foi desenvolvido na Universidade de Tóquio para simular a capacidade de passagem do CAA através do estreitamento de uma seção, apenas sob a ação de seu próprio peso. Esse ensaio também é utilizado para verificar a presença de segregação, quando o concreto é impedido de escorrer pela saída do funil. O teste consiste em medir o tempo que a amostra de aproximadamente 10 litros de concreto necessita para fluir totalmente através do orifício inferior do funil, no qual a seção deve ter dimensão mínima de três vezes o tamanho máximo do agregado.

Depois do ensaio de espalhamento, com o cone de Abrams, o V-Funil é o mais utilizado nos laboratórios e no local da construção para verificar a fluidez do concreto.

Para a execução do ensaio do V-Funil, são necessários os seguintes equipamentos:

- Funil em forma de V, que é padrão na realização deste ensaio, com as seguintes dimensões: abertura retangular superior (7,5 cm de largura e 51,5 cm de comprimento), altura até o orifício de saída de 45,0 cm com uma inclinação de 2 para 1, saída com altura de 15,0 cm e abertura retangular com dimensões de 6,5 cm e 7,5 cm, podendo ser utilizada a saída quadrada de 7,5 cm.
- Uma colher do tipo concha.
- Um recipiente com capacidade para mais de 10 litros.
- Um cronômetro.

O V-Funil, é posicionado verticalmente em uma superfície plana e regular, com a abertura superior nivelada horizontalmente. O interior do V-Funil é umedecido sem deixar água na superfície. A porta do orifício de saída do funil é fechada e um recipiente é colocado abaixo dela, de modo que retenha o concreto passante. O funil é preenchido completamente com uma amostra de CAA, em torno de 10 litros, sem aplicar nenhuma compactação ou adensamento mecânico. Remove-se o excesso de concreto no topo do funil, esperam-se aproximadamente 15 segundos e abre-se a porta de saída. Simultaneamente, no momento em que a porta é aberta, dispara-se o cronômetro. Verificando-se através da abertura superior do funil, o cronômetro é parado no momento em que a passagem inferior está completamente visível. O tempo registrado é denominado tempo de fluxo do ensaio do V-Funil (T_v). O tempo de fluxo do ensaio do V-Funil (T_v) para CAA varia de 6 a 15 segundos (GOMES, 2009). A Figura 10 apresenta o equipamento utilizado no ensaio V-Funil.

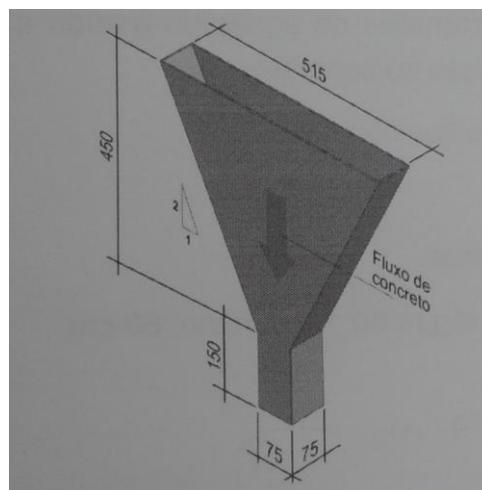


Figura 10 - Ensaio do V-Funil (dimensões em mm)

3.2.2 Estado Endurecido

Realizou-se o ensaio de resistência à compressão aos 7 e 28 dias. Foram moldados 4 corpos-de-prova cilíndricos com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm, para cada aditivo, com e sem adição de metacaulim, cuja desmoldagem aconteceu em 24 horas, em seguida, os corpos-de-prova permaneceram em cura úmida até a idade do rompimento. Dois corpos-de-prova foram rompidos na idade de 7 dias e outros dois na idade de 28 dias. Calculou-se a média aritmética de dois corpos-de-prova obtendo-se a resistência.

3.3 Ensaio Piloto

Neste trabalho propõe-se a de produção de concreto autoadensável comparando-se três tipos de aditivos superplastificantes, sendo usados de acordo com a porcentagem estabelecida pelo fabricante, em relação à massa de cimento. E verificando a diferença entre a dosagem com substituição do cimento pelo metacaulim e sem substituição. Com o intuito de obter resultados que atendam os requisitos no estado fresco, já especificados no item 3.2.1.1 e no item 3.2.1.2. Este trabalho foi dividido em duas etapas: na primeira foram realizados ensaios pilotos para escolher uma das cinco misturas de agregados graúdos, e na segunda etapa, ensaio definitivo, a realização dos ensaios no estado fresco e endurecido comparando cada tipo de aditivo, com substituição de metacaulim em 10% da massa de cimento e sem substituição de metacaulim.

No ensaio piloto foi utilizado o aditivo C. Segue abaixo as características das cinco misturas de agregado graúdo utilizado. O traço adotado inicialmente foi 1:5 com um teor de argamassa de 60% para 30 kg de agregado graúdo. E a relação a/c inicial igual a 0,4 para todas as misturas.

Mistura I:

O teor de aditivo usado na amostra foi de 1,0% da massa de cimento, foi acrescentado água para obter uma melhor trabalhabilidade, a/c= 0,77. Tanto no V-

Funil quanto no ensaio de espalhamento os resultados não foram compatíveis para o CAA. Na Tabela 15 estão os resultados dos ensaios.

Tabela 15 – Ensaio piloto da Mistura I

Estado	Espalhamento	Funil-V
Fresco	D= 49,25 cm	Tv = 4,15 s
	T ₅₀ = 2,06 s	

Mistura II:

O teor de aditivo utilizado foi de 1,0% da massa de cimento, acrescentou-se água, assim a relação $a/c= 0,54$. Apresentando um $T_{50}= 1,37$ s e $D= 53,2$ cm, a mistura teve uma exsudação grande. E não foi realizado o ensaio de V-Funil e nem retirados corpos-de-prova, pois o concreto entrou em pega muito rápido.

Mistura III:

O teor de aditivo utilizado foi de 1,0% da massa de cimento, tendo uma relação $a/c= 0,65$. Na tabela abaixo são apresentados os resultados dos ensaios no estado fresco e endurecido. Na Tabela 16 estão os resultados dos ensaios.

Tabela 16 – Ensaio piloto da Mistura III

Estado	Espalhamento	Funil-V
Fresco	D= 37,75 cm	Tv = 4,90 s
	T ₅₀ = 2,01 s	
Estado	Fc (7 dias)	Fc (28 dias)
Endurecido	21,7 MPa	25,6 MPa

Mistura IV:

O teor de aditivo adicionado na dosagem foi de 1,0% da massa de cimento, obtendo uma relação $a/c= 0,52$. E não foi realizado o ensaio de V-Funil porque o concreto entrou em pega rapidamente (aproximadamente 10 minutos). Na Tabela 17 estão os resultados dos ensaios.

Tabela 17 – Ensaio piloto da Mistura IV

Estado	Espalhamento	Funil-V
Fresco	D= 68,0 cm	-----
	T ₅₀ = 4,44 s	
Estado	Fc (7 dias)	Fc (28 dias)
Endurecido	19,0 MPa	29,7 MPa

Mistura V:

O teor de aditivo colocado na dosagem foi de 0,3% da massa de cimento, a relação a/c foi de 0,71. Na Tabela 18 estão os resultados dos ensaios.

Tabela 18 – Ensaio piloto da Mistura V

Estado	Espalhamento	Funil-V
Fresco	D= 46,75 cm	Tv = 3,35 s
	T ₅₀ = 3,0 s	
Estado	Fc (7 dias)	Fc (28 dias)
Endurecido	14,9 MPa	18,6 MPa

3.4 Ensaio Definitivo

Após a realização dos ensaios piloto, definiu-se o desenvolvimento da mistura III. Os ensaios nesta etapa foram executados com uma mudança no traço, passando de 1:5 para 1:3, pois o concreto autoadensável necessita de uma quantidade maior de finos. Teor de argamassa igual a 60% e a água e o aditivo foram dosados de acordo com a aparência do traço. A relação água/cimento inicial foi de 0,3 e, quando necessário, adiciona-se água. As etapas da execução dos ensaios adotados foram as seguintes:

1. Agregado graúdo e 50% da água, mistura por 1 minuto
2. Agregado miúdo, mistura por 1 minuto
3. Cimento + metacaulim (ou apenas o cimento) e 20% da água, mistura por 2 minutos
4. Limpeza das pás da betoneira
5. Mistura por 2 minutos

6. Aditivo superplastificante, mistura por 2 minutos

Adiciona-se a quantidade mínima de aditivo estabelecida pelo fabricante. Realiza-se o ensaio de espalhamento e, se não atingir os resultados esperados ($60 \text{ cm} < d < 80 \text{ cm}$), volta-se o mesmo concreto para betoneira e adiciona-se mais água acompanhando a trabalhabilidade do concreto e também, adicionando uma parte da quantidade disponível do aditivo, realizando-se novamente os ensaios no estado fresco. Se os resultados não forem aprovados descarta-se o concreto e realiza-se nova dosagem.

Os concretos foram produzidos em betoneira de eixo inclinado, com capacidade de 140 l. Na Figura 11 pode ser observada a produção de uma mistura de concreto. E nas Figuras 12 e 13 o ensaio de espalhamento e V-Funil, respectivamente.



Figura 11 – Produção de CAA



Figura 12 – Ensaio de espalhamento



Figura 13 – Teste do V-Funil

Aditivo A

Na dosagem com substituição de 10% de cimento por metacaulim a quantidade de aditivo colocada inicialmente (0,7%) não atendeu nos requisitos dos ensaios no estado fresco, então adicionou-se o restante do aditivo (1,5%) e os resultados melhoraram. Obteve-se uma relação $a/c = 0,35$. Na Tabela 19 encontram-se os resultados dos ensaios no estado fresco e endurecido, em que a quantidade de aditivo era de 1,5% da massa de aglomerante.

Tabela 19 – Ensaio com metacaulim e aditivo A

	Espalhamento	Funil-V
Estado Fresco	D= 91,0 cm	Tv = 12,50 s
	T ₅₀ = 2,50 s	
Estado Endurecido	Fc (7 dias)	Fc (28 dias)
	41,9 MPa	49,2 MPa

Em relação à dosagem sem metacaulim, obteve-se uma relação $a/c = 0,44$ e a porcentagem de aditivo adicionada em relação à massa de cimento foi de 0,75%, pois com a quantidade mínima do aditivo os resultados no estado fresco não atingiram os valores mínimos. Na Tabela 20 estão evidenciados os resultados da dosagem, em que a quantidade de aditivo era de 0,75%.

Tabela 20 – Ensaio sem metacaulim e aditivo A

Estado	Espalhamento	Funil-V
	Fresco	D= 72,0 cm
T ₅₀ = 6,0 s		
Estado	Fc (7 dias)	Fc (28 dias)
	Endurecido	29,7 MPa

Aditivo B

Na dosagem com substituição de 10% de cimento por metacaulim a quantidade de aditivo adicionado à dosagem foi de 0,8% da massa de materiais finos e obtendo uma relação a/c= 0,51. Na Tabela 21 encontram-se os resultados dos ensaios no estado fresco e endurecido.

Tabela 21 – Ensaio com metacaulim e aditivo B

Estado	Espalhamento	Funil-V
	Fresco	D= 63,5 cm
T ₅₀ = 3,60 s		
Estado	Fc (7 dias)	Fc (28 dias)
	Endurecido	29,1 MPa

Em relação à dosagem sem metacaulim, a relação a/c= 0,42 e a porcentagem de aditivo adicionada em relação à massa de cimento foi de 0,65%. Na Tabela 22 encontram-se os resultados da dosagem.

Tabela 22 – Ensaio sem metacaulim e aditivo B

Estado	Espalhamento	Funil-V
	Fresco	D= 61,0 cm
T ₅₀ = 5,25 s		
Estado	Fc (7 dias)	Fc (28 dias)
	Endurecido	44,0 MPa

Aditivo C

Na dosagem com substituição de 10% de cimento por metacaulim a quantidade de aditivo utilizado foi de 1,0% da massa de materiais finos e obteve-se uma relação

$a/c = 0,56$. Na Tabela 23 encontram-se os resultados dos ensaios no estado fresco e endurecido.

Tabela 23 – Ensaio com metacaulim e aditivo C

Estado	Espalhamento	Funil-V
Fresco	D= 68,6 cm	Tv = 8,40 s
	T ₅₀ = 2,80 s	
Estado	Fc (7 dias)	Fc (28 dias)
Endurecido	34,1 MPa	39,7 Mpa

Já em relação à dosagem sem metacaulim, a relação $a/c = 0,41$ e a porcentagem de aditivo adicionada em relação à massa de cimento foi de 0,48%. Na Tabela 24 encontram-se os resultados da dosagem.

Tabela 24 – Ensaio sem metacaulim e aditivo C

Estado	Espalhamento	Funil-V
Fresco	D= 76,5 cm	Tv = 6,0 s
	T ₅₀ = 3,0 s	
Estado	Fc (7 dias)	Fc (28 dias)
Endurecido	24,8 MPa	38,1 MPa

4 RESULTADO E ANÁLISE

Seguem abaixo os resultados dos ensaios analisados dos três aditivos.

- **Diâmetro de espalhamento ($60 \text{ cm} < d < 80 \text{ cm}$)**

Sem adição de metacaulim, todos os aditivos deixaram os concretos acima do $d_{\text{mín}}$ (60 cm). Sendo em ordem crescente o aumento do d com os aditivos da seguinte maneira: $C > A > B$.

Com 10% de metacaulim, ocorreu um aumento do d para os concretos com o aditivo A e B, sendo o aditivo A o que forneceu maior d . No concreto com o aditivo C ocorreu uma redução do d , demonstrando a sua qualidade inferior aos outros dois e por ter teor de sólidos igual a 25,5%, o menor dos três. Na Figura 14 estão os resultados do ensaio dos três aditivos.

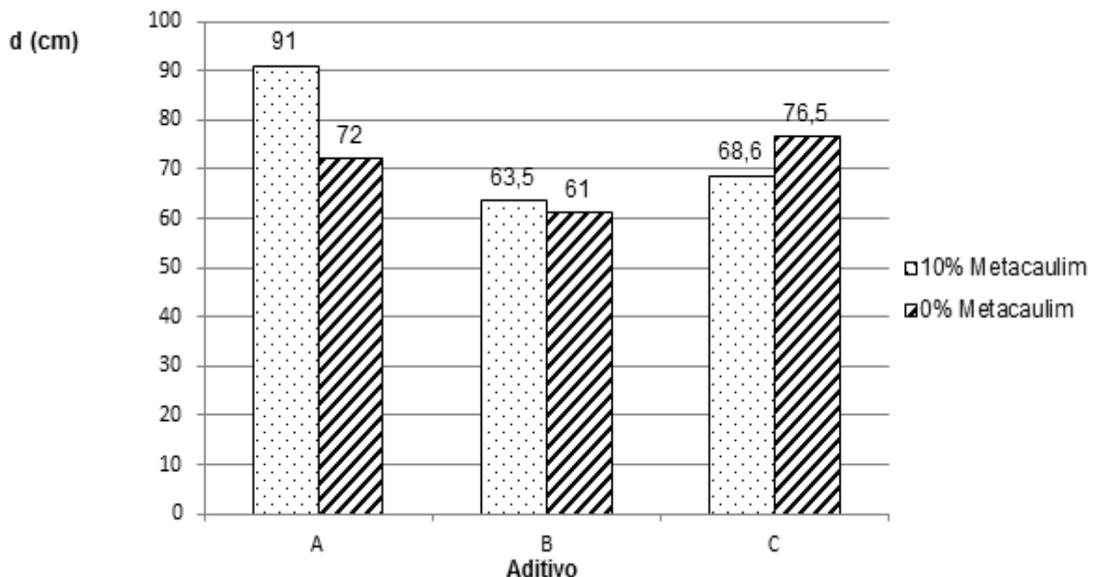


Figura 14 – Resultados do espalhamento

Dos dados do espalhamento atribui-se o maior d para o concreto sem adição de metacaulim do aditivo C a maior relação a/c , pois o teor de sólido é menor, ou seja, há pouco aditivo efetivamente agindo com o aglomerante. Com 10% de metacaulim este aditivo (C) não contribui para o aumento do espalhamento.

- **Tempo de escoamento ($2,0 \text{ s} < t < 7,0 \text{ s}$)**

Dos dados coletados verificou-se que os concretos sem adição de metacaulim tiveram os maiores tempos de espalhamento em relação aos concretos com 10% de metacaulim, deixando evidente a grande contribuição do metacaulim na trabalhabilidade do concreto. Na Figura 15 é apresentado os resultados do ensaio dos três aditivos.

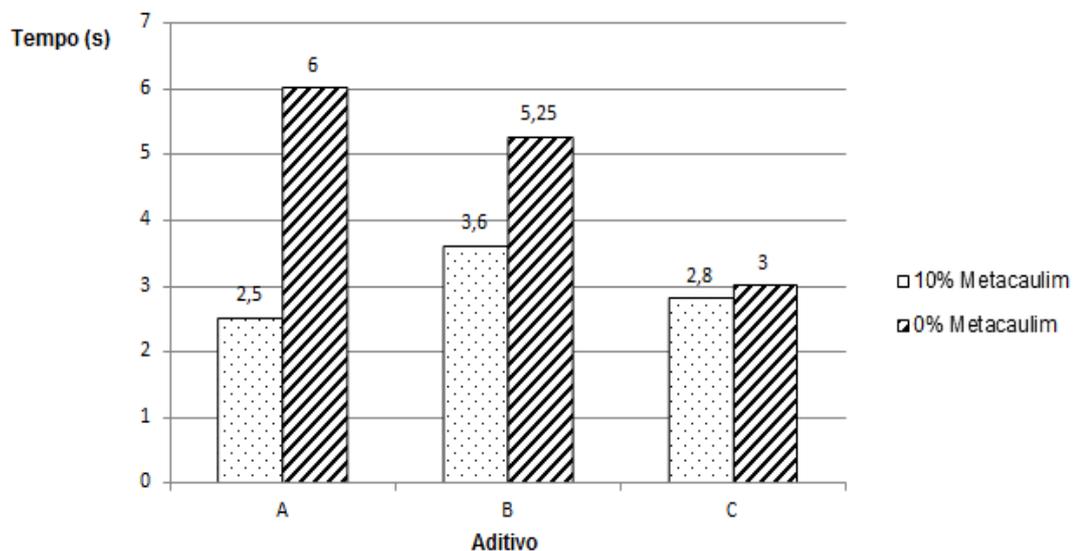


Figura 15 – Resultados do tempo de espalhamento

Entre os concretos com 0% de metacaulim o que apresentou menor t foi o com aditivo C, em função da sua menor relação a/c . Nos concretos com aditivo A e B, os tempos foram maiores devido a maior relação a/c .

Os concretos com 10% de metacaulim tiveram tempos menores de escoamento, e próximos entre si. Por exemplo, o concreto com o aditivo C (25,5% de teor de sólidos) teve $t = 2,8 \text{ s}$ e o concreto com o aditivo A (48,0% de teor de sólidos) teve $t = 2,5 \text{ s}$, o que se entende que o metacaulim contribuiu nesse escoamento.

- **Tempo do V-Funil ($6,0 \text{ s} < T_v < 15,0 \text{ s}$)**

O concreto do aditivo C sem adição de metacaulim teve o menor tempo de escoamento em relação aos concretos com o aditivo A e B. Este fato atribui-se ao menor teor de sólidos que aumenta a relação a/c do concreto com o aditivo C. O concreto com o aditivo A e com 10% de metacaulim teve o maior tempo, este fato

atribui-se a menor relação a/c deste concreto. E os concretos com o aditivo B tiveram valores intermediários. Na Figura 16 estão os resultados do ensaio dos três aditivos.

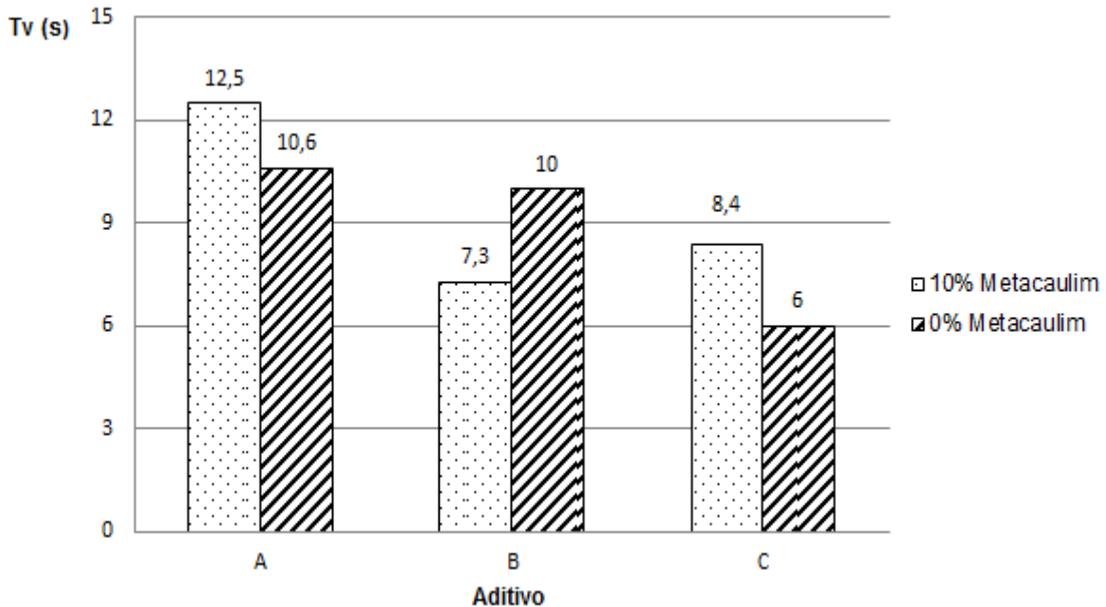


Figura 16 – Resultados do tempo do V-Funil

O concreto com o aditivo B, sem adição de metacaulim, teve comportamento diferenciado, ou seja, enquanto os concretos com o aditivo A e C obtiveram tempos menores em comparação com os tempos do concreto com 10% de metacaulim, o concreto do aditivo B apresentou tempo maior para a dosagem sem adição de metacaulim. O concreto com o aditivo C e sem adição de metacaulim teve menor tempo (6,0 s) em comparação com os concretos do aditivo A e B sem metacaulim por ter menor a/c. Os concretos com aditivo A e B obtiveram tempos próximos; 10,6 s e 10,0 s, bem como a relação a/c, 0,44 e 0,42, respectivamente.

O concreto com 10% de metacaulim dosado com o aditivo A teve o maior tempo, pois tem o menor a/c. Os concretos B e C tiveram tempos menores, 7,3 s e 8,4 s e as relações a/c 0,51 e 0,56, respectivamente.

Analisando os dados dos ensaios do concreto no estado fresco, verifica-se que o concreto com o aditivo A é o mais coeso e que é evidente a influência do metacaulim e da relação a/c nas propriedades do concreto. Como nas recomendações dos

aditivos não são comentados o tempo de mistura não é evidente a influência da ação dos aditivos nessas propriedades.

- **Resultados no estado endurecido**

Os concretos com o aditivo C tiveram a menor resistência à compressão aos 28 dias. Os concretos preparados com o aditivo A e C, sem metacaulim, tiveram resultados próximos aos 7 dias, 29,7 e 24,8 MPa e aos 28 dias, 40,7 e 38,1 MPa, respectivamente. Sendo os valores com o aditivo C os menores, o que era esperado em função da menor quantidade de teor de sólidos no aditivo C. O concreto sem metacaulim com aditivo B teve os maiores resultados, aos 7 dias 44,0 MPa e aos 28 dias 53,7 MPa. Apesar da relação a/c com valor intermediário em relação aos outros concretos, este ganho de resistência atribui-se ao efeito do aditivo, pois possui maior teor de sólidos. Na Figura 17 estão os resultados do ensaio dos três aditivos.

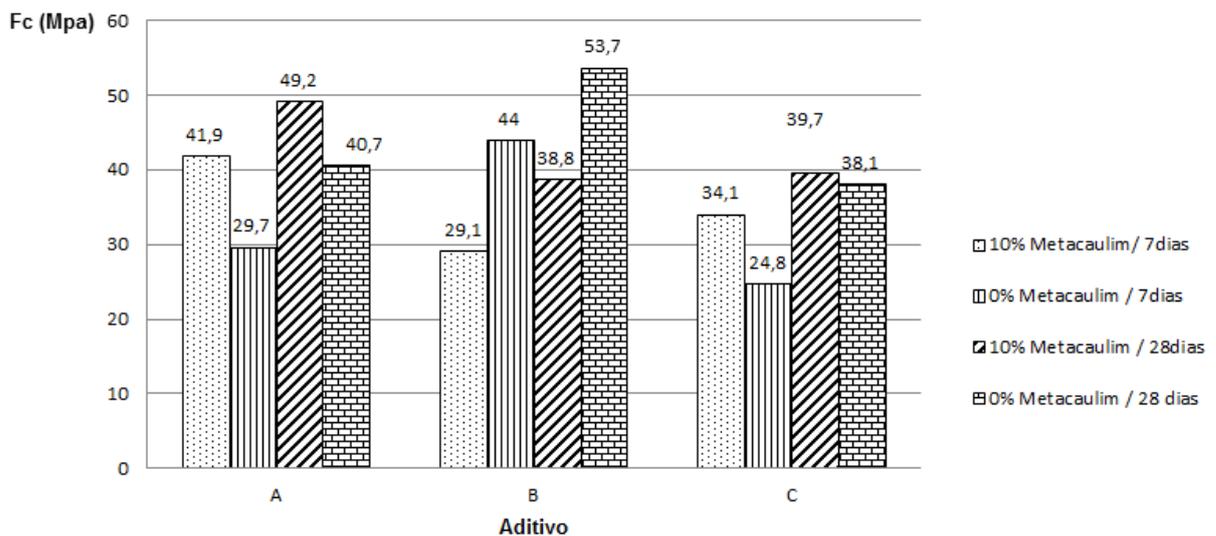


Figura 17 – Resultados do ensaio de resistência à compressão

O concreto com metacaulim, com o aditivo A, apresentou os maiores resultados, aos 7 dias 41,9 MPa e aos 28 dias 49,2 MPa, devido a menor relação a/c ($a/c = 0,35$). Os concretos com metacaulim, com o aditivo B e C, tiveram os seguintes resultados aos 7 dias e 28 dias:

B → 29,1 MPa e 38,8 MPa;

C → 34,1 MPa e 38,1 MPa.

Como estes concretos tiveram relação a/c próximas, 0,51 e 0,55, atribui-se esta semelhança de resultados. Acredita-se que aos 90 dias estes valores poderiam ser alterados.

5 CONCLUSÕES

A partir da dosagem de concreto autoadensável substituindo 10% da massa de cimento por metacaulim e sem substituição de metacaulim, utilizando três tipos de aditivos superplastificantes, verificou-se que:

- No estado fresco as dosagens atenderam aos requisitos do ensaio de espalhamento e V-Funil. No ensaio de espalhamento, o concreto do aditivo A com 10% de metacaulim apresentou 91 cm de diâmetro. Fora dos limites do ensaio, que é entre 60 cm e 80 cm. E este resultado ocorreu devido à porcentagem de aditivo utilizada de 1,5% da massa de aglomerante ser a quantidade máxima permitida pelo fabricante e por este aditivo possuir um teor de sólidos de 48,0%. Já nas outras dosagens, os resultados estiveram dentro dos limites para este ensaio. Conforme verificado no artigo 3, onde o ensaio de espalhamento das dosagens com substituição de 10% de metacaulim e sem substituição obtiveram resultado de 70 cm espalhamento, com uma relação a/c igual 0,33. Já no artigo 4, a dosagem sem substituição de metacaulim, relação a/c igual a 0,46, apresentou 64 cm de espalhamento. O tempo de escoamento do ensaio de espalhamento pode variar entre 2,0 s e 7,0 s e este tempo foi atendido por todas as dosagens dos aditivos A, B e C. Nos artigos estudados, não foram apresentados este tempo de espalhamento das dosagens;
- No ensaio do V-Funil, todas as dosagens atenderam ao tempo de queda, ou seja, maior que 6,0 s e menor que 15,0 s. A dosagem com aditivo A e com 10% de metacaulim apresentou o maior tempo (12,5 s) dentre todas as dosagens pois é a dosagem com a menor a relação a/c;
- No estado endurecido, as dosagens alcançaram resultados de resistência superiores a 38,0 MPa aos 28 dias. Mas, as dosagens com o aditivo A e B desenvolveram os melhores resultados devido ao efeito do aditivo, pois possuem maior teor de sólidos, 48,0% e 55,4%, respectivamente. E a resistência obtida pelo concreto com o aditivo A e pelo concreto com o aditivo B foram 49,2 MPa e 53,7 MPa, respectivamente.
- A utilização de metacaulim melhora a característica do concreto, tornando-o mais coeso, resistente e com uma maior fluidez.

Para concluir este trabalho foram realizados estudos de custos de produção para o material do concreto e para a dosagem do concreto. Primeiro, os custos dos materiais estão apresentados na Tabela 25, onde os valores unitários foram pesquisados no mês de abril de 2015.

Tabela 25: Custo dos materiais para a cidade de Recife no mês de abril de 2015

Cimento (R\$/kg)	Metacaulim (R\$/kg)	Areia (R\$/m ³)	Brita 1 (R\$/m ³)	Brita 0 (R\$/m ³)	Pó de Brita (R\$/m ³)	Aditivo (R\$/kg)		
						A	B	C
0,43	1,20	40,00	50,75	50,75	30,00	14,50	13,66	11,35

Na Tabela 26 estão apresentados os custos para a dosagem de 1,0 m³ de concreto na moeda Real e na moeda Dólar. O custo por m³ foi obtido multiplicando o custo de cada material pelo consumo do material. De acordo com o Banco Central do Brasil, no dia 01/04/2015, um dólar está custando R\$ 3,17 (três reais e dezessete centavos).

Tabela 26: Composição de 1,0 m³ de CAA com os consumos de cada material

Concreto com aditivo	Cimento (kg/m ³)	Metacaulim (kg/m ³)	Areia (m ³)	Brita 1 (m ³)	Brita 0 (m ³)	Pó de Brita (m ³)	Aditivo (kg/m ³)	Custo (R\$/m ³)	Custo (U\$/m ³)
A	554,92	61,66	0,33	0,34	0,21	0,08	9,25	490,25	154,65
B	509,66	56,63	0,30	0,31	0,19	0,07	4,53	388,46	122,54
C	497,00	55,22	0,29	0,31	0,18	0,07	5,52	381,19	120,25
A	528,52	-----	0,28	0,29	0,18	0,07	3,97	321,98	101,57
B	534,17	-----	0,28	0,30	0,18	0,07	3,47	314,75	99,29
C	537,04	-----	0,28	0,30	0,18	0,07	2,58	297,87	93,97

Na Tabela 27 estão apresentadas as relações entre resistência e custo do material. O concreto com metacaulim que apresentou o melhor custo-benefício foi o concreto com o aditivo A, mesmo não sendo o menor custo, por causa da alta resistência alcançada, 49,2 MPa. E os concretos B e C obtiveram 38,8 MPa e 39,7 MPa, respectivamente. O concreto sem metacaulim que obteve o melhor custo-benefício foi o concreto com o aditivo B porque apresentou R\$ 5,86 para cada 1,0 MPa de

resistência à compressão, o menor valor entre os 3 concretos e o que alcançou a maior resistência mecânica.

Tabela 27: Relação entre resistência e custo do material

Concreto com aditivo	Custo (R\$/m ³)	Custo (U\$/m ³)	fc ₂₈ (MPa)	Custo (R\$/MPa)	Custo (U\$/MPa)
A (com metacaulim)	490,25	154,65	49,2	9,96	3,14
B (com metacaulim)	388,46	122,54	38,8	10,01	3,16
C (com metacaulim)	381,19	120,25	39,7	9,60	3,03
A (sem metacaulim)	321,98	101,57	40,7	7,91	2,50
B (sem metacaulim)	314,75	99,29	53,7	5,86	1,85
C (sem metacaulim)	297,87	93,97	38,1	7,82	2,47

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto**. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

EFNARC. **Specificacion and Guidelines for Self-Compacting Concrete**. EFNARC, 2002.

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

KARAHAN, O.; HOSSAIN, K. M. A.; OZBAY, E.; LACHEMI, M.; SANCAK, E. Effect of metakaolin content on the properties self-consolidating lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 320-325. 2012.

KHALEEL, O. R.; RAZAK, H. A. Mix design method for self compacting metakaolin concrete with different properties of coarse aggregate. **Materials and Design**, v. 53, p. 691-700. 2013.

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário**. 2005. 183 p. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2005.

MORAIS, K. A. M. **Otimização do uso de adições minerais para a produção do concreto auto-adensável**. 2010. 210 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2010.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997. 738p.

NUNES, S.C.B. **Betão Auto-Compactável: Tecnologia e Propriedades**. 2001. 198p
Pós-graduação em Estruturas de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia,
Universidade do Porto, Porto.

PAIVA, H.; VELOSA, A.; CACHIM, P.; FERREIRA, V. M. Effect of metakaolin dispersion on the fresh and hardened state properties of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 42, p. 607-612. 2012.

PERLOTE, C.; ROUGEAU, P.; DEHAUDT, S. Slurry of metakaolin combined with limestone addition for self-compacted concrete. Application for precast industry. **Cement & Concrete Composites**, v. 44, p. 50-57. 2013.