

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA DE INFRAESTRUTURA

GUSTAVO MARTINS COELHO

ESTUDO DO EFEITO DE ADIÇÕES MINERAIS EM CONCRETO

Joinville

2016

GUSTAVO MARTINS COELHO

ESTUDO DO EFEITO DE ADIÇÕES MINERAIS EM CONCRETO

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Infraestrutura, no curso de Engenharia de Infraestrutura da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Joinville.

Orientador: Dr. Luciano Senff

Joinville

2016

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais e irmã, Ana Maria, Alexandre e Ana Luisa, por terem me dado total confiança e muitas vezes terem abdicado de desejos pessoais para me proporcionar as melhores condições de estudo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Luciano Senff, por toda orientação, compreensão e confiança, tomando possível o desenvolvimento deste trabalho mesmo a distancia.

A professora Helena, coordenadora do curso de engenharia civil da Católica Santa Catarina, por ter liberado seu laboratório para minha pesquisa.

A construtora AJ COELHO, por todo material e espaço fornecido para que eu pudesse desenvolver as amostras.

A todos meus amigos, de Joinville e Florianópolis, especialmente ao Ademar Anselmo Kehl Filho, que me ajudaram e me apoiaram nas horas difíceis.

Por fim, a todos os professores do curso, por todo ensinamento desses últimos anos.

RESUMO

Uma das maiores patologias existentes na construção civil é a infiltração no concreto, e assim como em qualquer área de engenharia, busca-se uma solução a fim de melhorar. Com o avanço da ciência e tecnologia, adições minerais vêm ganhando espaços em pesquisas de laboratórios e aplicações práticas, pois podem alterar benéficamente as propriedades do concreto. Nesta pesquisa, foram utilizados metacaulim e sílica ativa para estudar as possíveis melhorias das propriedades do concreto. Foram produzidos corpos de prova com a quantidade das adições em 10% em relação à massa do cimento e caracterizar os corpos de prova à compressão com 28 dias seguido da realização do ensaio de Arquimedes a fim de estudar as mudanças nas características físicas e mecânicas das amostras. Os corpos de prova com sílica ativa obtiveram melhores resultados comparados aos corpos de prova com metacaulim em todos os ensaios realizados.

Palavras-chaves: Concreto; Metacaulim; Sílica ativa.

ABSTRACT

One of the greatest pathologies existent in civil construction is infiltration through the concrete, and just as in any engineering field, this study sought solutions to get better. Nowadays, with the evolution of technology and the growth of science, mineral additions have been gaining ground in research and practical applications since they may improve substantially the concrete properties. In this research, metakaolin and silica were used to study possible improvements in concrete properties. Were produced samples with an amount of 10% in additions in relation to the weight of the cement and to characterize the samples with 28 days in the compression test followed by the Archimedes test in order to study the changes in the physical and mechanical properties of the samples. The tested silica fume samples performed better found to perform best obtained better results compared to the metakaolin samples in all tests.

Key words: Concrete; Metakaolin; Silica fume.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Causas de patologia na Europa.....	11
Figura 2 – Processo de fabricação da sílica ativa.....	16
Figura 3 – Sílica ativa no estado natural.....	17
Figura 4 - Metacaulim.....	18
Figura 5 – Curva granulométrica da areia.....	21
Figura 6 – Curva granulométrica da brita.....	22
Figura 7 – Cimento utilizado no trabalho.....	22
Figura 8 – Metacaulim utilizado no trabalho.....	23
Figura 9 – Sílica Ativa utilizada no trabalho.....	24
Figura 10 – Corpos de prova nas primeiras 24 horas.....	26
Figura 11 – Prensa servo-hidráulica.....	27
Figura 12 – (a) Fragmentos do CP com sílica ativa.....	28
Figura 12 – (b) Fragmentos do CP com metacaulim.....	28
Figura 12 – (c) Fragmentos do CP referência.....	28
Figura 13 – (a) Determinação da massa interna.....	28
Figura 13 – (b) Determinação da massa de superfície seca.....	28
Figura 14 – <i>Slump test</i> de cada formulação.....	29
Figura 15 – Densidade aparente do concreto com 28 dias de cura.....	30
Figura 16 – (a) Absorção de água do concreto com 28 dias de cura.....	30
Figura 16 – (b) Porosidade aberta do concreto com 28 dias de cura.....	30
Figura 17 – Resistência média dos corpos de prova com 28 dias.....	31
Figura 18 – Resistência à compressão x Densidade aparente.....	31
Figura 19 – (a) Resistência à compressão x Absorção de água.....	32
Figura 19 – (b) Resistência à compressão x Porosidade aberta.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Causas de patologia no Brasil.....	12
Tabela 2 – Composição dos cimentos Portland.....	14
Tabela 3 – Faixa granulométrica da areia.....	14
Tabela 4 – Composição química cimento Votoran CPII-Z.....	23
Tabela 5 – Características metacaulim HP ultra.....	24
Tabela 6 – Composição química da sílica ativa.....	25
Tabela 7 – Formulações dos corpos de prova.....	26
Tabela 8 – Quantidade da adição nos corpos de prova.....	26

LISTA DE ABREVIACOES

REF	Referência
MC	Metacaulim
SA	Sílica Ativa
CP	Corpo de prova

SUMÁRIO

1. Introdução.....	9
2. Revisão Bibliográfica	11
2.1 Patologia na construção civil	11
2.2 Concreto.....	13
2.2.1 Cimento Portland.....	13
2.2.2 Areia.....	14
2.2.3 Brita.....	15
2.3 Adições minerais.....	15
2.4 Sílica ativa.....	16
2.5 Metacaulim	18
3. Materiais e métodos.....	20
3.1 Materiais	21
3.1.1 Areia.....	21
3.1.2 Brita.....	21
3.1.3 Cimento Portland.....	22
3.1.4 Metacaulim.....	23
3.1.5 Sílica ativa.....	24
3.2 Metodologia experimental	25
3.2.1 Resistência à compressão	26
3.2.2 Densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta.....	27
4. Resultado e discussões	29
4.1 Densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta	29
4.2 Resistência à compressão.....	31
5. Conclusões.....	33
Referências	35

1. Introdução

Com alto índice de crescimento, a construção civil é um dos setores mais relevantes da economia brasileira, compondo mais de 170 mil empresas atuantes no mercado nacional (SIMÃO, 2012). Essas empresas alocam elevado contingente de mão-de-obra, o que gera oportunidade de empregos e contribui para elevar o Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro. Todavia, com essa crescente demanda da construção, novas patologias surgiram na rotina de trabalho, prejudicando o andamento das obras e atrasando o término das mesmas. As patologias mais frequentes atualmente são as infiltrações, trincas e descolamentos dos revestimentos (BRISOLARA, 2014).

O concreto é um material que, por suas características de constituição, apresenta vazios (poros) em seu maciço, a evaporação do excesso da água e a quantidade considerável de ar são fatores que aumentam sua porosidade. Uma vez formados estes poros no concreto, o mesmo se torna permeável (MAGALHÃES, 2012).

Segundo Coelho (2013), a falta de impermeabilização é a principal causa para o surgimento das infiltrações, mas que também podem ocorrer pela má instalação de portas ou janelas, por exemplo, que permitem a entrada da água da chuva. Lacialamella (2013) acrescenta que o rompimento de tubulações, gotejamento, corrosão de armadura da laje, desgaste da pintura ou descolamentos de rebocos podem aumentar as chances de aparecer infiltrações.

Dentre as patologias do concreto armado, a que causa mais danos é a corrosão na armadura. As causas mais comuns para esta patologia são: má execução das peças estruturais, ambiente agressivo, proteção insuficiente e concreto de baixa qualidade (HELENE, 1992).

O uso de adições minerais ou aditivos químicos na mistura do concreto tem como finalidade melhorar as características de resistência mecânica, durabilidade, aparência e impermeabilidade, e também evitar efeitos indesejáveis como segregação, fissuramento e bolhas. Uma alternativa para a redução da permeabilidade da água no concreto é o uso de adições minerais que dificultam o deslocamento do líquido (MORAES, 2012). Tendo em vista a preocupação com as consequências dessa patologia, este trabalho propõe o uso de algumas adições minerais que atuam no tamponamento dos capilares que permitem o

deslocamento da água dentro da microestrutura do material endurecido, o que dificultará a ocorrência de infiltrações. Metacaulim e sílica ativa serão os materiais de escolha.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

- Adicionar uma adição mineral ao concreto e analisar o comportamento mecânico e físico das amostras.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Inserir adições como metacaulim e sílica ativa separadamente na mistura do concreto;
- Avaliar resistência à compressão e propriedades físicas (densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta);
- Estabelecer relações entre as propriedades mecânicas e físicas.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Patologia na construção civil

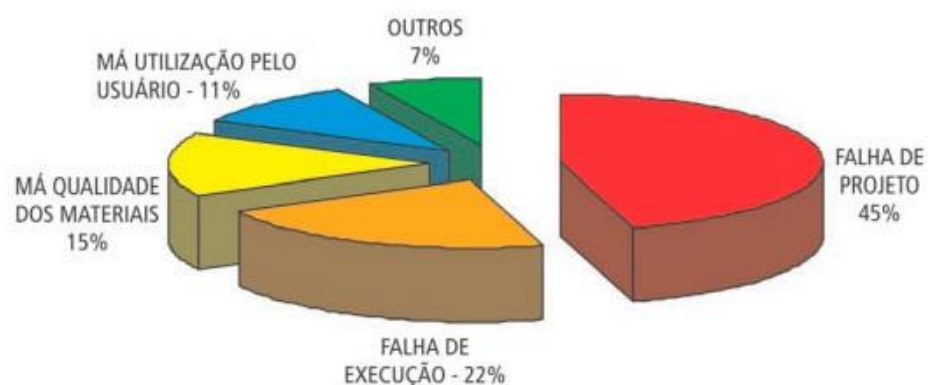
Segundo Gonçalves (2015), o termo “patologia”, dentro da Construção Civil, está relacionado com a definição encontrada na área da medicina, na qual as origens, os sintomas e a natureza das doenças são estudados. Patologias são todas as manifestações cuja ocorrência no ciclo de vida da edificação venha prejudicar o desempenho esperado do edifício.

A patologia na construção civil está em crescente estudo devido ao alto índice de ocorrência pelo mundo. Segundo Oliveira (2013), sua origem, quando não está relacionada a catástrofes naturais, pode ser dividida em três etapas:

- Concepção (planejamento, projeto e materiais);
- Execução;
- Utilização.

Com o intuito de amenizar esses danos nas construções, pesquisas são realizadas para descobrir em qual etapa ocorre o início dessas patologias. Na Europa, uma pesquisa nos revelou que a ocorrência de patologias está principalmente ligada à falha de projetos conforme Figura 1 (COUTO, 2007).

Figura 1 – Causas de patologia na Europa.



Fonte: Couto (2007).

Já no Brasil, a pesquisa (Tabela 1) indica que mais da metade das ocorrências de patologias está relacionada a falhas durante a execução da obra (OLIVEIRA, 2013).

Tabela 1 – Causas de patologia no Brasil.

Etapa	Patologias (%)
Projeto	18
Materiais	06
Execução	52
Utilização	14
Outros	10

Fonte: Oliveira (2013).

A origem dos danos citados na etapa acima está ligada a baixa qualidade técnica dos trabalhadores, tanto na execução do empreendimento quanto no gerenciamento da obra como, por exemplo, descuido de materiais e equipamentos (OLIVEIRA, 2013).

Segundo Dal Molin (1988), um estudo feito no Rio Grande do Sul (RS), revelou que 66% das incidências dos problemas são relacionados à fissuração, 18% à umidade, 8% a descolamentos e 8% a outros problemas.

Existem algumas opções de como prevenir essas patologias como, por exemplo, contratar profissionais com melhor capacidade técnica, utilizar materiais com melhor qualidade, orientar ao cliente a maneira correta de utilizar o imóvel e quais manutenções devem ser feitas (DAL MOLIN, 1988).

No estudo feito no RS, Dal Molin (1988), comparando uma estrutura de boa qualidade e uma de má qualidade juntamente com seus custos de manutenção por ano, observou que em longo prazo o gasto de manutenção da obra com má qualidade se torna tão alto que o custo total da mesma ultrapassa o valor da primeira.

Porém, há uma opção que está em ascensão atualmente, o uso da tecnologia para evitar esses danos como, por exemplo, o uso de aditivos químicos e adições minerais nos materiais. Eles vêm sendo usados em grandes escalas na construção civil em diversas situações (MENDES, 2006).

2.2 Concreto

Coutinho (1997) diz que o concreto é um material formado através da mistura de pedras, areias, ligante hidráulico (cimento), água e eventualmente adições minerais e aditivos químicos. De acordo com a norma ABNT NBR 12655:2006 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, o concreto pode ser classificado em três tipos:

- Concreto Leve: concreto endurecido que apresenta massa específica entre 800 kg/m³ a 2000 kg/m³.
- Concreto Normal: concreto endurecido que apresenta massa específica entre 2000 kg/m³ a 2800 kg/m³.
- Concreto Pesado: concreto endurecido que apresenta massa específica superior as 2800 kg/m³.

Mehta e Monteiro (1994) classificam o concreto a partir da sua resistência à compressão aos 28 dias, sendo dividida entre:

- Concreto de baixa resistência: resistência à compressão menor que 20 MPa.
- Concreto de resistência moderada: resistência à compressão de 20 a 40 MPa.
- Concreto de alta resistência: resistência à compressão superior a 40 MPa.

2.2.1 Cimento Portland

O cimento Portland, composto por clínquer e adições, é o material mais utilizado na construção civil e é usualmente conhecido como cimento. É um pó fino com propriedades ligantes que endurece com a adição de água (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP, 2002).

O clínquer tem como matéria prima principal o calcário e a argila, já as adições são materiais (gesso, escórias de alto forno, materiais pozolânicos e carbonáticos) que misturados ao clínquer na fase de moagem, permite a fabricação de diferentes tipos de cimento Portland (Tabela 2) (ABCP, 2002).

Tabela 2 - Composição dos cimentos Portland.

Tipo de Cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto forno (sigla E)	Material Pozolânico (sigla Z)	Material Carbonático (sigla F)	
Comum	CP I	100		-		NBR 5732
	CP I-S	99 – 95		1 – 5		
Composto	CP II-E	94 – 56	6 – 34	-	0 – 10	NBR 11578
	CP II-Z	94 – 76	-	6 – 14	0 – 10	
	CP II-F	94 – 90	-	-	6 – 10	
Alto-Forno	CP III	65 – 25	35 – 70	-	0 – 5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85 – 45	-	15 – 50	0 – 5	NBR 5736

Fonte: ABCP (2002).

2.2.2 Areia

Segundo a ABNT NBR 7225:1993 a areia é um material natural, de propriedades adequadas, de dimensão nominal máxima inferior a 2,0 mm e dimensão nominal igual ou superior a 0,075 mm (Tabela 3).

Esta é constituída principalmente de quartzo, e com diferentes especificações e usos, como agregados para a construção civil, moldes de fundição, indústrias de transformação (vidro, cerâmica) e tratamento de águas e esgotos.

Tabela 3 - Faixa granulométrica da areia.

Areia	Diâmetro (mm)
Fina	0,075 – 0,42
Média	0,42 – 1,20
Grossa	1,20 – 2,00

Fonte: ABNT (1993).

2.2.3 Brita

A brita é um agregado originado através da britagem ou da diminuição de tamanho de uma rocha maior, como gnaisse, basalto e granito, por exemplo (BAUER, 2008). O processo de britagem pode formar britas de diversos tamanhos para as seguintes finalidades:

- Concreto de cimento;
- Concreto asfáltico;
- Argamassas;
- Correção de solos;
- Pavimentos rodoviários;
- Lastro de estradas de ferro (BAUER, 2008).

2.3 Adições minerais

“Qualquer material, que não seja água, agregados, cimentos hidráulicos ou fibras, usado como ingrediente do concreto ou argamassa e adicionado à massa imediatamente ou durante a mistura” (ASTM C125, 2001).

Segundo Moraes (2012), “As adições minerais melhoram as propriedades do concreto, mas não se deve esperar que possam compensar a baixa qualidade dos constituintes do concreto ou de um traço pobre!!”

As adições minerais mais utilizadas em concreto são as cinzas volantes, sílica ativa, escória de alto-forno, cinzas de casca de arroz, metacaulim e fíller de calcário (MORAES, 2012). Ainda segundo Moraes (2012), as influências dessas adições nas propriedades do concreto são:

- Enquanto fresco:
 - ✓ Maior relação de volume “sólidos/água”;
 - ✓ Melhor trabalhabilidade;
 - ✓ Facilidade para bombear o concreto;
 - ✓ Maior volume de finos e compacidade de pasta;
 - ✓ Menor quantidade de canais de exsudação;
 - ✓ Superpozolanas ocasionando o uso de aditivos superplastificantes;

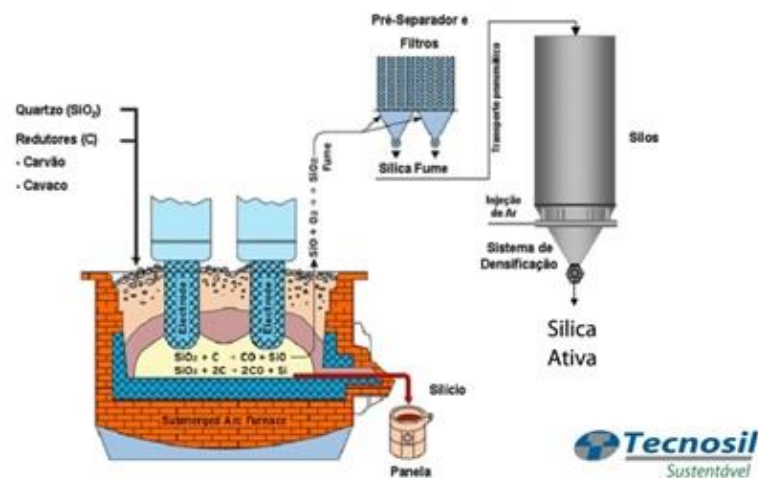
- ✓ Menor risco de fissurações térmicas;
 - ✓ Menor calor de hidratação do que nas reações de hidratação do cimento.
- Enquanto endurecido:
 - ✓ Formação de mais compostos resistentes;
 - ✓ Redução na permeabilidade e porosidade do concreto;
 - ✓ Menor risco da entrada de agentes nocivos.

2.4 Sílica ativa

Sílica ativa, microsílica, fumo de sílica condensada, sílica volatizada ou simplesmente fumo de sílica são alguns nomes dados a esta adição mineral, sendo sílica ativa o mais usual no meio técnico (GUERRA, 2013).

A sílica ativa é um produto resultante do processo de fabricação (Figura 2) de ferro-silício ou de silício metálico. Quartzos (SiO_2) e fontes de carbono são as matérias primas necessárias para a obtenção desta. Realizada em forno elétrico em altas temperaturas, a sílica é reduzida e o carbono liberado em CO_2 . Porém, neste processo algumas reações intermediárias ocorrem na qual parte do silício é liberado na forma gasosa, SiO , e a outra parte em CO . Quando o SiO se resfria, o mesmo se transforma em sílica. Para que não ocorra a poluição do material, ele é captado via filtros (SILVA, 2004).

Figura 2 - Processo de fabricação da sílica ativa.



Fonte: Guimarães (2014).

A ANBT NBR 13956:2012 classifica a sílica ativa em três tipos: sílica ativa não densificada ou no estado natural, sílica ativa densificada e sílica ativa na forma de dispersão aquosa.

A sílica ativa no estado natural (Figura 3) é proveniente diretamente do filtro do coletor. Sua massa específica aparente no estado solto deve variar entre 150 kg/m³ a 350 kg/m³.

A sílica ativa densificada é submetida a beneficiamento por aglomeração das partículas. Sua massa específica no estado solto deve ser superior a 350 kg/m³ a 700kg/m³.

A sílica ativa na forma de dispersão aquosa é um material com teor de sólidos na dispersão aquosa de 50% em massa.

As principais características da sílica ativa são granulometria, área específica e pozolanicidade, função da sua característica amorfa. A sílica ativa deve possuir área específica extremamente alta e ser amorfa (teor de SiO₂ maior que 85%) (SILVA, 2004).

As sílicas ativas, quando usadas de 3% a 10% no traço do concreto, proporcionam melhorias no concreto, algumas de suas vantagens são:

- Aumento da resistência ao desgaste ou abrasão de superfícies de concreto expostas a estes esforços;
- Aumento da resistência mecânica à compressão;
- Aumento do módulo de elasticidade;
- Diminuição da permeabilidade;
- Diminuição da porosidade (TARTUCE, 2011).

Figura 3 - Sílica Ativa no estado natural.



Fonte: Autor (2016).

2.5 Metacaulim

O metacaulim, material amorfo de estrutura cristalina desordenada, é obtido por processo industrial com temperaturas entre 600°C e 850°C de caulins e argilas caulínicas (MEDINA, 2011). Sua estrutura desordenada é ocasionada devido à desidroxilação, ou seja, a retirada dos íons de hidroxilas (OH⁻) da estrutura cristalina (BARATA, 1998).

Constituído basicamente de sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃) na fase amorfa, o metacaulim tem a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio, Ca(OH)₂, ao longo do processo de hidratação do cimento Portland, podendo assim formar produtos hidratados similares aos decorrentes da hidratação do cimento Portland. Essas reações conferem propriedades especiais relacionadas à durabilidade e ao desempenho mecânico no estado endurecido, quando comparadas às propriedades apenas do cimento (MEDINA, 2011).

O metacaulim (Figura 4) é uma adição mineral de alta eficácia para concretos e produtos à base de cimento Portland, destinado a inúmeras aplicações na construção civil em geral, largamente utilizado na Europa, Estados Unidos e Ásia, conferindo inúmeras vantagens (GUERRA, 2013).

Figura 4 – Metacaulim.



Fonte: Metacaulim (2015).

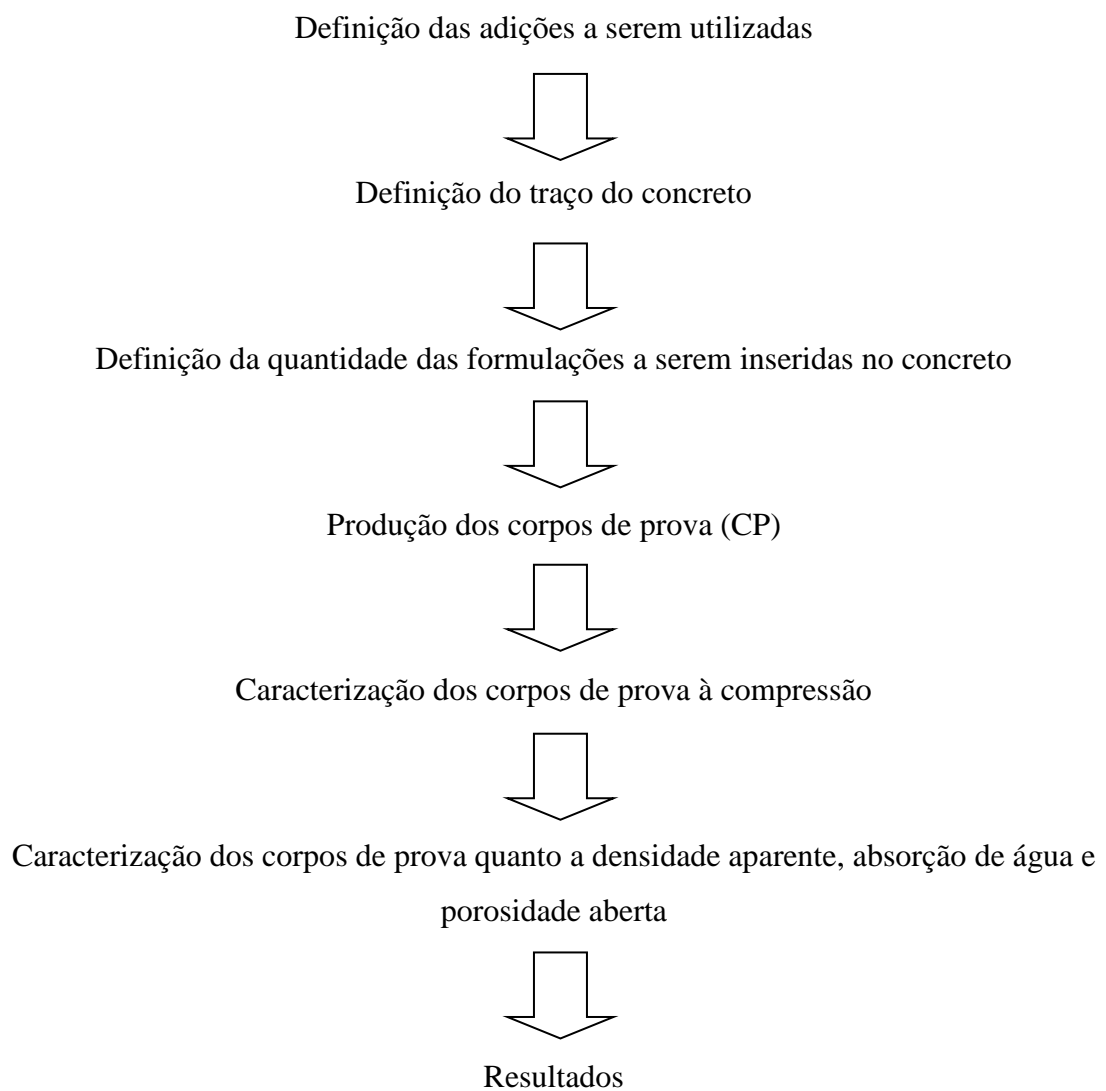
A elevada área superficial melhora aspectos reológicos através da otimização da distribuição granulométrica da pasta, contribuindo na retenção de água, aumento da coesão, redução da exsudação e segregação, facilitando o acabamento final. Suas outras vantagens são (ABNT NBR 15894-1:2010):

- Aumento da resistência mecânica a compressão, abrasão e tração;

- Redução da porosidade e permeabilidade;
- Redução da corrosão das armaduras;
- Aumento da resistência a sulfatos;
- Melhoria estética da superfície;
- Resistência a difusibilidade de íons cloreto;
- Mitigação da reação álcali-agregado;
- Redução da ocorrência de eflorescência
- Aumento da resistividade elétrica.

3. Materiais e métodos

No atual capítulo, são apresentados os materiais e equipamentos utilizados para a realização de todos os ensaios no qual as amostras foram submetidas, assim como todo passo a passo para o desenvolvimento do trabalho, para isso foi criado o fluxograma a seguir:



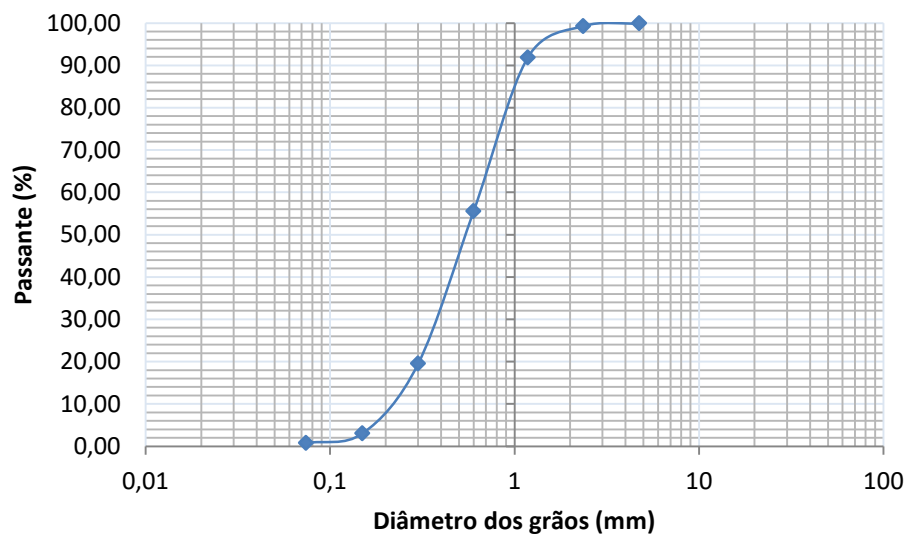
3.1 Materiais

A seguir, são mostrados todos os materiais utilizados para a realização dos corpos de prova deste trabalho.

3.1.1 Areia

A distribuição granulométrica da areia foi obtida através do peneiramento mecânico de uma amostra o qual foi classificado como sendo uma areia média como pode ser observado na curva granulométrica (Figura 5). O módulo de finura é de 2,67.

Figura 5 – Curva granulométrica da areia.

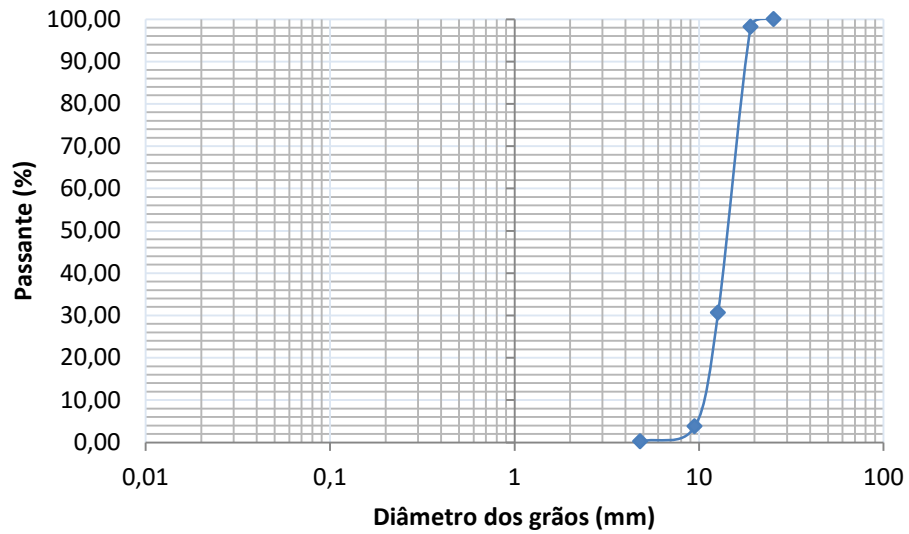


Fonte: Autor (2016).

3.1.2 Brita

Assim como a areia, também foi realizado um peneiramento para detectar o tamanho da brita. Constatou-se uma maior quantidade de material retido na peneiras 12,7mm, classificando como brita 1, como pode ser observado na curva granulométrica (Figura 6). Seu módulo de finura é 3,3.

Figura 6 – Curva granulométrica da brita.



Fonte: Autor (2016).

Quanto à densidade aparente o resultado revelou o valor de $2,84\text{g/cm}^3$.

3.1.3 Cimento Portland

O cimento utilizado (Figura 7) no presente trabalho foi da marca Votoran classificado como CII-Z (Tabela 4), muito comum na região da grande Florianópolis. É um cimento para uso geral. Muito versátil, pode ser utilizado da fundação ao acabamento na obra. Ideal para reboco, concreto tradicional, contrapiso e lajes. Sua massa específica real é de $3,02\text{g/cm}^3$ (GOMES, 2015).

Figura 7 – Cimento utilizado no trabalho.



Fonte: Autor (2016).

Tabela 4 – Composição química cimento Votoran CP II-Z.

Cimento Portland CP II-Z	
Perda ao fogo	5,34%
Óxido de magnésio – MgO	5,87%
Anidrido Sulfúrico – SO ₃	2,70%
Anidrido carbônico – SO ₃	4,37%
Resíduo insolúvel – RI	12,80%
Equivalente alcalino em Na ₂ O	0,74%
Finura – Peneira 0,075mm	3,10%
Água de pasta de consistência normal	26,80%
Início de pega (min)	246
Fim de pega (min)	330
Expansibilidade de Le Chatelier – a quente (mm)	0,55
Área específica	374m ² /kg

Fonte: Marangon (2013).

3.1.4 Metacaulim

Neste trabalho foi utilizado o Metacaulim HP ultra (Figura 8), fornecido pela empresa Metacaulim do Brasil. Material superfino cuja finalidade é melhorar as propriedades do concreto. Sua composição química, conforme a Tabela 5 está entre os valores limites da ABNT NBR 15894-1:2010 (Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta).

Figura 8 – Metacaulim utilizado no trabalho



Fonte: Autor (2016).

Tabela 5 – Características metacaulim HP ultra.

Propriedades Fisico-Químicas	Valores típicos
SiO ₂	57%
Al ₂ O ₃	34%
CaO + MgO	<0,1%
SO ₃	<0,1%
Na ₂ O	<0,1%
Eq. Alcalino Na ₂ O	<1,5%
Fe ₂ O ₃	2%
TiO ₂	1,5%
Umidade	0,5%
Perda ao fogo	3%
Atividade Pozzolânica Chapelle	880mg Ca(OH) ₂ /g
Área específica BET	~23 m ² /g
Massa específica	2560 kg/m ³
Tamanho da partícula	12,4 µm

Fonte: Metacaulim (2015); Mota (2015).

3.1.5 Sílica ativa

Material da empresa Silcca Nobre (Figura 9) localizado na cidade de Alegrete/RS, cuja composição está na Tabela 6, muito utilizado na construção civil para concretos, argamassas e pasta de cimento devido seu diâmetro ser muito pequeno.

Figura 9 – Sílica Ativa utilizada no trabalho.



Fonte: Autor (2016).

Tabela 6 – Composição química da sílica ativa.

Propriedades Fisico-Químicas	Valores típicos
Perda ao fogo	3,30%
Dióxido de silício - SiO ₂	91,48%
Óxido de Cálcio – CaO	0,36%
Óxido de Magnésio – MgO	0,32%
Óxido de alumínio - Al ₂ O ₃	0,05%
Óxido de ferro - Fe ₂ O ₃	0,00%
Óxido de sódio - Na ₂ O	0,04%
Óxido de potássio - K ₂ O	1,40%
Óxido de manganês – MnO	0,32%
Anidrido Sulfúrico - SO ₃	0,15%
Pentóxido de Difósforo – P ₂ O ₅	0,45%
Área específica	~21 m ² /g
Massa específica	2030 kg/m ³
Tamanho da partícula	14,1 µm

Fonte: Marangon (2013).

3.2 Metodologia experimental

Como comentado no início deste capítulo, foram pesquisadas adições minerais que poderiam melhorar as propriedades do concreto, principalmente aquelas que pudessem alterar a microestrutura porosa interna do concreto. Dentre as adições pesquisadas, duas foram escolhidas a fim de utilizá-las no trabalho entre elas o metacaulim e a sílica ativa.

O traço (Tabela 7) escolhido no presente trabalho (1:2:2:1,5 = cimento, areia, brita, água – em volume) é amplamente empregado nas obras da região, resultando num *slump test* 12 ± 2 cm. O metacaulim e sílica ativa foram utilizados na forma de adição no teor igual a 10% em massa em relação ao cimento.

Tabela 7 – Formulações dos corpos de prova.

Matérias-primas	Quantidade em Litros
Cimento	4
Areia	8
Brita	8
Água	6

Fonte: Autor (2016).

3.2.1 Resistência à compressão

Com o intuito de analisar a influência das adições na resistência dos corpos de prova, foi realizado teste de compressão. Para isso, foram produzidas três formulações distintas, sendo quatro amostras de cada (Figura 10), do tamanho 10x20 cm com a mesma porcentagem para a sílica ativa e o metacaulim (Tabela 8). Após 24 horas os corpos de prova já estavam desmoldados.

Figura 10 – Corpos de prova nas primeiras 24 horas.



Fonte: Autor (2016).

Tabela 8 – Quantidade da adição nos corpos de prova.

	Quantidade de adição em relação ao peso do cimento	
	MC	SA
Concreto referência (REF)	0	0
Concreto + sílica ativa (10SA)	0	10% (0,6 L)
Concreto + metacaulim (10MC)	10% (0,47 L)	0

Fonte: Autor (2016).

O equipamento utilizado para romper os corpos de prova foi o PC200CS da marca Emic (Figura 11), uma prensa servo-hidráulica com capacidade máxima de 200 toneladas.

Figura 11 – Prensa servo-hidráulica.



Fonte: Emic (2016).

3.2.2 Densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta

Para analisar as propriedades físicas dos corpos de prova, foi realizado o ensaio de Arquimedes, no qual se determina as propriedades físicas das formulações estudadas. Foi necessário definir os valores de massa seca, massa imersa e massa de superfície dos corpos de prova.

Após os 28 dias de cura, os corpos de provas foram rompidos e foram obtidos fragmentos (Figura 12) para cada formulação. Foram colocados esses fragmentos em estufa a temperatura de 100 +/- 2°C durante 24 horas. Após esse período foi determinada a massa seca (M_s) dos fragmentos. Na sequência, foram imersos em água por 72 horas, seguido da determinação da massa imersa (M_i) (Figura 13 (a)). Por último, depois de retirado da água, a superfície dos fragmentos foi seca e então os pedaços foram novamente pesados determinando assim a massa de superfície seca (M_{ss}) (Figura 13 (b)).

Os valores da densidade aberta, absorção de água e porosidade aberta foram calculadas pelas seguintes fórmulas:

$$\text{Densidade Aparente} = \frac{m_s}{m_{ss} - m_i}$$

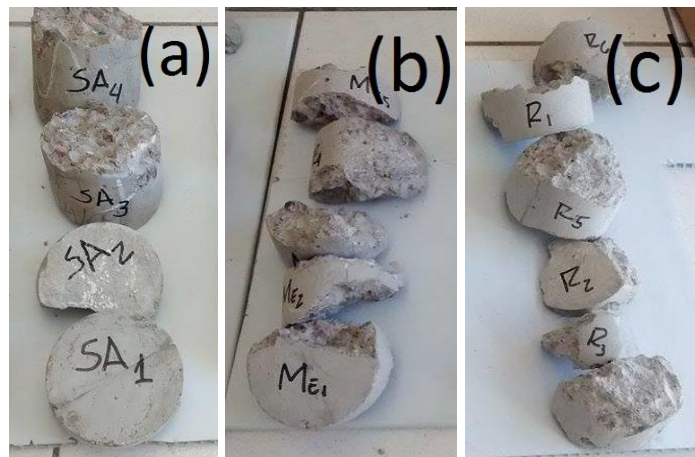
$$\text{Absorção de Água} = \left(\frac{m_{\text{sss}} - m_{\text{s}}}{m_{\text{s}}} \right) \times 100$$

$$\text{Porosidade Aberta} = \left(\frac{m_{\text{sss}} - m_{\text{s}}}{m_{\text{sss}} - m_{\text{i}}} \right) \times 100$$

Onde nas fórmulas:

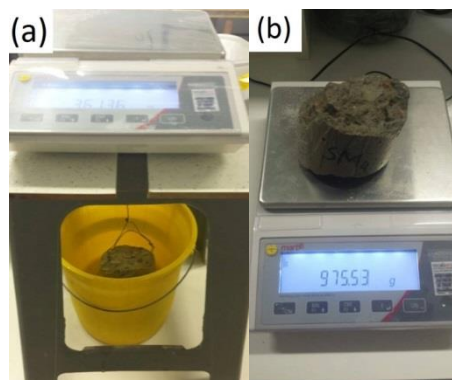
- M_{sss} = massa de superfície seca;
- M_{s} = massa seca;
- M_{i} = massa imersa.

Figura 12 – (a) Fragmentos do CP com sílica ativa, (b) fragmentos do CP com metacaulim e (c) fragmentos do CP referência.



Fonte: Autor (2016).

Figura 13 – (a) Determinação da massa imersa e (b) Determinação da massa de superfície seca.

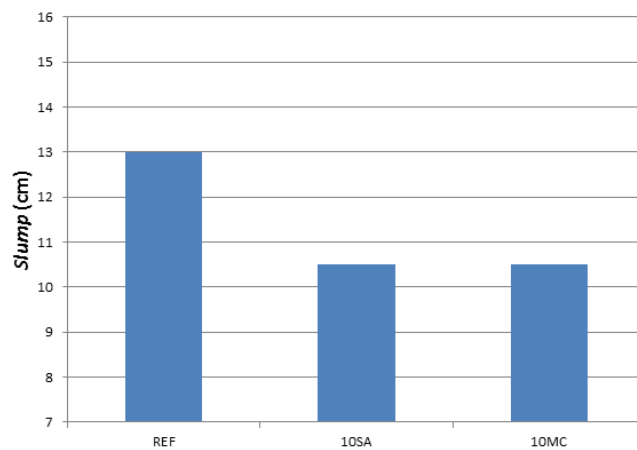


Fonte: Autor (2016).

4. Resultado e discussões

Para a determinação da trabalhabilidade das formulações, foi obtidas informações com o *slump test* (Figura 14). A quantidade de água foi mantida constante, o que resultou na menor fluidez do material produzido. Este fato está atribuído a elevada área superficial das adições que acabam por reduzir (devido a molhabilidade) a água livre do sistema quando comparado a amostra REF.

Figura 14 – *Slump test* das formulações testadas.



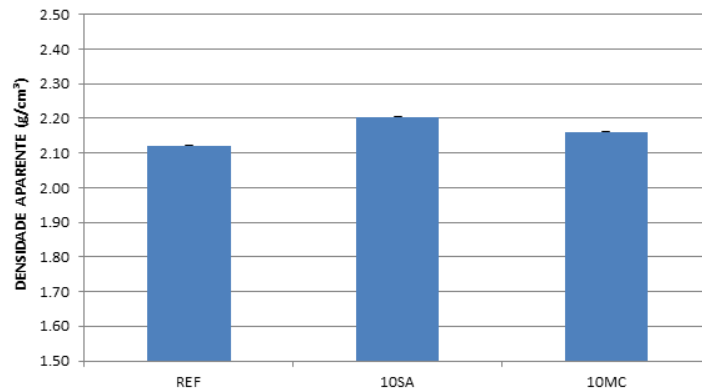
Fonte: Autor (2016).

4.1 Densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta

As propriedades físicas – densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta, influenciam diretamente na resistência à compressão do concreto, conforme veremos a seguir.

Na Figura 15, se percebe que todas as amostras tiveram um aumento da densidade aparente em relação ao REF aos 28 dias, resultado que influencia diretamente com a resistência à compressão do concreto. Esse aumento na densidade está relacionado ao fato das adições apresentarem um tamanho de partículas menores que o cimento preenchendo assim os vazios no interior da amostra.

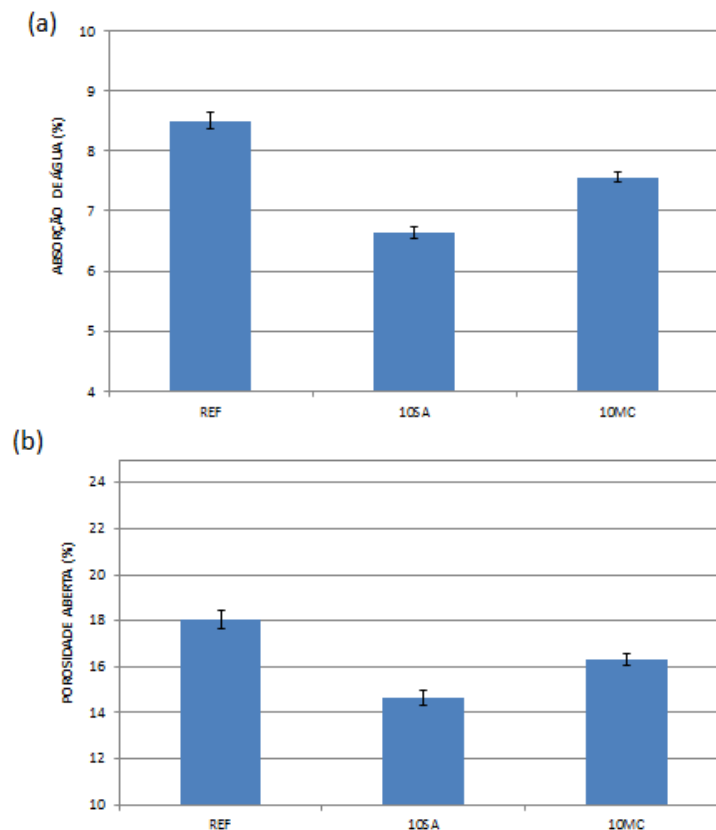
Figura 15 – Densidade aparente do concreto com 28 dias de cura.



Fonte: Autor (2016).

Observando a Figura 16 percebemos que a absorção da água e a porosidade aberta diminuem nas amostras em que as adições se fazem presente, o fato da área específica das adições serem bem elevadas e apresentarem um diâmetro médio menor que o cimento resulta em um maior preenchimento dos vazios, logo absorvem menos água.

Figura 16 – (a) Absorção de água do concreto com 28 dias de cura e (b) Porosidade aberta do concreto com 28 dias de cura.

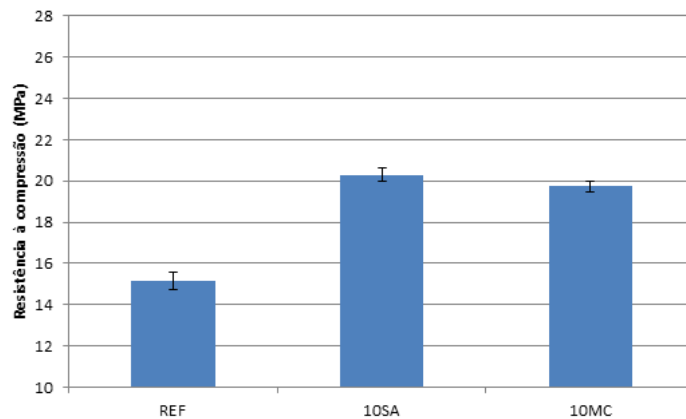


Fonte: Autor (2016).

4.2 Resistência à compressão

O resultado da resistência à compressão aos 28 dias de cura (Figura 17) foi obtido a partir do valor médio de três corpos de prova. Como se pode ver, as adições minerais influenciaram na resistência final, uma vez que está diretamente ligado ao tamanho das partículas das adições, que por serem muito finas, preenchem os vazios no interior do concreto deixando-o mais resistente. Como as duas adições apresentam tamanho de partículas muito similares, o resultado de ambas são bem próximo entre si. O desvio-padrão apresentou valores pequenos em todas as amostras testadas.

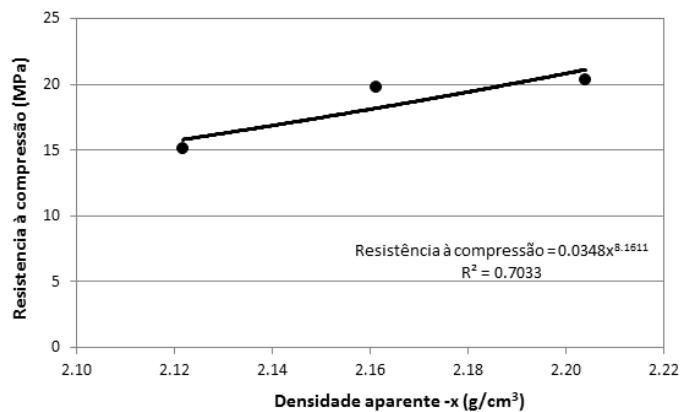
Figura 17 – Resistência média à compressão dos corpos de prova com 28 dias.



Fonte: Autor (2016).

Na Figura 18, pode-se olhar visualmente o ganho de resistência à compressão com o aumento da densidade aparente, confirmando a relação entre ambos, e isso é satisfatoriamente descrito pelo modelo de potência.

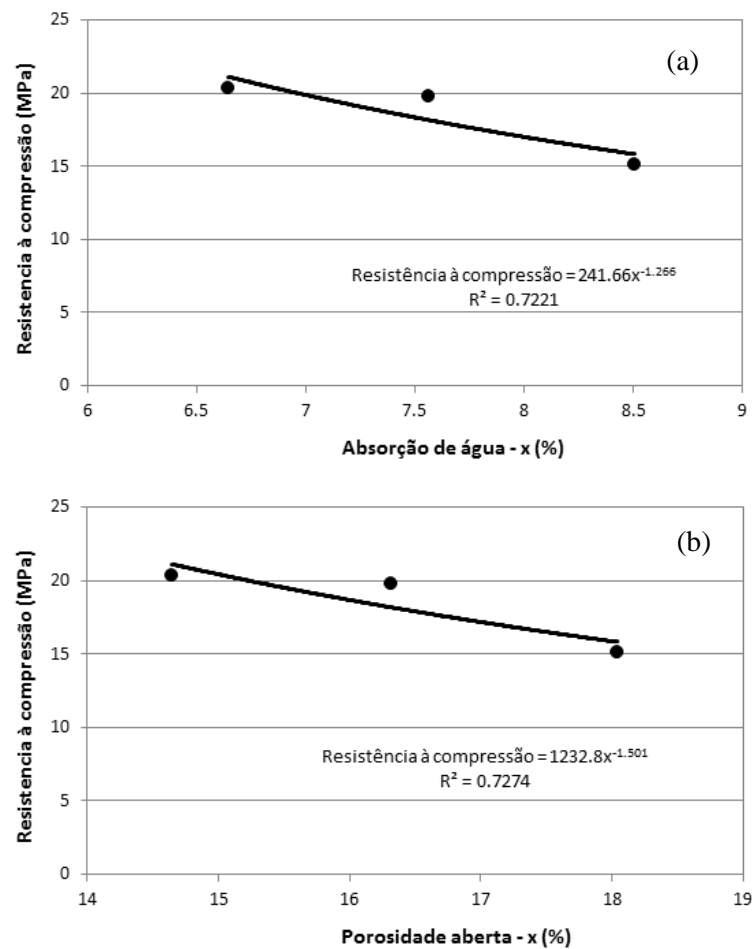
Figura 18 – Resistência à compressão x Densidade aparente.



Fonte: Autor (2016).

Na Figura 19 podemos analisar que a absorção da água e a porosidade aberta se relacionam inversamente com a resistência à compressão, pois com a redução da absorção da água e da porosidade aberta o concreto teve sua resistência elevada, o que é descrito pelo modelo de potência.

Figura 19 – (a) Resistência à compressão x Absorção de água e (b) Resistência à compressão x Porosidade aberta.



Fonte: Autor (2016).

5. Conclusões

A inclusão de adições minerais no concreto afetou suas propriedades físicas e mecânicas. Todas as amostras obtiveram resultados aprimorados em todos os ensaios em relação a REF.

Os resultados das amostras com 10% de adição mineral apresentou um ganho de resistência à compressão em média de 30%, seguido com o aumento do resultado da densidade aparente, quase 4% para a sílica ativa e quase 2% para o metacaulim.

Analisando a absorção de água das amostras, houve uma redução de 1% a 1,9% das adições, o mesmo se repete para a porosidade aberta que teve redução de 1,7% a 3,3%.

Tais melhorias estão relacionadas à capacidade que estas adições possuem em melhorar o grau de empacotamento, tornando a microestrutura menos porosa.

O ensaio de resistência à compressão dentro do esperado por tal adição, já os ensaios de porosidade aberta, absorção de água e densidade aparente teve pouca melhoria em relação à REF. Os CPs com sílica ativa obteve resultados melhores em relação aos CPs com metacaulim, porém as adições merecem um estudo apropriado de custo para saber se o uso destas vale a pena ser aplicado com a finalidade de evitar patologias como a infiltração na estrutura, pois a sílica ativa tem um custo em média quatro vezes mais alto que o cimento e o metacaulim 2,5 vezes.

Sugestões para trabalhos futuros

Esse trabalho explorou apenas algumas formulações das adições, então se sugere para os próximos trabalhos:

- Testar as adições com diferentes porcentagens em relação à massa do cimento a fim de melhorar as propriedades físicas e mecânicas;
- Testar as adições com diferentes quantidades de água a fim de obter uma formulação mais resistente;
- Realizar as mesmas formulações com aditivos superplastificantes para reduzir a quantidade de água;

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. Informações técnicas – matérias primas sintéticas. **Sílica Ativa**. Disponível em:

<<http://www.abceram.org.br/site/?area=4&submenu=48>>. Acesso em: 19.nov.2015

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7.ed. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7225**. Materiais de pedra e agregados naturais. Rio de Janeiro, 1993.

_____. **NBR 12655**. Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. **NBR 13956**. Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland – Especificação, 2012. Disponível em:
<<https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=dW5uYS51bmcuYnJ8aG9tZXxneDozODQxZmI1NzE5OGYxZjFl>>. Acesso em: 08 set. 2016.

_____. **NBR 15984-1**. Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto argamassa e pasta. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C125**. Standart Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. West Conshohocken: ASTM, 2001.

BARATA, Márcio Santos. **Concreto de alto desempenho no estado do Pará: estudo de viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim**. 1998. 42p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1998.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BRISOLARA, Gil Carlos Pegoraro. **Patologia na construção civil: A permanência de velhos erros em novos contextos**. 2014. Disponível em:< <http://www.crea-sc.org.br/portal/index.php?cmd=artigos-detalle&id=3119#.WERWJfkrLIU>>. Acesso em: 02.dez.2016

COELHO, Laurimar; LACIALAMELLA, Thais. **O que fazer com as infiltrações na sua casa**. Disponível em: < <http://revista.zapimoveis.com.br/saiba-como-evitar-infiltracoes-na-sua-casa/>>Acesso em 02.dez.2016

COUTINHO, A. S. **Fabrico e Propriedades do Betão**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 1997. 401 p. V.1.

COUTO, João P.; COUTO, Amanda M. **Importância da revisão dos projectos na redução dos custos de manutenção das construções**. In: CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2007, 3, 2007, Coimbra, Portugal. Universidade de Coimbra, 2007.

GOMES, Carlos Marmorato; MARLON, Luiz Fernando. **Redução potencial do cimento Portland por meio da sílica da casca do arroz(SCA)**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Anais do 57°. Alegrete, RS. 2015. Artigo.

GONÇALVES, Eduardo Albuquerque Buys. **Estudo de patologias e suas causas nas estruturas de concreto armado de obras de edificações**. 2015. 18p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2015.

GUERRA, Ruy Serafim de Teixeira. **Metacaulim**. 2013. Disponível em:<
<http://www.clubedoconcreto.com.br/2013/12/metacaulim.html>>. Acesso em 02.dez.2016

GUERRA, Ruy Serafim de Teixeira. **O que é Microsílica? E Microsílica ativa?**. 2013. Disponível em:< <http://www.clubedoconcreto.com.br/2013/11/o-que-e-microsilica-e-microsilica-ativa.html>>. Acesso em 02.dez.2016

GUIMARÃES, João Paulo Fernandes. Processo de Fabricação. In: **Sinergia Entre a Nano sílica e a Sílica Ativa na Produção de Concreto**. Slide 5, 2014. Color. Disponível em:
<<http://www.ibracon.org.br/eventos/56cbc/JPauloGuimaraes.pdf>>. Acesso em 18.nov.2015

HELENE, P. R. L. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. 2ª ed - São Paulo: PINI, 1992.

MARANGON, E. et al. **Atividade pozolânica da sílica da casca de arroz, produzida por combustão em leito fluidizado**. In: 55º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Anais do 55º Alegrete, RS. 2013. Artigo

MEDINA, Engler Apaza. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binário com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. 2011. 11p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia De Construção Civil E Urbana, Escola Politécnica, Universidade De São Paulo, São Paulo. 2011.

MEHTA, Povindar K.; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 581 p.

MENDES, Gustavo. **Aditivos e adições**. 2006. Disponível em:<
<http://construcaomercado.pini.com.br/negocios-incorporacao-construcao/62/aditivos-e-adicoes-desempenho-aditivado-283188-1.aspx>>. Acesso em: 02.dez.2016

METACAULIM. **Clube do Concreto**. Disponível em:
<<http://www.clubedoconcreto.com.br/2013/12/metacaulim.html>>. Acesso em: 23.nov.2015.

MOTA, João M. F. et al. **Estudo comparativo entre o desempenho de argamassas inorgânicas contendo metacaulim – opções de substituição de parte do cimento e simples adição à mistura**. In: 11º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. Porto Alegre, RS. 2015. Artigo.

OLIVEIRA, Daniel Ferreira. **Levantamento de causas de patologias na construção civil**. 2013. 31p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2013.

PROCESSO DE FABRICAÇÃO. **Mapa da Obra**. Votorantim Cimentos. Disponível em: <<http://www.mapadaobra.com.br/produtos/agregados/fabricacao>>. Acesso em: 25.nov.2015.

SILVA, Fernanda Giannotti da; LIBÓRIO, Jefferson B. L. **Durabilidade do concreto de alto desempenho com sílica de Fe-Si ou silício metálico em ambiente marinhos**. 2004. 2pg. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Materiais, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

SIMÃO, Paulo Safady. **Construção Civil: mercado cresce no país e aponta grandes desafios no setor**. 2012. Disponível em: <http://www.techoje.com.br/site/techoje/categoria/detalhe_artigo/1157>. Acesso em: 02.dez.2016

TARTUCE, Ronaldo. **Principio básico sobre resistência**. Tecnosil. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/6161556-Silica-ativa-desenvolvimento-economico-em-harmonia-com-meio-ambiente-silica-ativa-31-de-agosto-a-2-de-setembro.html>>. Acesso em: 23.nov.2015.