



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ARETUZA KARLA ARAÚJO DA ROCHA

DESEMPENHO DE ARGAMASSAS PARA CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS
COM BAIXOS TEORES DE CIMENTO PORTLAND

João Pessoa - Paraíba

2020

ARETUZA KARLA ARAÚJO DA ROCHA

**DESEMPENHO DE ARGAMASSAS PARA CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS
COM BAIXOS TEORES DE CIMENTO PORTLAND**

Tese submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração: **Estruturas e Materiais**

Orientador: **Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa**

João Pessoa – Paraíba

2020

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

R672d Rocha, Aretuza Karla Araújo da.

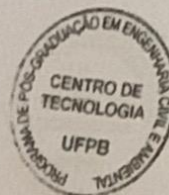
DESEMPENHO DE ARGAMASSAS PARA CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS
COM BAIXOS TEORES DE CIMENTO PORTLAND / Aretuza Karla
Araújo da Rocha. - João Pessoa, 2020.
121 f. : il.

Orientação: NORMANDO PERAZZO BARBOSA BARBOSA.

Coorientação: MARCOS ALYSSANDRO SOARES DOS ANJOS ANJOS.
Tese (Doutorado) - UFPB/PPGECAM/CT.

1. ARGAMASSA, ADIÇÕES MINERAIS, CARBONATAÇÃO. I.
BARBOSA, NORMANDO PERAZZO BARBOSA. II. ANJOS, MARCOS
ALYSSANDRO SOARES DOS ANJOS. III. Título.

UFPB/BC



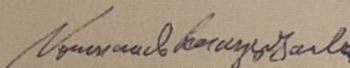
Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental
- Mestrado e Doutorado -

Ata da reunião da banca julgadora da 10ª Tese de Doutorado do PPGECAM apresentada pela Doutoranda Aretuza Karla Araújo Da Rocha no dia 28 de fevereiro de 2020.

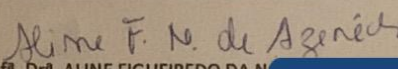
Aos vinte e oito do mês de fevereiro de dois mil e vinte, às 14:30 horas, teve lugar na sala de aula do LABEME da Universidade Federal da Paraíba, a apresentação da Tese de doutorado intitulada: "DESEMPENHO DE ARGAMASSAS PARA CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM BAIXOS TEORES DE CIMENTO PORTLAND", pela doutoranda Aretuza Karla Araújo Da Rocha, matrícula 2015113031, do corpo discente deste Programa, com vistas à obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil e Ambiental. A Banca Examinadora esteve composta pelos Professores Doutores Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa (Orientador), Profª. Drª. Aline Figueiredo da Nóbrega Azeredo (Examinadora Interna), Prof. Dr. Gibson Rocha Meira (Examinador Interno), Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento (Examinador Externo) e Prof. Dr. Júlio César de Oliveira Freitas (Examinador Externo), sendo presidida, por indicação dos seus membros, pelo Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa. Instalada a Banca Examinadora, o senhor Presidente passou a palavra à doutoranda para apresentar a defesa do seu trabalho de tese. A exposição oral iniciou às 15:00, sendo concluída às 15:45, iniciando-se, logo a seguir, a arguição pelos examinadores, finalizando às 17:40. Em seguida, o senhor Presidente convidou a Banca Examinadora a reunir-se reservadamente para deliberação. Concluída a reunião, o senhor Presidente convocou a doutoranda e demais presentes para proclamar o resultado, sendo atribuído por unanimidade, à doutoranda, o conceito APROVADO, nos termos do Regulamento Geral dos Cursos e Programas de Pós-Graduação *Stricto Sensu* da Universidade Federal da Paraíba (Resolução nº 12/00-CONSEPE) e do Regulamento do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba (Resolução nº 042/2016-PPGECAM). Ao final da sessão, após os agradecimentos por parte da doutoranda, o senhor Presidente, por recomendação dos membros da banca, estabeleceu um prazo máximo de _____ dias para a doutoranda providenciar as correções recomendadas, ficando a emissão do diploma do título de Doutora condicionado a essas retificações que serão verificadas pelo Orientador. Às 17:45, o senhor Presidente encerrou os trabalhos, determinando a leitura para fins de aprovação e a lavratura da presente ata que vai assinada por todos os membros da comissão examinadora.

João Pessoa, 28 de fevereiro de 2020. Normando Perazzo Barbosa, Aline Figueiredo Da Nóbrega Azeredo, Gibson Rocha Meira, José Wallace Barbosa do Nascimento e Júlio César de Oliveira Freitas.

(Orientador)


Prof. Dr. NORMANDO PERAZZO BARBOSA

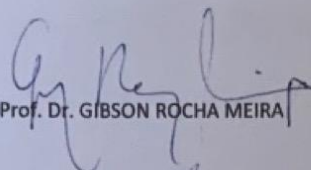
(Membro Interno)


Profª. Drª. ALINE FIGUEIREDO DA NÓBREGA AZEREDO

Feito com o Digitalizador para Mim



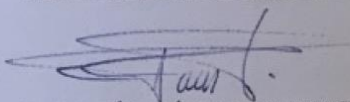
(Membro Interno)


Prof. Dr. GIBSON ROCHA MEIRA

(Membro Externo)


Prof. Dr. JOSÉ WALLACE BARBOSA DO NASCIMENTO

(Membro Externo)


Prof. Dr. JÚLIO CÉSAR DE OLIVEIRA FREITAS

Feito com o Digitalizador para Mim

ARETUZA KARLA ARAÚJO DA ROCHA

**DESEMPENHO DE ARGAMASSAS PARA CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS
COM BAIXOS TEORES DE CIMENTO PORTLAND**

Tese aprovada em 28/02/2020, como requisito para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba – UFPB.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa
Orientador – PPGECAM – UFPB

Prof. Dra. Aline Figueiredo da Nóbrega Azeredo
Examinador Interno – PPGECAM - UFPB

Prof. Dr. Gibson Rocha Meira
Examinador Interno – PPGECAM - UFPB

Prof. Dr. Jose Wallace Barbosa do Nascimento
Examinador Externo – UFCG

Prof. Dr. Júlio César de Oliveira Freitas
Examinador Externo – UFRN

Deus reuniu todas as águas e as
chamou de 'mar'.

Reuniu todas as graças e as
chamou de 'Maria'!

(São Luiz Maria Grignion de Montfort)

Dedico este trabalho a Deus, ao
meu filho, ao meu marido, a
meus pais, irmãos, sobrinhos e
aos meus avós!

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Normando Perazzo Barbosa pela orientação, paciência, conselhos e ensinamentos que possibilitaram a conclusão do presente trabalho e por todos os meios colocados à disposição. Agradeço igualmente a excelência da formação prestada e conhecimentos transmitidos que foram úteis para esta tese.

Ao professor Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos pela ideia do tema e coorientação inicial e por todo apoio em permitir usufruir do Laboratório do IFRN na parte experimental do trabalho.

Agradecimentos especiais aos amigos Hugo, Anne, Evilane, Larissa, Nathaly, Amanda, Pedro, por todo empenho e colaboração na parte experimental desta tese.

A Universidade Federal de Roraima – UFRR, em especial à professora Ednalva Dantas Rodrigues da Silva Duarte, por permitirem meu afastamento da Instituição possibilitando a realização desta conquista.

Aos membros da banca examinadora pelas sugestões propostas.

Finalmente, a todos que contribuíram de forma decisiva para a concretização deste trabalho.

RESUMO

A busca pela sustentabilidade na indústria do concreto passa pelo uso cada vez mais intensivo de materiais de substituição do cimento Portland. Esses materiais, comumente chamados de adições minerais, quando utilizados em grande quantidade podem reduzir a alcalinidade da água dos poros do concreto, o que favorece à corrosão de armaduras no concreto armado. Este trabalho procura dar uma contribuição neste campo, tendo-se estudado argamassas autoadensáveis em que o cimento Portland foi substituído em 40%, em massa, por cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (SCBA), cinzas de casca de arroz (RHA) e metacaulim (MK), além de misturas binárias entre as adições. Foi verificado também o efeito da substituição de mais 10% do cimento por cal. Assim, além da argamassa de referência, foram feitas 12 composições envolvendo os materiais citados, sendo seis sem cal e seis com cal. A relação ligante:areia foi de 1:1,64, e a relação água/ligante igual a 0,44. Foi otimizada a percentagem de aditivo através de medições do espalhamento do mini cone e medido o teor de ar incorporado das misturas no estado fresco. No estado endurecido obteve-se a resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 70 dias e absorção de água por capilaridade aos 28 dias. Foi estudado o efeito da carbonatação acelerada nas diferentes composições, através de corpos de provas cúbicos, imersos em uma câmara de carbonatação com concentração de 10% de CO₂. Através da aspersão de fenolftaleína, foram obtidas as profundidades de carbonatação, aos 3, 7, 14 e 28 dias após os corpos de prova serem colocados na câmara. A microestrutura das treze composições foi analisada através de ensaio de difratometria de raios X (DRX) e termogravimetria (TG), destacando-se a presença e o teor de hidróxido de cálcio e de carbonato de cálcio. As análises foram feitas antes de os corpos de prova entrarem na câmara de carbonatação e após 28 dias dentro dela. Os resultados indicaram que todas as misturas com adições reduziram significativamente a absorção de água por capilaridade, o metacaulim apresentando o melhor desempenho. As misturas binárias conduziram a maiores valores de resistência à compressão quando se tinha cinza do bagaço de cana. A incorporação da cal interferiu pouco nesta propriedade. A argamassa de referência apresentou maior valor da resistência, chegando a 66 MPa aos 70 dias de idade havendo duas outras composições que superaram os 60 MPa. Quanto à penetração da frente de carbonatação, a referência foi a que apresentou menor valor. As misturas binárias conduziram a maior profundidade de carbonatação. A presença da cal não reduziu esse efeito. Os ensaios de DRX e TG, mostraram que as adições reduziram a quantidade de hidróxido de cálcio disponível, antes da carbonatação acelerada. Após ela ocorrer, o hidróxido de cálcio não se faz presente. Apesar de em alguns parâmetros o desempenho com adições ser inferior ao da referência, as argamassas aqui desenvolvidas podem ter aplicação prática na fabricação de concretos auto adensáveis, com consideráveis benefícios ambientais.

Palavras chave: argamassa, adições minerais, carbonatação.

ABSTRACT

The search for sustainability in the concrete industry involves an increasingly intensive use of Portland cement replacement materials. These materials, commonly called mineral additions, when used in large quantities can reduce the water alkalinity of the concrete pores, which can favor the corrosion of reinforcement in reinforced concrete. This work seeks to make a contribution in this field, having studied self-compacting mortars in which Portland cement has been replaced by 40%, in mass, by sugarcane bagasse ash (SCBA), rice husk ash (RHA) and metakaolin (MK), in addition to binary mixtures between additions. The effect of replacing an additional 10% of cement by lime was also verified. Thus, in addition to the reference mortar, 12 compositions were made involving the mentioned materials, six without lime and six with lime. The binder: sand ratio was 1: 1.64, and the water / binder ratio was 0.44. The percentage of additive was optimized through measurements of the spreading of the mine-cone and the content of incorporated air of the mixtures in the fresh state was measured. In the hardened state, compressive strength was obtained at 3, 7, 28 and 70 days and water absorption by capillarity at 28 days. The effect of accelerated carbonation on different compositions was studied through cubic specimens immersed in a carbonation chamber with a concentration of 10% CO₂. Through the spraying of phenolphthalein, the carbonation depths were obtained at 3, 7, 14 and 28 days after the specimens were placed in the chamber. The microstructure of the thirteen compositions was analyzed using X-ray diffraction (DRX) and thermogravimetry (TG) tests, highlighting the presence and content of calcium hydroxide and calcium carbonate. The analyses were done before the specimens entered the carbonation chamber and after 28 days inside it. The results indicated that all mixtures with additions significantly reduced the absorption of water by capillarity, the metakaolin showing the best performance. The binary mixtures when SCBA was present led to higher values of compressive strength. The incorporation of lime interfered little in this property. The reference mortar showed a higher resistance value, reaching 66 MPa at 70 days, and two others mixtures had strength higher than 60 MPa. Concerning penetration of the carbonation front, the reference was the one with the lowest value. Binary mixtures led to a greater depth of carbonation. The presence of lime did not reduced this effect. In the XRD and TG tests, the additions reduced the amount of calcium hydroxide available, before accelerated carbonation. After carbonatation, calcium hydroxide is not present. Although in some parameters the performance of mortars with additions is lower than the reference, the mortars developed here can have practical application in the manufacture of self-compacting concretes, with remarkable environmental benefits.

Key words: mortar, mineral additions, carbonation.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Justificativa.....	3
1.2 Objetivos	5
1.3 Organização do Trabalho	5
CAPÍTULO 2.....	7
REFERENCIAL TEÓRICO	7
2.1 Argamassas para Concretos Autoadensáveis com Adições Minerais	7
2.1.1 Incorporação de Cinzas do Bagaço de Cana-de-açúcar (SCBA).....	9
2.1.2 Incorporação de Cinzas da Casca de Arroz (RHA).....	12
2.1.3 Incorporação de Metacaulim (MK).....	16
2.1.4 Incorporação de Cal Hidratada	19
2.2 Carbonatação.....	23
CAPÍTULO 3.....	26
MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1 Materiais Utilizados	27
3.1.1 Cimento Portland.....	27
3.1.2 Adições Minerais	27
3.1.3 Cal Hidratada (CH).....	28
3.1.4 Areia	28
3.1.5 Água	29
3.1.6 Aditivo Superplastificante	29
3.2 Caracterização dos Materiais	29
3.2.1 Caracterização da Areia.....	29
3.2.2 Caracterização dos Materiais Finos: Cimento Portland, Adições e Cal.....	30
3.3 Traços das Argamassas Autoadensáveis com Baixos Teores de Cimento.....	32
3.3.1 Estudo Preliminar das Pastas autoadensáveis	32
3.3.2 Definição dos Traços das Argamassas	35
3.3.3 Preparo e Moldagem das Argamassas	36
3.3.4 Propriedades no Estado Fresco	37
3.3.5 Propriedades no Estado Endurecido	39
CAPÍTULO 4.....	45
RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1 Caracterização dos Finos	45

4.1.1 Área Superficial (BET).....	45
4.1.2 Composição Química.....	45
4.1.3 Difração de Raios X	47
4.1.4 Granulometria à Laser.....	50
4.1.5 Índice de Atividade Pozolânica (IAP).....	53
4.2 Comportamento das Argamassas no Estado Fresco	55
4.2.1 Composição das Argamassas	55
4.2.2 Teor de Ar Incorporado	56
4.2.3 Índice de Consistência x Teor de Aditivo.....	56
4.3 Comportamento das Argamassas no Estado Endurecido	58
4.3.1 Resistência à Compressão	58
4.4 Indicativos de Durabilidade.....	61
4.4.1 Absorção de Água por Capilaridade	61
4.4.2 Profundidade da Penetração de Carbonatação	64
4.4.3 DRX/TG	69
CAPÍTULO 5.....	86
CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
ANEXO.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Nomenclatura dos Materiais	27
Tabela 3.2 – Caracterização da Areia	30
Tabela 3.3 – Composição das Misturas Unitárias em Massa das Pastas.	34
Tabela 3.4 – Composição das Misturas Unitárias em Massa das argamassas.	35
Tabela 3.5 – Sequência de Mistura dos Componentes das Argamassas	37
Tabela 3.6 – Ensaios no Estado Endurecido.....	39
Tabela 4.1 – Área Superficial Específica dos Finos	45
Tabela 4.2 – Fluorescência de Raio X dos Materiais Finos	46
Tabela 4.3 – Granulometria à laser.....	53
Tabela 4.4 – Área superficial e Diâmetro médio.....	53
Tabela 4.5 – Índice de Atividade Pozolânica das Adições.	54
Tabela 4.6 – Consumo dos Materiais das Misturas de Argamassa.....	55
Tabela 4.7 – Percentual de Crescimento da Resistência à Compressão por Idade	61
Tabela 4.8 – Acréscimo de peso dos corpos de prova submetidos à absorção capilar.....	63
Tabela 4.9 – Percentual de Aumento da Profundidade de Carbonatação	66
Tabela 4.10 – Profundidade de Carbonatação Teórico e Experimental	68
Tabela 4.11 – Coeficiente de Carbonatação para as Diferentes Misturas	68
Tabela 4.12 – Faixas de temperatura de decomposição dos hidróxidos e carbonato de cálcio	69
Tabela 4.13 – Avaliação Geral dos Resultados das Misturas.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Seção de concreto parcialmente carbonatada.....	24
Figura 3.1 - Fluxograma do Procedimento Experimental.	26
Figura 3.2 – Perfil Granulométrico da Areia	29
Figura 3.3 – Área de Carbonatação.....	33
Figura 3.4 – Área Carbonatada das Pastas Autoadensáveis (%).....	34
Figura 3.5 – Ensaio de espalhamento e molde dos corpos de prova.....	38
Figura 3.6 – Medidor de Ar Incorporado	38
Figura 3.7 – Cronograma dos ensaios para cada mistura	39
Figura 3.8 – Câmara de carbonatação acelerada.	41
Figura 3.9 – Imagem da amostra submetida à carbonatação: A) faces com e sem parafina; B) sentido do corte de seção; C) aspersão de fenolftaleína. (Adaptado de DINIZ, 2018).	42
Figura 3.10 – Corpo de prova submetido à carbonatação da mistura referência (3, 7, 14 e 28 dias respectivamente)	43
Figura 3.11 – Aparelho para ensaio de Difração de Raios X	43
Figura 3.12 – Aparelho para ensaio de Termogravimetria	44
Figura 4.1 – Difração de Raios-X do Cimento Portland	47
Figura 4.2 – Difração de Raios-X da SCBA.....	48
Figura 4.3 – Difração de Raios-X da RHA	48
Figura 4.4 – Difração de Raios-X do MK	49
Figura 4.5 – Difração de Raios-X da Cal Hidratada	49
Figura 4.6 – Granulometria à laser do cimento Portland.....	50
Figura 4.7 – Granulometria à laser da SCBA	50
Figura 4.8 – Granulometria à laser da RHA	51
Figura 4.9 – Granulometria à laser do MK.....	51
Figura 4.10 – Granulometria à laser da Cal Hidratada.....	52
Figura 4.11 – Granulometria à laser dos Materiais Finos.....	52
Figura 4.12 – Teor de Ar Incorporado.....	56
Figura 4.13 – Consistência x Teor de Aditivo das Misturas Unárias.....	57
Figura 4.14 – Consistência x Teor de Aditivo das Misturas Binárias	57
Figura 4.15 – Resistência à Compressão Axial com a Idade das Misturas Unárias	59
Figura 4.16 – Resistência à Compressão Axial com a Idade das Misturas Binárias.....	59
Figura 4.17 – Absorção Capilar com a Idade das Misturas com uma Pozolana	62
Figura 4.18 – Absorção Capilar com a Idade das Misturas Binárias	62
Figura 4.19 – Carbonatação com a Idade das Misturas com uma Pozolana	64
Figura 4.20 – Carbonatação com a Idade das Misturas Binárias	65

Figura 4.21 – Penetração de Carbonatação da Mistura M40 (3, 7, 14 e 28 dias respectivamente).	65
Figura 4.22 – DRX da Mistura Referência	70
Figura 4.23 – TG da Mistura Referência.....	71
Figura 4.24 – DRX das argamassas com cinzas do bagaço de cana sem e com cal.....	72
Figura 4.25 – TG das argamassas com cinzas do bagaço de cana sem e com cal.	73
Figura 4.26 – DRX das argamassas com cinzas da casca de arroz sem e com cal.....	74
Figura 4.27 – TG das argamassas com cinzas da casca de arroz sem e com cal.	75
Figura 4.28 – DRX das argamassas com metacaulim sem e com cal.....	76
Figura 4.29 – TG das argamassas com Metacaulim sem e com cal	77
Figura 4.30 – DRX das argamassas com cinzas do bagaço de cana e cinzas da casca de arroz sem e com cal.	79
Figura 4.31 – TG das argamassas com cinzas do bagaço de cana e cinzas da casca de arroz sem e com cal.	80
Figura 4.32 – DRX das argamassas com cinzas do bagaço de cana e metacaulim sem e com cal.....	81
Figura 4.33 – TG das argamassas com cinzas do bagaço de cana e metacaulim sem e com cal.	82
Figura 4.34 – DRX das argamassas com cinzas da casca de arroz e metacaulim sem e com cal.	83
Figura 4.35 – TG das argamassas com cinzas da casca de arroz e metacaulim sem e com cal.	84

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

a/c – Relação água/ cimento

AAA - Argamassa Autoadensável

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

C₂S – Silicato dicálcio (belita)

C₃S – Silicato tricálcio (alita)

CAA - Concreto Autoadensável

CH – Cal Hidratada, hidróxido de cálcio

C-S-H - Silicato de Cálcio hidratado

DRX – Difração de Raios X

EFNARC – Federação Europeia de Especialistas em Construção e Química dos Sistemas de Concreto

FRX – Fluorescência de Raios X

IAP - Índice de Atividade Pozolânica

IFRN - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Labcim - Laboratório de Cimentos

MK – Metacaulim

MPa – Mega Pascal

NBR – Norma brasileira regulamentada

RHA - Rice Husk Ash (Cinzas da Casca de Arroz)

SCBA - Sugar Cane Bagasse Ash (Cinzas do Bagaço de Cana-de-açúcar)

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A situação atual do meio ambiente desafia os engenheiros a projetar as chamadas construções sustentáveis, nas quais se utilizam materiais alternativos que aplicados corretamente proporcionem novos produtos que minimizem os impactos ambientais dessa atividade. No campo dos materiais cimentícios, o cimento Portland tem o inconveniente de ser grande consumidor de energia e emissor de gás carbônico. Para minimizar esses dois inconvenientes, um campo de investigação tem sido a substituição parcial do cimento por outros materiais de menor impacto ambiental.

Na produção do concreto convencional há uma grande utilização de recursos naturais. Conservar e preservar esses recursos naturais finitos é de grande importância para o futuro do ser humano.

Um exemplo de grande quantidade de utilização de recursos naturais é a produção do cimento Portland, além da extração de calcário há uma grande quantidade de gases jogados no meio ambiente responsáveis pelo efeito estufa. Assim, a escassez dos recursos naturais juntamente com o aumento populacional, tem motivado a criação de novos materiais para que as gerações futuras não venham a viver em situações precárias de sobrevivência.

Algumas considerações ambientais surgem com a finalidade de minimizar a quantidade de cimento nas construções, de forma que essa redução traga grandes benefícios ao meio ambiente, como a redução na exploração de jazidas de calcário, diminuição na emissão de dióxido de carbono, entre outros.

Pesquisas com reciclagem de resíduos industriais têm sido a alternativa mais viável para seu reaproveitamento nos últimos anos, no Brasil e no Exterior. O uso de resíduos em argamassas e concretos pode ser considerado como uma boa solução para contribuir com a redução do uso de matéria-prima e conseqüentemente com o custo final (MEDEIROS, 2010).

Um desafio a se projetar, para minimizar o consumo de cimento, é o emprego de adições minerais em concretos e argamassas. Importante levar em conta questões

relacionadas à durabilidade. E carbonatação, que é tratada neste trabalho, é um fenômeno influi diretamente na durabilidade do concreto armado.

Percebe-se que ainda há lacunas no conhecimento sobre como melhorar o ganho de resistência e durabilidade dos concretos e de argamassas com baixos teores de cimento, sobretudo nas primeiras idades; quais as melhores formas para manter o pH do concreto em níveis que minimizem a carbonatação; que tipos de adições minerais melhor se adequam as condições regionais; e quais suas influências nas dosagens de concretos autoadensáveis (CAA); qual a relação entre a porosidade e a carbonatação em CAA com baixos teores de cimento; qual o teor ideal de adição de cal para compensar seu consumo pelas pozolanas, são perguntas que merecem maiores pesquisas para serem respondidas.

A ABNT NBR 15823-1 (2017) define o concreto autoadensável (CAA) como sendo capaz de fluir e preencher as fôrmas, mantendo sua homogeneidade, apenas por ação do seu peso próprio. Porém, para manter a fluidez do CAA, e para que não haja segregação, são usados em sua produção grandes quantidades de finos e aglomerantes. Esses materiais finos são definidos pela SCCEPG (2005) (The Self-Compacting Concrete European Project Group) como materiais de tamanho de partículas menores que 0,125 mm. Uma das alternativas para suprir essa necessidade, é a utilização de adições minerais.

Quando essas adições na forma de pós finos são compostas por grandes quantidades de sílica amorfa promove-se a reação pozolânica conjuntamente à hidratação dos materiais cimentícios. Esta consiste na reação química entre a sílica amorfa e o hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , em presença de água, para formação de compostos cimentantes (DUAN et al., 2013).

Essa reação é fundamental para melhorar a durabilidade do concreto, pois apesar de as adições conferirem fisicamente maior vida útil, pela diminuição da porosidade, o consumo do hidróxido de cálcio (CH) reduz a alcalinidade deste. A consequência do consumo da reserva alcalina constituída pelo CH é a redução do pH: para valores próximos a 9, ocorre a despassivação da armadura (OLLIVIER e VICHOT, 2014).

Uysal e Yilmaz (2011) afirmaram que o uso de adições minerais podem melhorar a trabalhabilidade, e reduzir os impactos ambientais concretos.

As adições minerais quimicamente ativas são os materiais pozolânicos. Eles sozinhos possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante, e quando finamente moídos e na presença de água, podem reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente formando compostos com propriedades ligantes, como o silicato de cálcio hidratado (KAVITHA *et al.*, 2015).

Entre resíduos agroindustriais tem-se as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (SCBA) gerado pela indústria sucroalcooleira através da combustão do bagaço da cana-de-açúcar em caldeiras. Após sua queima são colocados indevidamente em depósitos abertos, causando problemas de poluição ambiental. Tendo um alto teor de SiO_2 , podendo ser usado como material pozolânico complementar para substituir parcialmente o cimento Portland em argamassas e concretos (RÍOS-PARADA *et al.*, 2017).

Outro resíduo agroindustrial são as cinzas da casca do arroz (RHA) podendo ser altamente pozolânicas se produzidas por combustão controlada a altas temperaturas. Composta de aproximadamente 90% de sílica e quando finamente moída possui alta reatividade, usada em compostos cimentícios na redução da porosidade (KANNAN e GANESAN, 2014; SAFIUDDIN; WEST; SOUDKI, 2012, 2012; CHOPRA *et al.*, 2015).

Mais um material pozolânico é o metacaulim (MK), vendido comercialmente, produto da calcinação em temperaturas da ordem de 650°C a 800°C . Sua principal característica é a alta reatividade com o hidróxido de cálcio e a capacidade de acelerar a hidratação do cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014; BADOGIANNIS *et al.*, 2015; KAVITHA *et al.*, 2015).

1.1 Justificativa

A construção civil é um dos grandes responsáveis pela degradação do meio ambiente, gerando impactos ambientais, com a extração de matérias-primas e a produção de materiais industrializados que emitem poluentes e geram resíduos. A necessidade de minimizar esses impactos ambientais deve conduzir a práticas construtivas eco eficientes. O concreto, como sendo o produto mais utilizado na construção civil, pode contribuir através do desenvolvimento de misturas que reduzam o consumo de cimento Portland.

É crescente a quantidade de estudos relacionados a utilização de materiais alternativos para substituir parte do cimento em concretos, com o principal intuito de minimizar os impactos ambientais causados pelo consumo desenfreado dos recursos naturais (Behera *et al.*, 2014).

Contudo, existem poucos estudos relacionados ao comportamento e às propriedades do CAA com baixos teores de cimento Portland, principalmente relativos aos indicativos de durabilidade frente ao ataque de gás carbônico, à incorporação do resíduos agroindustriais e à reposição de CH através da cal hidratada.

Grandes quantidades de matérias-primas são necessárias para a produção do cimento, o uso de adições cimentícias pode fornecer uma boa solução para reduzir esse impacto ambiental (SHAFIGH *et al.*, 2013). Porém, o uso dessas adições provoca modificações reológicas e mecânicas nesse material alterando suas propriedades e durabilidade.

Concretos com altos teores de adições minerais têm sido estudados no Instituto Federal RN e PB, e na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Farias, 2019; DINIZ, 2018 e FONSECA, 2016).

Entre as adições investigadas, estão as cinzas do bagaço de cana de açúcar, por ser um material regional. Na realidade, tendo em vista que a coleta dessas cinzas se faz diretamente dos fornos das usinas, não se tem “controle de qualidade” delas. Assim, seu desempenho é inferior ao de outras pozolanas consagradas, como metacaulim e cinzas da casca de arroz. Este trabalho, que faz parte do grupo de pesquisa envolvendo aquelas instituições, apresenta respostas às seguintes questões:

- o desempenho das cinzas do bagaço de cana pode ser melhorado através de misturas binárias com outras pozolanas, como cinzas de casca de arroz e metacaulim?
- qual o papel da substituição do cimento por cal nas propriedades de argamassas envolvendo altos teores de adição?
- qual o comportamento das argamassas com altos teores de substituição do cimento quando submetidas à carbonatação acelerada?

O uso do concreto autoadensável com baixos teores de cimento é justificado pelos benefícios da racionalização do método construtivo e da redução do cimento, consequentemente, beneficiando o meio ambiente

Diante do desafio em minimizar esses impactos ambientais, este trabalho contribui para o desenvolvimento dessa área de pesquisa, utilizando materiais de substituição parcial do cimento Portland em taxas de 40% e 50%, particularmente pensando em argamassas para concretos autoadensáveis.

1.2 Objetivos

Os objetivos dessa tese são avaliar o efeito da incorporação de resíduos agroindustriais como as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (SCBA), cinzas da casca de arroz (RHA) e o metacaulim (MK) sem e com adição de hidróxido de cálcio, com ênfase na carbonatação das argamassas autoadensáveis.

Como objetivos específicos este trabalho tem-se:

- Avaliar o comportamento reológico das argamassas autoadensáveis com adições de SCBA, RHA e MK com e sem adição de cal, em substituição parcial do cimento Portland;
- Avaliar o comportamento das argamassas quando se tem misturas binárias das adições;
- Analisar a influência dos materiais utilizados no comportamento físico e mecânico das argamassas autoadensáveis;
- Avaliar a influência das adições minerais e da adição da cal hidratada em diferentes percentuais;
- Avaliar o efeito da carbonatação acelerada na microestrutura através de detecção da presença ou não do hidróxido de cálcio nessas argamassas autoadensáveis sem e com adição de cal.

1.3 Organização do Trabalho

Esta tese é composta de 5 capítulos e um anexo.

No primeiro, faz-se uma introdução, apresentam-se uma justificativa e os objetivos do trabalho.

No segundo capítulo apresenta-se o referencial teórico, citando-se outros trabalhos que também fizeram uso de adições minerais em outros contextos.

O terceiro capítulo indica os materiais e métodos empregados na pesquisa.

No quarto capítulo tem-se os resultados e discussões e no quinto capítulo são feitas as considerações finais relativas ao trabalho.

No anexo tem-se uma série de imagens dos corpos de prova que estiveram na câmara de carbonatação acelerada por 3, 7, 14 e 28 dias, para se ver fisicamente a penetração da frente de carbonatação nas diferentes composições de argamassas autoadensáveis preparadas.

CAPÍTULO 2

REFERENCIAL TEÓRICO

Na produção de concretos autoadensáveis (CAA), utiliza-se os mesmos materiais usados para o concreto convencional. A principal diferença entre o concreto normalmente vibrado e o autoadensável são suas propriedades no estado fresco. O concreto autoadensável deve ter alta fluidez e estabilidade da mistura, apresentando características fundamentais: o fluxo ou a capacidade de preencher espaços sem vibração, a capacidade de passar por restrições e a capacidade de resistir à segregação (PELISSER; VIEIRA; BERNARDIN, 2018).

Neville e Brooks (2013) apontaram que a obtenção de CAA requer alteração em alguns parâmetros, sobretudo naqueles ligados aos materiais finos. Esse finos podem ser compensados através do aumento do teor de cimento, inviabilizando sua produção, pois acarretaria um custo elevado e um aumento na emissão de CO₂. Assim, outras opções são as adições minerais, como a sílica ativa, as cinzas volantes e os resíduos agroindustriais.

Uysal e Yilmaz (2011) mostraram vantagens no uso de adições em CAA's, como a melhora na trabalhabilidade, na viscosidade e um menor custo, pelo fato do cimento Portland ser o produto de alto valor comercial.

Com esses materiais que podem ser produzidos ligantes adequados ao uso em argamassas e concretos autoadensáveis de maior eficiência energética. Esses materiais sendo utilizados em misturas binárias e ternárias podem baixar o consumo de cimento Portland em CAA's para faixas abaixo de 200 kg/m³ e ainda assim atender as exigências de resistência à compressão de concretos estruturais com manutenção das propriedades de durabilidade.

2.1 Argamassas para Concretos Autoadensáveis com Adições Minerais

Gołaszewski *et al.* (2016) verificaram que projetar e desenvolver propriedades reológicas do concreto autoadensável é uma questão importante, e as adições tem

grande influência nas propriedades. Seus resultados mostram que em geral há compatibilidade entre propriedades reológicas das argamassas e dos concreto autoadensáveis.

A situação comum, no entanto, é que as argamassas são obtidas pela “remoção” de agregado grosso do concreto. Nesse caso, a absorção de água do agregado grosso não é levada em consideração. As argamassas são muito fluidas e sua estrutura difere da estrutura do concreto fresco. Assim, a determinação das propriedades reológicas de argamassas muito fluidas requer alta resolução de medição. Mesmo pequenas diferenças podem resultar em erros substanciais na avaliação das propriedades do concreto fresco equivalente (GOŁASZEWSKI *et al.*, 2016).

Freitas (2009) afirma que, pelo fato de existirem poucas pesquisas relacionadas às argamassas autoadensáveis, as referências usadas serão as mesmas utilizadas para o concreto autoadensável, pois a única diferença desses materiais é a ausência do agregado graúdo.

Moretti, Nunes e Sales (2018) estudaram a viabilidade de incorporar cinzas do bagaço de cana-de-açúcar como material na produção de concretos autoadensáveis. Na primeira etapa deste estudo, foi realizado um experimento com argamassas. Na segunda fase, as propriedades da mistura do concreto foram avaliadas considerando as proporções da mistura nas pasta definidas na primeira etapa.

Para concretos, foi desenvolvido um programa experimental na avaliação do impacto de misturas otimizadas nas pastas de argamassa em várias de suas propriedades que incluíam as propriedades de estado fresco: teste de segregação de peneira, teste de anel J, teste de fluxo de queda e teste de funil em V; propriedades mecânicas: módulo estático de elasticidade e resistência à compressão; e de durabilidade: resistividade elétrica, penetração de íons cloretos, absorção de água por capilaridade e profundidade da carbonatação.

A relação água/cimento (a/c) nas misturas de CAA's é igual ao obtido na fase de argamassa. No entanto, é claro que, para o mesmo a/c , a resistência à compressão de uma argamassa é diferente da resistência à compressão do CAA.

Alrifai *et al.* (2013) citaram em seu estudo que pelo princípio da argamassa equivalente, as propriedades do concreto podem ser estudadas experimentalmente a nível da argamassa.

Quando parte do cimento é substituída por adições, cada tipo de adição atua de maneira distinta, de acordo com sua finura, atividade química e/ou física ou mesmo com a quantidade na mistura, pois esses fatores proporcionam diferentes interações com a pasta, para cada mistura específica, (ISAIA; FURQUIM e GASTALDINI, 2012).

Estudos mostraram vantagens no uso de adições minerais em CAA, como a melhoria na trabalhabilidade, eficiência na modificação de viscosidade e menor custo, uma vez que o cimento é, normalmente, o componente de maior valor comercial (UYSAL e YILMAZ, 2011).

Diante desse contexto, o presente projeto de pesquisa, visa contribuir com o desenvolvimento de novas argamassas autoadensáveis, com elevados teores de adição mineral provenientes de resíduos e materiais regionais.

2.1.1 Incorporação de Cinzas do Bagaço de Cana-de-açúcar (SCBA)

O Brasil é um dos maiores produtores de cana-de-açúcar no mundo, gerando uma grande quantidade de resíduos no seu processamento, destacando-se o bagaço. Devido a sua utilização como resíduo da biomassa, gerando cinzas, essas tem um alto teor de sílica, tornando-o uma fonte complementar para uso como adição mineral ativa na produção de materiais cimentícios.

A eficiência das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (SCBA) como pozolana está fortemente relacionada ao seu teor de sílica e principalmente à amorficidade da sílica. A incorporação da cinza pode acrescentar valor econômico ao resíduo agroindustrial proporcionando vantagens, técnicas e ambientais, com a substituição parcial de cimento Portland. Possibilitando o emprego deste resíduo como pozolana e, por conseguinte, reduzindo o custo e o impacto ambiental relativos à sua disposição no meio ambiente (CORDEIRO; TOLEDO FILHO e FAIRBAIRN, 2009).

As cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, uma adição mineral é o resíduo obtido através do processo de cogeração de energia pela sua queima. A composição química e mineralógica da SCBA faz dela um material com potencial para misturas de cimento Portland. A finura, a cristalinidade e a presença de partículas não queimadas são cruciais para o desenvolvimento da reatividade pozolânica e para um bom desempenho mecânico (PAYÁ *et al.*, 2018).

Pelo fato da SCBA possuir propriedades pozolânicas limitadas, o seu uso é, geralmente, em menores proporções de substituição do que as pozolanas comerciais, haja visto que grandes porcentagens de substituição podem gerar impacto negativo nas propriedades dos concretos.

Quando inserido na matriz cimentícia a SCBA afeta o desempenho devido aos efeitos físicos associados principalmente ao empacotamento da mistura, que depende do tamanho, forma e textura das partículas, e aos efeitos químicos, pela reação pozolânica (CORDEIRO *et al.*, 2008).

Moraes *et al.* (2015) realizaram testes em argamassas com até 25% de substituição e observaram que as argamassas produzidas com SCBA conseguiram resultados equivalentes de resistência em comparação a mistura só com cimento. O uso de uma porcentagem maior de SCBA fica condicionada a uma possível redução da resistência mecânica.

Anjos (2009) afirmou que a SCBA apresenta uma considerável quantidade de sílica ativa, substância química capaz de aumentar a resistência e durabilidade de concretos e argamassas.

O nível de substituição de 25% do cimento pelas cinzas do bagaço da cana-de-açúcar na produção de concreto misturado sustentável foi considerado ideal (KATARE; MADURWAR, 2017).

Katara e Madurwar (2017) verificaram que os principais óxidos observados na composição química do SCBA foram dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de cálcio (CaO) e óxido de potássio (K_2O). Outros óxidos foram encontrados em pequenas quantidades, tais como óxido de sódio (Na_2O), trióxido de enxofre (SO_3), e óxido de magnésio (MgO).

➤ **Propriedades no Estado Fresco**

Sua-lam e Makul (2017) estudaram concretos autoadensáveis e verificaram que a SCBA exigiu a maior quantidade de superplastificante dentre as adições estudadas, por ter uma maior área superficial. Nos ensaios realizados com CAA. Akram, Memon e Obaid (2009) verificaram que a incorporação de SCBA conduz a uma menor fluidez,

comprovada pelos testes no estado fresco, consumindo uma maior quantidade de água, porém mesmo com adições de 20% o CAA atingiu os limites esperados.

Sua-iam e Makul (2013) produziram CAA's nos quais foi observado aumento na viscosidade, porém houve uma redução na resistência à compressão com o aumento do teor de substituição. Sua-iam e Makul (2013) afirmaram ainda que este efeito pode ser retificado com o uso simultâneo do fíler calcário.

➤ **Propriedades no Estado Endurecido**

Pereira *et al.* (2015) realizaram testes em argamassas com até 25% de substituição e observaram que as misturas com SCBA obtiveram resultados equivalentes de resistência em comparação à mistura referência.

A resistência a compressão dos concretos para todas as proporções de mistura aumentaram com a idade de cura e diminuíram com o aumento da substituição do SCBA. A redução na resistência à compressão em 10%, 20% e 30% de substituição de cimento por SCBA, em comparação com o concreto referência, foi de 16,8%, 25% e 35,5%, respectivamente, (JOSHAGHANI; MOEINI, 2017).

Mehta e Folliard (1995) verificaram que teores entre 10% e 20% de substituição de SCBA são suficientes no aumento de resistência mecânica, e obtiveram, aos 28 dias de idade, aumentos entre 5% e 13%, na resistência à compressão de concretos especiais com 15% de substituição em massa de cimento Portland por SCBA e relações a/aglomerante, respectivamente, de 0,3 e 0,35.

Arif, Clark e Lake (2016) verificaram no ensaio de resistência à compressão de suas argamassas de cimento que para o nível de substituição de 5% do cimento, o SCBA é potencialmente pozolânico. A 15% de substituição de cimento SCBA obteve-se um índice de atividade pozolânica acima de 75%.

Na matriz cimentícia a SCBA afeta o desempenho devido aos efeitos físicos associados principalmente ao empacotamento da mistura, o qual depende do tamanho, forma e textura das partículas (CORDEIRO *et al.*, 2008).

As propriedades dos concretos no estado endurecido: resistência à compressão, resistência à flexão e absorção de água, foram piores quando houve substituição do

cimento por uma alta quantidade adição afetando negativamente estas em todas as idades, SUA-IAM e MAKUL (2013).

A substituição parcial do cimento por até 30% de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, em termos de peso, não teve efeito significativo nas propriedades do estado fresco ou na resistividade da argamassa aos 28 dias. A substituição da SCBA foi considerado significativo apenas na resistência à compressão aos 28 dias, e ainda assim seu efeito foi relativamente pequeno (MORETTI; NUNES; SALES, 2018).

Almeida *et al.* (2015) estudaram carbonatação em argamassas e obtiveram resultados semelhante à mistura referência com 30% de SCBA.

2.1.2 Incorporação de Cinzas da Casca de Arroz (RHA)

A cinza da casca de arroz (RHA) é um resíduo agrícola do processo de moagem da cobertura externa de um grão de arroz, que em condições adequadas de incineramento, pode ser utilizada substituindo parcialmente o cimento Portland (LE; LUDWIG, 2016).

A reatividade da cinza é atribuída ao alto teor de sílica amorfa e à área superficial muito grande atribuída pela estrutura porosa das partículas, sendo também favorecida pelo aumento de sua finura (CHAO-LUNG; ANH-TUAN; CHUN-TSUN, 2011; LE; LUDWIG, 2016).

A cinza da casca do arroz pode ser altamente pozolânica se produzida por combustão controlada em elevadas temperaturas (600°C a 800°C), onde a sílica se mantém na forma não-cristalina em uma microestrutura celular com área superficial elevada. Além disso, é composta de aproximadamente 90% de sílica e quando finamente moída possui alta reatividade, sendo utilizada em compostos cimentícios para reduzir a porosidade e a largura da zona de transição interfacial pasta-agregado. (KANNAN e GANESAN, 2014; SAFIUDDIN; WEST e SOUDKI, 2012; CHOPRA; SIDDIQUE e KUNAL 2015).

Na queima da casca de arroz a matéria orgânica é eliminada e através da combinação do silício (Si) com o oxigênio (O₂) obtém o dióxido de silício (SiO₂), que é um material potencialmente reativo na sua forma amorfa.

Seu efeito químico está relacionado ao fato de ser um material altamente pozzolânico que combina com hidróxido de cálcio (C-H) formando um silicato de cálcio hidratado (C-S-H) secundário, sendo este composto o principal responsável pela resistência, (LE & LUDWIG, 2016; SENSALÉ, 2010). Chopra *et al.* (2015) produziram CAA com até 15% de substituição e promoveram acréscimo de resistência à compressão e à tração quando comparados ao concreto referência.

Estudos foram realizados para avaliar as propriedades do concreto contendo RHA. Além disso, a utilização dessa cinza pode ajudar a reduzir o consumo de cimento dos CAA's tornando-os mais sustentáveis e contribuindo na redução da emissão de gases poluentes na atmosfera provenientes da indústria do cimento, causadores do efeito estufa (SAFIUDDIN; WEST; SOUDKI, 2010; LE; LUDWIG, 2016).

➤ **Propriedades no Estado Fresco**

Le e Ludwig (2016) utilizaram cinza da casca do arroz como substituto parcial do cimento em teores de substituição ao cimento de até 20%, combinada a outros 20% de substituição de cinza volante, em comparação a um traço referência. A cinza da casca do arroz utilizada apresentou a maior área superficial entre todos os materiais finos. Todas as composições apresentaram a mesma relação água/finos e o mesmo teor de aditivo superplastificante. Em suas propriedades no estado fresco, a incorporação de RHA diminuiu ligeiramente a habilidade passante nas armaduras, aumentou significativamente a viscosidade plástica e a resistência à segregação e também eliminou a exsudação no concreto.

Kannan e Ganesan (2014) observaram que o aumento do teor de substituição de cimento por cinza da casca do arroz diminuiu o diâmetro de espalhamento no slump flow, considerando a relação água/finos e o teor de aditivo superplastificante constantes. Isso significa uma diminuição da capacidade de preenchimento, pois a RHA também apresenta alta reatividade e maior área superficial específica que o cimento.

A incorporação de RHA aumentou a dosagem do superplastificante da argamassa, diminuindo ligeiramente as habilidades de enchimento e passagem e aumentando

significativamente a viscosidade plástica e a resistência à segregação do concreto autoadensável de alto desempenho, Le e Ludwig (2016).

Safiuddin; West; Soudki (2011) afirmaram que quando adicionado RHA acima de 15% em suas argamassas, diminuiu significativamente a propagação do fluxo da argamassa. Além disso, as dificuldades de mistura e manuseio foram observadas quando esse percentual de substituição foi superior a 15%.

➤ **Propriedades no Estado Endurecido**

Jamil *et al.* (2016) verificaram que a influência da RHA nas propriedades da argamassa é atribuída principalmente à reação pozolânica e que depende significativamente do tamanho de sua partícula. A resistência à compressão das argamassas com RHA é menor que a argamassa referência. Aos 14 dias de cura, a diferença na resistência à compressão entre as argamassas com adição e a argamassa sem adição é muito pequena. Após 28 dias de cura, a resistência à compressão da argamassa com adição de 20% de substituição aumentou em relação a argamassa sem adição.

Bezerra, *et al.* (2010), verificaram a viabilidade da utilização da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento. Os resultados mostraram que as cinzas da casca de arroz apresentaram pozolanidade e os corpos de prova com essas adições forneceram valores superiores aos corpos de prova de referência com relação às propriedades físicas e mecânicas, devido à provável ocorrência das reações pozolânicas e que a utilização da RHA é viável, tanto do ponto de vista técnico quanto ecológico.

Safiuddin, West e Soudki (2010) utilizaram substituições de cimento por cinza da casca do arroz em até 30%. O resultado do seu estudo mostrou que o aumento do teor de cinza da casca do arroz na mistura elevou consideravelmente (mais de 10%) a resistência à compressão, e de maneira mais branda a velocidade do pulso ultrassônico.

Sensale e Dal Molin (2001) observaram, pelas ensaios de absorção capilar e permeabilidade, que a cinza da casca de arroz contribui para a redução da

permeabilidade e da capilaridade do concreto, o que contribuiu no aumento da durabilidade do material.

Olutoge e Adesina (2019) pesquisaram o cimento Portland substituindo por RHA a 5%, 10%, 15% e 20% em peso do aglutinante. Aos 28 dias, quando em comparação com o concreto convencional, o concreto com 5% e 10% de substituição de RHA apresentaram uma redução de 8%, enquanto aqueles com 15% e 20% de RHA caíram 34,81% e 40,62% a resistência, respectivamente. No entanto, a resistência à tração do concreto com 5% e 10% de RHA foi superior ao concreto referência.

Tashima *et al.* (2012) observaram aumento na resistência à compressão em suas argamassas, aos 28 dias de idade o aumento da resistência quando comparado ao traço referência foi de 10% e 16%, respectivamente, para os teores de substituição em massa de 10% e 15%.

Ameri *et al.* (2019), verificaram que a resistência à compressão aumentou e atingiu um pico com 15% no conteúdo de RHA, em seguida, começou a declinar. Por exemplo, a resistência à compressão aos 7, 28, 56 e 91 dias de idade foi 9%, 12%, 13% e 16% superior à da mistura de controle, respectivamente. A menor resistência à compressão foi registrada para 30% de substituição, que exibiu uma redução de 8% na resistência à compressão de 28 dias. Os resultados da espectrometria de FRX indicaram um teor de sílica de aproximadamente 90% naquele trabalho. Devido ao seu alto teor de sílica, o RHA demonstra características pozolânicas, trazendo melhorias na resistência e durabilidade do concreto.

Torgal *et al.* (2012) mostraram que concretos com RHA são mais atingidos pela carbonatação, porém apresentam resultados com até 50% de redução da profundidade de carbonatação quando curados 28 dias.

2.1.3 Incorporação de Metacaulim (MK)

Metacaulim (MK) é uma pozolana artificial obtido pela calcinação de argilas cauliníticas em uma faixa de temperatura específica. É um material muito fino, com uma superfície específica alta que melhora a reatividade pozolânica (CACHIM; VELOSA; ROCHA, 2010).

O metacaulim (MK), usado na pesquisa, é um material pozolânico comercial termicamente ativado obtido pela calcinação da argila caulinítica a temperaturas moderadas variando de 650°C a 800°C. Sua principal característica é a alta reatividade com hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 e a capacidade de acelerar a hidratação do cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2014; BADOGIANNIS *et al.*, 2015; KAVITHA *et al.*, 2015).

A incorporação de metacaulim na forma de pó requer uma quantidade suplementar de superplastificante para equilibrar a atenuação da trabalhabilidade, o uso de metacaulim na forma de pasta permite que essa adição seja diminuída (PERLOT; ROUGEAU; DEHAUDT, 2013).

Quando comparado com outras adições minerais, como a sílica ativa e a cinza volante, espera-se que a ação pozolânica do metacaulim seja mais significativa pela sua elevada concentração de sílica e alumina (BADOGIANNIS *et al.*, 2015).

Sfikas, Badogiannis, Trezos (2014) alegam que as partículas de metacaulim são mais finas do que as partículas de cimento e apresentam características de forma diferentes, colaborando a um melhor empacotamento.

Badogiannis *et al.*, (2015), verificaram que além da melhoria do desempenho sustentável do concreto, através de sua durabilidade aprimorada, o MK também é considerado um material sustentável e ecológico, devido às emissões limitadas de CO_2 durante seu processo de produção. Assim, quando é usado como material de substituição do cimento Portland, alcança uma redução significativa das emissões totais de CO_2 .

A principal razão no uso do metacaulim em CAA's está mais relacionada aos benefícios ambientais e tecnológicos, do que econômicos (MADANDOUST e

MOUSAVI, 2012; VEJMEKLOVA *et al.*, 2011; SFIKAS; BADOGIANNIS; TREZOS, 2014; BADOGIANNIS *et al.*, 2015).

Além de melhor desempenho sustentável do concreto por meio de maior durabilidade, o metacaulim é considerado um material sustentável e ecologicamente correto, visto que existe diminuição de emissões de CO₂ na sua produção. Sua principal desvantagem é o alto custo, quando em comparação ao cimento Portland. Podendo ser atribuído a baixa escala de produção. Uma maior implementação na indústria cimentícia diminuiria o seu custo no mercado e o custo final do concreto (BADOGIANNIS *et al.*, 2015).

➤ **Propriedades no Estado Fresco**

Em seu estudo, Gill e Siddique (2018) verificaram que a adição de MK e RHA afetou a trabalhabilidade, mas não significativamente. Um pequeno aumento na demanda de água foi observado com a adição do conteúdo de MK. Para isso, a dosagem do superplastificante foi aumentada em 2%. Isso pode ser devido ao pequeno tamanho das partículas do MK à medida que substituem o cimento, o que leva a áreas de superfície mais altas e aumenta a demanda de água.

Sfikas, Badogiannis, Trezos (2014) verificaram em seus CAA's que o metacaulim conferiu maior consistência, podendo ser utilizado como modificador de viscosidade, e elevados ganhos de resistência mecânica à compressão e à tração.

Kannan (2018) observou que em seus concretos CAA com metacaulim e observou que ele, quando em substituição ao cimento, em proporções de substituição de 15% ou 25% acarreta uma maior demanda de superplastificante e de água para obtenção do mesmo espalhamento que o CAA sem adição.

O uso da adição do MK diminui a capacidade de espalhamento, percebido com aumento da demanda de aditivo superplastificante em misturas com maior percentual de metacaulim para manter um mesmo padrão de espalhamento (VEJMEKLOVÁ *et al.*, 2011; KANNAN e GANESAN, 2014; KAVITHA *et al.*, 2015; SFIKAS; BADOGIANNIS; TREZOS, 2014).

➤ Propriedades no Estado Endurecido

Gill e Siddique (2018) verificaram que o uso de MK levou ao aumento da resistência à compressão, aumentando seu valor com o aumento da porcentagem de substituição de MK. Houve uma ligeira diminuição no nível de substituição de 15% do MK. Essa diminuição pode ter sido devido ao excesso de sílica disponível.

A absorção de água e a porosidade das misturas contendo MK foram reduzidas em relação à mistura referência. Também houve diminuição da porosidade à medida que o período de cura foi aumentado (GILL; SIDDIQUE 2018). Foi detectado que o nível de absorção de água e a porosidade aumenta com o aumento da porcentagem do MK.

Kannan (2018) verificou também a resistência à compressão em CAA's com metacaulim em substituição entre 5% a 30% de cimento Portland. Ele obteve os melhores resultados com 15% de substituição (44,78 N/mm²) aos 90 dias. Kavitha *et al.* (2015) afirmaram que com seus resultados, o melhor valor se deu com a substituição de 10% de MK.

O uso de MK e RHA afetou positivamente a resistência à compressão, aumentando-a em 27%, 42% e 48% aos 28, 90 e 365 dias, respectivamente, em relação ao traço referência (GILL; SIDDIQUE, 2018).

Kavitha *et al.* (2016) alcançaram 76 MPa de resistência à compressão aos 56 dias com 10% de metacaulim, e citam que é necessário observar os resultados em idades elevadas em virtude da reação pozolânica. Indagaram ainda que em geral, a resistência à penetração de cloretos aumenta com a adição de MK.

Em relação a carbonatação, Singh e Singh (2016) afirmaram que traços com a adição do metacaulim obtiveram um desempenho positivo, aumentando a resistência à carbonatação nas misturas de CAA's, atribuindo ao refinamento dos poros e à hidratação prolongada do concreto.

Para Kannan (2018), a resistência à compressão aos 28 e 90 dias em CAA's com 5% a 30% de metacaulim e obtiveram o melhor resultado com 15% de substituição. Ele estudou também a interação com o RHA e verificou que a mistura ternária com até 40% de substituição apresentou bons resultados.

Cardoso *et al.* (2017) analisaram o comportamento de argamassas com metacaulim e sílica ativa submetidas a ação combinada da carbonatação e íons cloreto, e, concluíram que a profundidade de penetração de íons cloreto foi menor nos corpos de prova carbonatados. Porém, o contrário foi observado para a carbonatação, quanto maior o teor de substituição maior foi a profundidade de carbonatação.

Ramezaniapour e Jovein (2012) afirmaram que os concretos com metacaulim proporcionaram menor profundidade de penetração da água.

A análise de DRX fica evidente que a adição de MK aumenta os picos de intensidade C-S-H, mas diminui os picos de CH. A intensidade de C-S-H no concreto misturado com MK foi maior quando comparado com concreto sem adição (KAVITHA *et al.*, 2015).

Como principais conclusões, a adição do metacaulim é um material apropriado para aplicação em concreto com ligante hidráulico de cal como adição pozolânica, por proporcionar um aumento na sua resistência mecânica para as substituições parcial ao cimento de 20% e 30%. Os testes de resistência devem ser realizados aos 28 dias, pois é quando o consumo de portlandita está concluído (CACHIM; VELOSA; ROCHA, 2010).

Diante do exposto, foi visto que o metacaulim é uma adição mineral cuja incorporação melhora o CAA em algumas propriedades, justificando-se o seu uso pela procura de melhora na sustentabilidade.

2.1.4 Incorporação de Cal Hidratada

A cal é um aglomerante bastante usado em argamassas no intuito de melhorar a sua trabalhabilidade, aderência e rendimento.

A reatividade pozolânica promove a reação do dióxido de sílica amorfo presente nas adições com o hidróxido de cálcio oriundo da hidratação do cimento, formando compostos com propriedades cimentantes (PAIVA, *et al.*, 2017).

Em matrizes cimentícias com elevados teores de adições pozolânicas, há redução do hidróxido de cálcio (CH) à níveis críticos, podendo estar próximos de zero em pastas

com elevados teores de metacaulim ou cinza volante incorporados (Anjos *et al.*, 2017), favorecendo a carbonatação, pela redução da alcalinidade da água nos poros.

Prevendo-se essa alta redução do CH nas argamassas cimentícias com elevados teores de adições minerais, foi adicionado cal no intuito de realcalinizar a matriz cimentícia e observar o comportamento desta adição. Assim, a necessidade de confeccionar concretos ecoeficientes pela utilização de materiais suplementares ao cimento requer mais CH disponível e, assim, são necessárias novas investigações sobre a adição de cal em concretos e argamassas (MIRA; PAPADAKIS; TSIMAS, 2002).

O uso de cal hidratada em argamassas é prática comum na construção civil. Porém, em concretos ainda não, mas vem sendo objeto de estudo nos últimos tempos, principalmente sobre sua contribuição nas reações pozolânicas com as adições minerais e seu efeito no controle da carbonatação em concretos com baixo consumo de cimento (HOPPE FILHO, 2008; ANJOS *et al.*, 2015).

Anjos *et al.* (2015) estudaram concretos autoadensáveis com elevados teores de adições minerais, em suas misturas o consumo de cimento foi entre 150 a 200 kg/m³, avaliando ainda uma mistura referência com consumo de cimento de 500 kg/m³. Nas suas misturas com baixos consumo de cimento foram substituídos 60 e 70% do cimento do traço de referência por cinzas volantes e metacaulim. Além disso, a cal hidratada foi utilizada como adição, e não substituição, no percentual de 5% do total de ligantes (25 kg/m³) para ajudar na ativação do material pozolânico por hidróxido de cálcio.

➤ **Propriedades no Estado Fresco**

Segundo Alghazali e Myers (2017), em seu estudo as misturas de CAA com cal apresentaram excelentes propriedades reológicas e satisfizeram os requisitos para aplicação do concreto autoadensável em pré-moldes e pontes.

Nos concretos autoadensáveis de Fonseca (2016) a cal hidratada atribuiu um aumento no diâmetro de espalhamento, sendo devido, segundo o autor, ao aumento do volume da pasta que lubrifica os grãos e favorece a fluidez.

➤ Propriedades no Estado Endurecido

As composições estudadas por Anjos *et al.* (2015) foram submetidas a carbonatação acelerada com concentração de CO₂ de 4±0,5% e foi verificado que a adição de cal hidratada contribuiu para diminuir a profundidade de carbonatação, pois a cal hidratada repôs parcialmente a alcalinidade da mistura.

Anjos *et al.* (2015) mostraram em seu estudo que a profundidade de carbonatação em concretos autoadensáveis foi menor nos traços que continham cal hidratada.

Dal Ri (2002) estudou a influência da adição de cal hidratada em concretos convencionais com elevados teores de adições minerais, verificando a penetração de cloretos e a resistência à compressão, utilizando, como adição mineral, cinza volante, cinza da casca do arroz e escória substituindo entre 50 e 90% do cimento, a cal hidratada foi adicionada nos percentuais de 15 e 18% dos aglomerantes.

Para todas as misturas, foi observado que a adição de cal hidratada proporcionou aumento da resistência à compressão, embora tenha aumentado a permeabilidade a cloretos.

Alghazali e Myers (2017), utilizaram cal hidratada para melhorar a resistência à compressão nas primeiras idades dos concretos autoadensáveis, e mostraram resultados positivos pois os autores verificaram um aumento na atividade pozolânica de outras adições presentes.

Anjos *et al.* (2015) analisaram CAA com substituição parcial do cimento nos teores de 60% e 70% por cinza volante e metacaulim, além da adição de 5% de cal hidratada sobre o total de finos da mistura. Os resultados de resistência à compressão mostraram que as composições com cal hidratada apresentaram maiores valores do que as composições sem a cal hidratada, entre 22% e 47% de ganho nos valores da resistência, visto que a cal contribuiu para a formação de C-S-H secundário ao reagir com o material pozolânico que estava presente na mistura em teores elevados.

Anjos *et al.* (2020) avaliaram o uso de cal hidratada em substituição ao cimento de até 25%, foi encontrada uma redução na resistência à compressão em todas as idades em seus concretos autoadensáveis. Embora a pesquisa tenha sido realizada com cal hidratada no concreto, ainda são incipientes as avaliações sobre o crescimento da

resistência à compressão com as idades e a hidratação, principalmente quando usada juntamente com altos níveis de MK e cinzas volantes.

O uso de 5% de cal hidratada como um complemento para concretos autoadensáveis com baixos teores de cimento aumenta a resistência à compressão de 38,4% e 55,5%, em composições com teor de cimento de 200 kg/m³ e 48,4% e 19,6% em composições com teor de cimento de 120 kg/m³, aos 7 e 90 dias, respectivamente (ANJOS *et al.*, 2020).

Hoppe Filho (2008) submeteu suas misturas a carbonatação acelerada em uma câmara climática concentração de CO₂ de 5,0%. As profundidades de carbonatação foram medidas após 4, 8, 12, 16 e 20 semanas de exposição. O teor de hidróxido de cálcio não reduziu significativamente a susceptibilidade à carbonatação. Portanto, considerou-se que o teor remanescente de portlandita na matriz hidratada não é o fator determinante do avanço da interface de alcalinidade

Mira, Papadakis e Tsimas (2002) elaboraram concretos com substituição de cal entre 0% a 25% do peso do cimento. As propriedades do concreto examinadas foram propriedades físicas e estruturais (como queda, tempo de endurecimento, mudança de comprimento e resistência à compressão), e propriedades de durabilidade (como porosidade, profundidade de carbonatação e corrosão do reforço).

Mira, Papadakis e Tsimas (2002) verificaram que os resultados apresentaram uma redução da profundidade de carbonatação nos concretos com adição de até 10% de cal hidratada, todavia, nas misturas com mais de 10% os resultados de carbonatação começaram a ser desfavoráveis.

Anjos *et al.*, (2020) produziram concretos auto adensáveis com consumo de cimento de apenas 120 kg/m³ e 200 kg/m³, com adições minerais de metacaulim e cinzas volantes. A difração de raios X mostrou que os principais produtos hidratados formados foram a gismondina e o C-S-H, e a Portlandita foi totalmente consumida em algumas misturas, exceto nas mistura com cinzas volante e cal hidratada.

2.2 Carbonatação

A carbonatação é um fenômeno que se verifica no concreto, devido a reações internas por conta da penetração do gás carbônico no interior da massa do material, através de sua rede capilar.

No concreto armado, ocorre a redução da durabilidade porque o dióxido de carbono (CO_2) reduz a alcalinidade da água dos poros do concreto nas vizinhanças das armaduras (OLLIVIER & VICHOT, 2014).

Em geral, a reação de carbonatação não é prejudicial às propriedades mecânicas de materiais comuns à base de cimento Portland, porém causa uma redução na alcalinidade da solução de poros, que é considerada uma degradação química à estrutura do concreto armado (QIU, 2020).

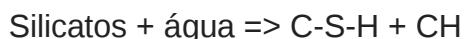
Com a presença de água, o CO_2 reage com os compostos alcalinos resultantes da hidratação do cimento, reduzindo o pH interno da matriz cimentícia.

Na composição química do cimento Portland há óxidos de sódio e de potássio (oriundos da argila do processo de fabricação), Na_2O e K_2O , ainda que em pequenas quantidades.

Em contato com água esses óxidos formam hidróxidos de sódio e de potássio:

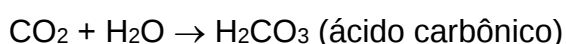


Os silicatos do cimento quando reagem com água produzem, além do silicato de cálcio hidratado, C-S-H, o hidróxido de cálcio CH, ou seja cal hidratada.

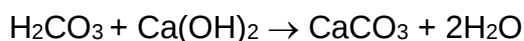


Normalmente no interior dos poros do concreto há água de equilíbrio com a umidade atmosférica. Essa água tem pH elevado (12,5-13,5) por conta dos hidróxidos de sódio, de potássio e de cálcio. No ambiente alcalino, sobre o aço forma-se película protetora que não o deixa oxidar. Diz-se que a armadura do concreto armado fica no estado passivo.

Quando o gás carbônico (CO_2) penetra no interior dos poros, o contato com a água produz ácido carbônico (H_2CO_3).

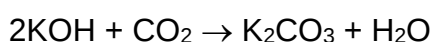
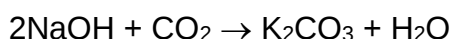


Esse ácido carbônico, ao reagir com o hidróxido de cálcio, produz carbonato de cálcio (CaCO_3):



Ou seja, a base, hidróxido de cálcio, se transforma em um carbonato, que é o carbonato de cálcio (calcário, de onde surge o cimento).

O mesmo ocorre com as bases de sódio e potássio (sem apresentação da reação intermediária):



Esse fenômeno é chamado de carbonatação do concreto. Onde isto ocorre, diz-se que o concreto está carbonatado. Como consequência, o pH da água dos poros, que era na faixa de 12,5 – 13,5 cai para 9 – 10.

Se a camada carbonatada atinge o ferro do concreto armado ocorre o que se chama *despassivação da armadura*. A película protetora se desestabiliza e o aço começa a sofrer o processo de corrosão, popularmente conhecido como ferrugem.

Uma maneira de se saber se o concreto está ou não carbonatado é aspergindo uma solução de fnoftaleína em álcool. A parte incolor é a carbonatada, e a que fica com coloração carmim (Figura 2.1) é a que tem pH elevado, portanto não sofreu ainda o processo de carbonatação.

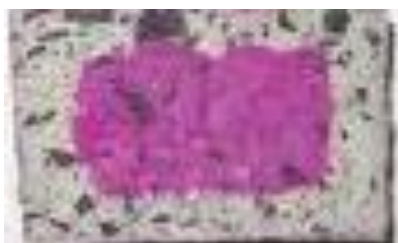


Figura 2.1 – Seção de concreto parcialmente carbonatada

A presença de pozolanas no concreto podem modificar o fenômeno da carbonatação. No entanto, Almeida *et al.* (2015) verificaram que com 30% de SCBA a carbonatação na argamassa em estudo chegou a resultados semelhante ao traço de referência. Os

autores atribuíram isto a um melhor empacotamento produzido pela finura da SCBA usada.

Os concretos submetidos à carbonatação tem redução de alcalinidade devido ao consumo do hidróxido de cálcio pela alta pozolanicidade. Torgal *et al* (2012), em seu estudo, apresentaram resultados onde a RHA teve um efeito adverso na carbonatação a pequena idades, contudo mostraram resultados com até 50% de redução da profundidade de carbonatação quando os CAA's foram submetidos à cura úmida por 28 dias.

Com o uso de pozolanas e consequente redução da quantidade de CH é previsto que a carbonatação tenha maior profundidad. Singh e Singh (2016) verificaram, ao usar o metacaulim, um comportamento positivo, com aumento da resistência à carbonatação nas misturas de seus CAA's. Esse resultado foi atribuído ao refinamento dos poros eficaz e também à hidratação prolongada do concreto estudado.

Na Tabela 3.1 tem-se a nomenclatura utilizada.

Tabela 3.1 – Nomenclatura dos Materiais

Material	Sigla	Nos Traços
Cinzas do Bagaço de Cana-de-açúcar (Sugar Cane Bagasse Ash)	SCBA	S
Cinzas da Casca de Arroz (Rice Husk Ash)	RHA	R
Metacaulim (Metacaolin)	MK	M
Hidróxido de Cálcio (Cal Hidratada)	CH	C

Nas misturas, o número que segue à letra correspondente representa o percentual de substituição do cimento Portland.

Por exemplo, a mistura com a sigla S40C10, significa que vai-se ter um ligante com 40% de SCBA, 10% de CH e 50% de cimento Portland.

A mistura com a sigla REF, indica que foi usado apenas cimento Portland como ligante.

3.1 Materiais Utilizados

Apresentam-se, a seguir, os materiais utilizados na pesquisa.

Em todos os materiais foi usado o mesmo lote com a intenção de evitar variações nas suas propriedades.

3.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado foi o CPV-ARI, Fabricado pela Mizu Cimentos. Esse tipo de cimento foi utilizado por ele não conter adições em sua composição e facilitar a análise da influência das adições minerais utilizadas. Na realidade, segundo a ABNT NBR 16697 (2018), o cimento CPV pode conter até 10% de fíller calcário, mas ele não vai interferir nas demais adições.

3.1.2 Adições Minerais

As adições minerais utilizadas foram:

➤ Cinzas do Bagaço da Cana-de-açúcar (SCBA)

A SCBA é uma cinza proveniente da queima do bagaço da cana-de-açúcar, coletado na usina BIOSEV, unidade de Estivas, cidade de Arês/RN.

Após a coleta, o produto passou por um procedimento de preparação com a secagem em estufa a uma temperatura de 105°C, em seguida foi separado em quantidades de 2000 gramas e moído em um moinho de bolas durante 3 horas, no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas - LABEME da Universidade Federal da Paraíba.

A moagem desse resíduo tem a finalidade de aumentar a sua reatividade e melhorar o índice de pozolanicidade, o que também foi feito em trabalhos que utilizaram a SCBA como material pozolânico, ANJOS *et al.* (2013); CORDEIRO; TAVARES; TOLEDO FILHO (2016).

➤ Cinzas da Casca de Arroz (RHA)

A RHA utilizada foi produzida pela Silcca Nobre, no município de Alegrete/RS.

A RHA foi usada com a finalidade de comparação com outro resíduo agroindustrial utilizado na pesquisa, a SCBA.

➤ Metacaulim (MK)

O metacaulim usado era de coloração laranja, marca BZ, fornecido pela empresa Sibelco, fabricado pela Caulim Nordeste, situada em Ipojuca/PE, e adquirido em comércio na cidade de Joao Pessoa/PB.

3.1.3 Cal Hidratada (CH)

A cal usada foi a cal hidratada CH-I, de alta reatividade, produzida e fornecida pela IMAP, proveniente do município de Governador Dix-Sept Rosado/RN.

3.1.4 Areia

Toda a areia usada, denominada como agregado miúdo, foi retirada de dunas proveniente de fonte de água doce no município de Ceará Mirim/RN.

A areia tem uma cor mais clara e seus grãos são mais esféricos que a areia de rio, ideal para produção de concretos e argamassas.

O gráfico de distribuição granulométrica está na Figura 3.2. Ele foi obtido a partir do ensaio de granulometria realizado de acordo com a ABNT NBR 248 (2013).

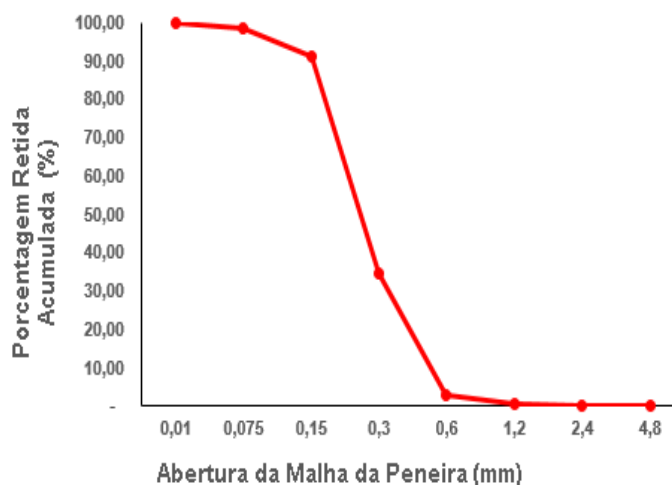


Figura 3.2 – Perfil Granulométrico da Areia

3.1.5 Água

A água aplicada na produção das argamassas foi proveniente da rede pública de abastecimento da CAERN/RN, usada à temperatura ambiente.

3.1.6 Aditivo Superplastificante

Para todas as misturas de argamassa foi empregado o aditivo superplastificante MasterGlenium® SCC 160° a base de éter policarboxílico, fornecido pela empresa Master Builders/BASF.

3.2 Caracterização dos Materiais

3.2.1 Caracterização da Areia

A curva granulométrica do agregado miúdo, já apresentada, foi obtida através do ensaio de peneiramento. A massa específica retida foi conforme a ABNT NBR NM 52 (2009), necessária ao cálculo da dosagem das misturas.

Na Tabela 3.2 estão os resultados do diâmetro máximo, do módulo de finura e da massa específica da areia. Pelo resultado do módulo de finura no valor de 2,20, a areia se classifica como areia média.

Tabela 3.2 – Caracterização da Areia

Caracterização	Valor	Unidade	NBR
Diametro Máximo	2,40	mm	NM 248
Módulo de Finura	2,20		NM 248
Massa Específica	2,65	kg/dm ³	NM 52

3.2.2 Caracterização dos Materiais Finos: Cimento Portland, Adições e Cal

➤ Massa Específica

A determinação das massas específicas do cimento, das adições minerais e da cal hidratada seguiram as diretrizes da ABNT NBR NM 23 (2001).

Os ensaios foram realizados no laboratório de Durabilidade do IFRN/RN.

➤ Área Superficial (BET)

A área superficial do cimento Portland e das adições minerais foram obtidas pelo ensaio do método Brunauer, Emmett e Teller (BET), o qual tem o objetivo de indicar indiretamente a morfologia e microestrutura das partículas.

O ensaio BET, obtém a soma das áreas das superfícies das partículas contidas em 1 grama de material, que conseguem adsorver o Nitrogênio.

Para a realização do ensaio retirou-se uma pequena quantidade de cada material, aproximadamente 1 (um) grama, seco em estufa, enviado ao Laboratório de Análises Térmicas do Departamento de Engenharia de Materiais da UFRN, em equipamento da JAPAN modelo BELSORP-mini II.

➤ Mineralogia

A mineralogia dos materiais finos foi avaliada através do ensaio de Difratomia de Raios X (DRX). Os ensaios foram realizados no laboratório do Núcleo Tecnológico em cimentação de poços de petróleo (NTCPP) da UFRN utilizando equipamento Eco D8

ADVANCE da marca Bruker, com fonte de radiação anodo de Cobre (Cu-), tensão aplicada de 40 kv, potência de 1000W e corrente de 25 mA. A velocidade de coleta dos dados no goniômetro realizou-se à $0,025^{\circ}2\theta$, com tempo de passo de 0,5 segundos. A faixa varrida coletou dados entre 5 à $60^{\circ}2\theta$ com filtro detector de Nitrogênio.

➤ **Composição Química**

A composição química dos materiais foi feita através do ensaio de Fluorescência de Raios X (FRX).

Para realização do ensaio foi utilizado um aparelho Shimadzu modelo EDX-720, do laboratório de caracterização mineral do campus Natal-Central do IFRN.

➤ **Granulometria à Laser**

A Granulometria dos materiais finos, devido ao pequeno tamanho das partículas, foi obtida pelo ensaio de granulometria à laser, no qual se determina o tamanho e a distribuição das partículas. Estas são espalhadas em um fluido em movimento provocando descontinuidades no fluxo do fluido, as quais são detectadas por uma luz incidente e correlacionadas com a dimensão da partícula. De cada material foram coletados, aproximadamente, 6 gramas, e após secagem em estufa as amostras foram enviadas ao Laboratório.

As amostras foram inseridas no equipamento CILAS Ecosizer 920, com faixa de leitura entre 0,3 à 400 μm , do laboratório de Materiais Cerâmicos e Metais Especiais, Departamento de Física UFRN/RN.

➤ **Índice de Atividade Pozolânica (IAP)**

O índice de atividade pozolânica (IAP) das adições foi determinado com base nos procedimentos recomendados pela ABNT NBR 5751 (2012).

Foram produzidas argamassas compostas de uma parte, em massa, de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), nove partes de areia normalizada, ABNT NBR 7214 (2015) e mais uma quantidade de material pozolânico, correspondente ao dobro do volume de hidróxido de cálcio. A partir do valor médio de resistência à compressão aos 7 dias de três corpos de prova determina-se o índice de atividade pozolânica (IAP).

O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da DIACON – IFRN/ Campus Natal/RN.

3.3 Traços das Argamassas Autoadensáveis com Baixos Teores de Cimento

3.3.1 Estudo Preliminar das Pastas autoadensáveis

Em estudos preliminares, feitos com pastas autoadensáveis de cimento, foram usados 5%, 7,5% e 10% de cal hidratada em substituição parcial ao cimento Portland, conforme se vê na Tabela 3.3.

Na análise das pastas autoadensáveis foram utilizados o cimento, tipo CP V Mizú® de alta resistência inicial. As adições empregadas foram: o metacaulim BZ® (MK), de alta reatividade; o resíduo agroindustrial proveniente da queima do bagaço da cana de açúcar (SCBA), obtido em indústria de açúcar e etanol local, potencial adição mineral estudada; a cinza da casca do arroz (RHA) fabricada pela Silcca Nobre®, já sendo um produto comercial com alto teor de SiO_2 ; o Fíler calcário como fino inerte, com área superficial de $10,90 \text{ m}^2/\text{g}$; e a cal Hidratada, classe CH-I utilizada com o intuito de aumentar a reserva alcalina. O aditivo superplastificante (SP) utilizado foi o Glenium SCC 160®, produzido pela Basf.

O proporcionamento das pastas teve redução em 60% do teor de cimento. Previamente, os materiais foram secos, homogeneizados, pesados e ensacados por mistura. Para obtenção das pastas foi utilizada uma argamassadeira, sendo primeiro inserida a água de amassamento e, após, os ligantes.

O programa experimental envolveu três etapas. A primeira consistiu na uniformização das consistências de todos os traços através da dosagem de aditivo superplastificante, sendo inserido em pequenas quantidades até a pasta obter o diâmetro de $220\text{mm} \pm 20\text{mm}$ no ensaio de espalhamento, em superfície lisa, isenta de obstáculos. O molde utilizado para o suporte da pasta no ensaio foi o mini tronco de cone. Após a obtenção dos percentuais de aditivos das pastas a segunda etapa foi refazer as pastas com o teor ideal de superplastificante para moldagem de 8 corpos de prova cilíndricos de $5\text{cm} \times 10\text{cm}$.

Foram avaliados os ensaios de: DRX, Termogravimetria (TG) e carbonatação em câmara acelerada com teor de $5\% \pm 0,5$ de CO_2 e indicação química de pH através da fenolftaleína, realizado no terço central (Figura 3.3) do corpo de prova para cada

idade. Todas as amostras foram curadas por imersão em água durante 28 dias, secaram ao ar livre 14 dias após a cura e depois foram colocadas na câmara. A contar desta etapa, o ensaio de carbonatação foi realizado com 14, 28, 56, 63 e 70 dias. As amostras submetidas à TG e DRX foram extraídas nas idades de 7, 42 e 70 dias, almofarizadas e peneiradas na malha nº 200.

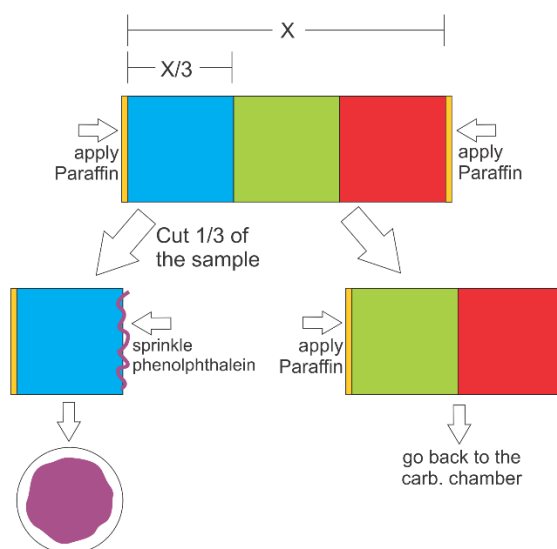


Figura 3.3 – Área de Carbonatação

As pastas foram utilizadas para entender o comportamento dos ligantes na reologia e definir os traços de concretos autoadensáveis, como realizado no estudo de MORETTI; NUNES; SALES (2018).

A Tabela 3.3 mostra a composição das pastas autoadensáveis, com baixos teores de cimento confeccionadas com as diversas adições minerais, submetidas à carbonatação, comparando a carbonatação com o teor de portlandita e de carbonato de cálcio.

Tabela 3.3 – Composição das Misturas Unitárias em Massa das Pastas.

Misturas	Finos						Água/Lig.
	CIM	SCBA	RHA	MK	CH	Filler	
REF	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,44
S30	0,40	0,3	0,0	0,2	0,0	0,1	0,44
S30C5	0,350	0,3	0,0	0,2	0,05	0,1	0,44
S30C7,5	0,325	0,3	0,0	0,2	0,075	0,1	0,44
S30C10	0,30	0,3	0,0	0,2	0,10	0,1	0,44
R30	0,40	0,0	0,3	0,2	0,0	0,1	0,44
R30C5	0,350	0,0	0,3	0,2	0,05	0,1	0,44
R30C7,5	0,325	0,0	0,3	0,2	0,075	0,1	0,44
R30C10	0,30	0,0	0,3	0,2	0,10	0,1	0,44

O teor ideal de cal foi obtido através da análise da Difração de Raios X (DRX) e Termogravimetria (TG) realizados nas pastas autoadensáveis. Ali foi definido o teor residual de CH presente em cada composição antes de serem submetidas ao processo de carbonatação acelerada afim de detectar mudanças na sua composição química na zona carbonatada e não carbonatada.

Nota-se que a menor penetração de carbonatação (Figura 3.4) ocorreu quando se usou 10% de cal hidratada. Desta forma, neste trabalho, esse foi o teor utilizado nas misturas das argamassas autoadensáveis, com o intuito de se fazer a realcalinização. Portanto, o teor de 10% de cal hidratada em substituição ao cimento, foi o escolhido por ter sido o que apresentou a maior resistência à penetração do CO₂ nas pastas autoadensáveis.

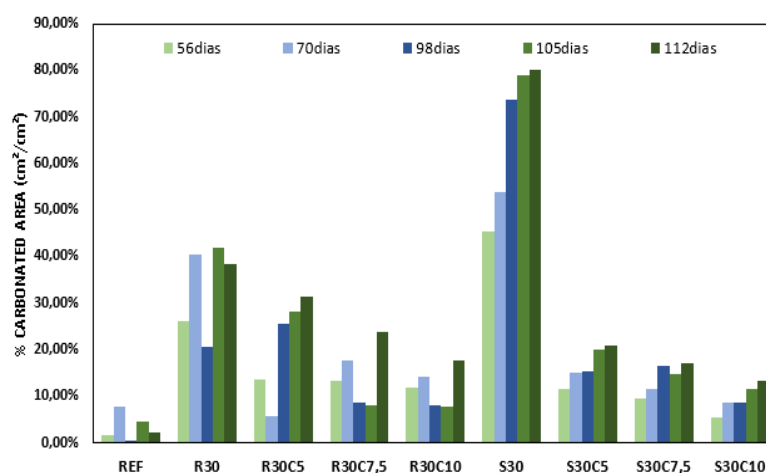


Figura 3.4 – Área Carbonatada das Pastas Autoadensáveis (%)

3.3.2 Definição dos Traços das Argamassas

Os traços foram definidos no intuito de produzir argamassas autoadensáveis com baixos teores de cimento Portland.

Como estão sendo utilizados 3 (três) materiais pozolânicos, estes consomem o hidróxido de cálcio oriundo da hidratação dos silicatos do cimento. Isto faz baixar o pH da água dos poros da argamassa ou dos concretos, que pode ter efeito negativo no caso de peças de concreto armado

A diminuição do teor de hidróxido de cálcio provocado pelas adições pozolânicas aumenta a velocidade de carbonatação da pasta endurecida. Para compensar isto, foi utilizada cal em algumas misturas.

Nas argamassas, os percentuais de adições que substituíram parcialmente o cimento Portland foram escolhidos de forma a se ter 40% ou 50% de substituição.

Quando se usou uma única adição, o percentual de substituição do cimento foi de 40%. Quando foram usadas duas adições na mesma mistura, o percentual de cada foi de 20%.

Para as argamassas autoadensáveis, a Tabela 3.4 indica as misturas unitárias em massa das 12 argamassas testadas na pesquisa mais a mistura referência (sem adição). A reação água/ligante foi mantida constante em 0,44 por ter sido o valor utilizado por DINIZ (2018).

Tabela 3.4 – Composição das Misturas Unitárias em Massa das argamassas.

Misturas	Finos					Areia	Água/Lig.
	CIM	SCBA	RHA	MK	CH		
REF	1,0	0	0	0	0	1,64	0,44
S40	0,6	0,4	0,0	0,0	0,0	1,64	0,44
S40C10	0,5	0,4	0,0	0,0	0,1	1,64	0,44
R40	0,6	0,0	0,4	0,0	0,0	1,64	0,44
R40C10	0,5	0,0	0,4	0,0	0,1	1,64	0,44
M40	0,6	0,0	0,0	0,4	0,0	1,64	0,44
M40C10	0,5	0,0	0,0	0,4	0,1	1,64	0,44
S20R20	0,6	0,2	0,2	0,0	0,0	1,64	0,44
S20R20C10	0,5	0,2	0,2	0,0	0,1	1,64	0,44
S20M20	0,6	0,2	0,0	0,2	0,0	1,64	0,44
S20M20C10	0,5	0,2	0,0	0,2	0,1	1,64	0,44
R20M20	0,6	0,0	0,2	0,2	0,0	1,64	0,44
R20M20C10	0,5	0,0	0,2	0,2	0,1	1,64	0,44

A definição da composição das misturas baseou-se em trabalhos anteriores do grupo de pesquisa do IFRN, como Fonseca (2016), Diniz (2018) e Farias (2019), variando as adições minerais que substituíram o cimento e a porcentagem de substituição.

Esta pesquisa procurou produzir argamassas autoadensáveis com baixos teores de cimento, avaliando-se o efeito da redução de até 50%. Para tanto, foi retirado a brita das misturas dos trabalhos anteriores, definiu-se um traço referência da argamassa apenas com cimento com consumo aproximado de 719 kg/m³.

A relação água/finos dos traços foi constante, a quantidade de aditivo superplastificante foi definida com o intuito em produzir argamassas autoadensáveis com as mesmas características de espalhamento do traço de referência. Para alcançar a quantidade certa de aditivo de cada traço, foi feita uma mistura teste com apenas 0,5 litro de argamassa auto adensável na qual avaliou-se apenas o espalhamento e foram feitos os ajustes para alcançar as características requeridas.

Pela relação água/finos das misturas, foi definida a quantidade de aditivo superplastificante, possibilitando-se produzir argamassas autoadensáveis com as mesmas características de espalhamento do traço de referência. Para alcançar a quantidade certa de aditivo em cada mistura, foi feita um teste com apenas 0,5 litros de argamassa na qual verificou apenas o espalhamento e foram feitas adições do aditivo para alcançar as características requeridas ao espalhamento, 300mm ± 50mm.

3.3.3 Preparo e Moldagem das Argamassas

Para cada traço foram confeccionados 6 corpos de prova em moldes cilíndricos de pvc (Polyvinyl chloride) com 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, e 5 corpos de prova em moldes cúbicos de acrílico de 5 cm de aresta.

A sequência de mistura dos componentes das argamassas consta na Tabela 3.5, onde também está indicado a ordem e o tempo. Essa sequência foi definida por experimentação feita no Laboratório.

Tabela 3.5 – Sequência de Mistura dos Componentes das Argamassas

Sequencia de Mistura na Maseira		
Ordem	Materiais	Tempo (seg)
1º	50% da areia + 50% da água	30
2º	Cimento + MK + 50% da areia + 30% da água	60
3º	50% do aditivo	90
4º	SCBA ou RHA + CH + 20% da água + 50% do aditivo	120

Nas primeiras vinte e quatro horas após moldagens os corpos de prova foram mantidos dentro das fôrmas para não perderem a umidade. Após esse período, desmoldados, identificados e colocados em imersão em água saturada com cal até o prazo para a realização dos ensaios.

3.3.4 Propriedades no Estado Fresco

No estado fresco foram obtidos o espalhamento e o teor de ar incorporado.

3.3.4.1 Espalhamento

O espalhamento está relacionado com a consistência das argamassas. Através desse ensaio é que se obteve o teor ideal de aditivo para cada mistura.

Para chegar ao diâmetro de espalhamento entre os valores recomendados pela EFNARC (2002) foram feitos 3 (três) testes em cada mistura variando-se o aditivo com a finalidade de se obter o espalhamento desejado, valor de $300\text{mm} \pm 50\text{mm}$ (EFNARC 2002).

O equipamento usado foi um cone e uma superfície de vidro, conforme se vê na Figura 3.5.

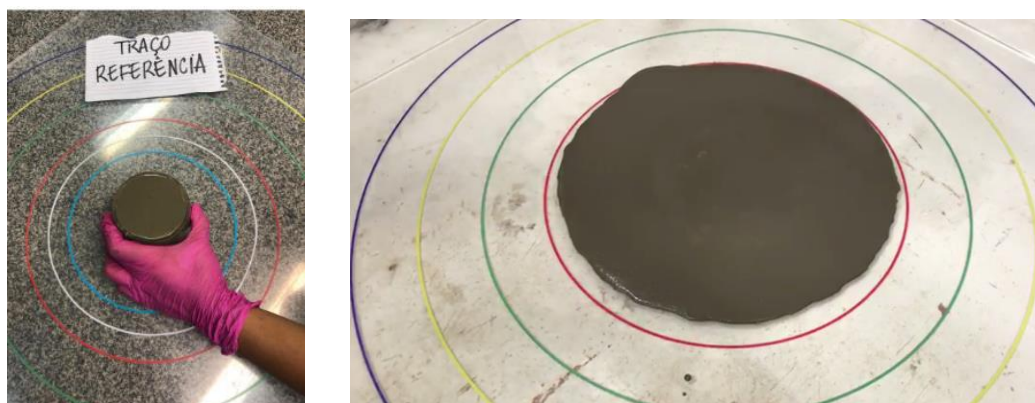




Figura 3.5 – Ensaio de espalhamento e molde dos corpos de prova

A medida do espalhamento foi tomada com uma régua graduada, feita duas leituras do diâmetro da argamassa quando a mesma estava totalmente uniforme na placa. O índice de consistência é dado pela média aritmética das leituras.

3.3.4.2 Teor de Ar Incorporado

O ensaio do teor de ar incorporado identifica os vazios formados pela entrada de ar no interior da argamassa incorporado durante o processo de mistura.

No Brasil, a determinação do teor de ar incorporado, é realizado pelo método pressométrico, ABNT NBR 47 (2002). O equipamento usado está exposto na Figura 3.6.



Figura 3.6 – Medidor de Ar Incorporado

O aparelho usado no ensaio equivale a um recipiente hermeticamente fechado, preenchido com argamassa, onde, através de um orifício injeta-se água no intuito em expulsar o ar contido. Manômetros indicam o percentual de ar na mistura.

3.3.5 Propriedades no Estado Endurecido

As identificações dos ensaios das argamassas autoadensáveis no estado endurecido, estão apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Ensaios no Estado Endurecido

Estado	Ensaio	Norma	Corpo de Prova (CP)		Quantidade de CP	Idade (dias)
			Dimensão	Forma		
Endurecido	Resistência à Compressão	NBR 5739	10x5 cm	Cilíndrico	3	3,7,28 e 70
	Absorção Capilar	NBR 9779	10x5 cm	Cilíndrico	3	28
	Carbonatação	FprCEN/TS 12390-12	5x5x5 cm	Cúbico	3	42,45,49,56 e 70
	DRX				1	42 e 70
	TG				1	42 e 70

O fluxograma, Figura 3.7, apresenta a cronologia dos ensaios realizados das argamassas no estado endurecido. Os ensaios esquematizados com duas cores representam que na hora do ensaio a condição ambiental foi alterada.

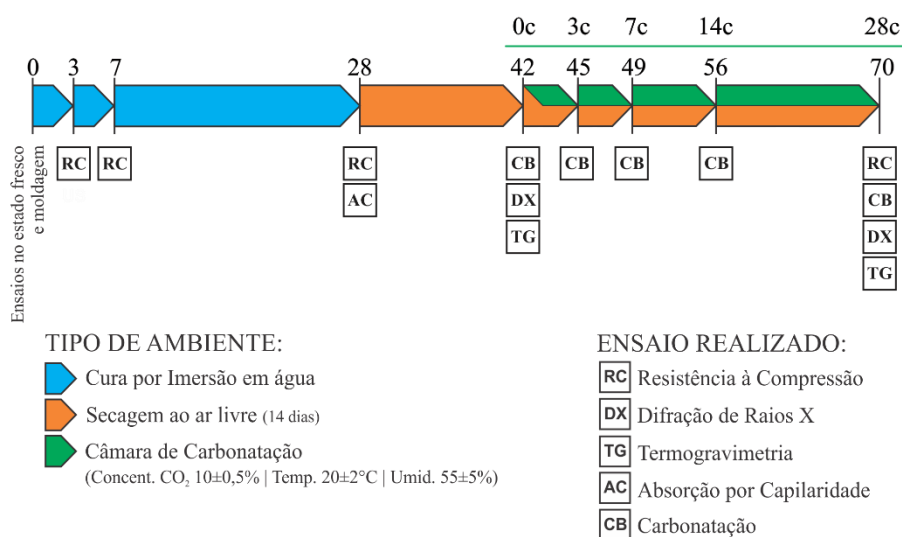


Figura 3.7 – Cronograma dos ensaios para cada mistura

3.3.5.1 Absorção de Água por Capilaridade

Na determinação da absorção de água por capilaridade, foi realizado ensaio prescrito na Norma ABNT NBR 9779 (2012), aos 28 dias após moldagem. A escolha pela determinação do coeficiente de absorção capilar aos 28 dias se deu para se ter um único valor e não uma curva para representar a absorção capilar por mistura, facilitando a análise de resultados.

Inicialmente, após 27 dias na cura úmida, os corpos de prova foram retirados da água e colocados em estufa a 105° C, por 24 horas. Em seguida, tiveram suas bases limpas e lixadas e dispostos em um tanque com água com 5 mm acima da face inferior, de modo que as outras partes tivessem contato com ela.

Foi determinado o peso inicial e sucessivamente o peso de cada um deles, obtido em balança de precisão de 0,01g nos seguintes períodos inicial e após: 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 12h, 24h, 48h e 72 horas.

Os referidos corpos-de-prova foram enxutos e secos superficialmente com pano antes de cada pesagem. Nos resultados indica-se a média dos valores das 3 amostras de cada traço.

O gráfico da absorção de água por capilaridade dos corpos de prova cilíndricos foi feito a partir da quantidade em massa de água absorvida dividida pela área da amostra em contato com a água de cada corpo de prova em função da raiz quadrada do tempo em minutos. Essa forma de cálculo é utilizada em trabalhos, como mostrado em KHATIB e MANGAT (1995).

3.3.5.2 Resistência à Compressão

Para este ensaio, foram confeccionados 3 corpos de prova cilíndricos para cada data de rompimento. Inicialmente, os corpos de prova foram retificados na base e no topo para uma melhor uniformização, com disco de corte diamantado em uma retífica de eixo horizontal. Em seguida foram rompidos nas idades de 3, 7, 28 e 70 dias a partir da data de moldagem. As amostras foram retiradas da cura úmida uma hora antes do ensaio, feito em uma prensa hidráulica, capacidade de carga de 100 tf, marca Contenco, modelo Pavitest, com leitura obtida no software disponibilizado pelo fabricante.

O resultado final da resistência a compressão, em MPa, é a média aritmética de 3 amostras para cada data, com indicação do seu desvio padrão.

O ensaio foi realizado no laboratório de Materiais de Construção do IFRN- Natal/RN.

3.3.5.3 Carbonatação

O ensaio de carbonatação acelerada testou as argamassas em um ambiente agressivo de exposição ao CO_2 buscando entender sua influência no material com adições. A avaliação foi feita em 5 idades diferentes: 42 dias (antes de entrar na câmara de carbonatação acelerada), 45 dias (3 dias na câmara), 49 dias (7 dias na câmara), 56 dias (14 dias na câmara) e aos 70 dias (28 dias na câmara).

As idades mensuradas para a carbonatação foram definidas experimentalmente, pelo fato da câmara de carbonatação acelerada ter uma alta concentração de CO_2 , $10\% \pm 0,5\%$. Ye et al. (2016) indicaram utilizar uma concentração de 20% de dióxido de carbono, porém esta condição não foi obedecida pois os sensores da câmara de carbonatação utilizada nessa pesquisa possuem capacidade de leitura de até 10% de concentração de gás carbônico.

Para cada idade foram confeccionados 3 corpos de prova cúbicos de 5 cm de aresta.

Os corpos de prova ficaram 28 dias em cura imersa na água com cal, 14 dias ao ar livre e após esse período foram inseridos na câmara de carbonatação acelerada.

O equipamento usado no ensaio foi uma câmara de carbonatação acelerada do Laboratório de Durabilidade do IFRN Natal/RN, Figura 3.8. com concentração de CO_2 de $10 \pm 0,5\%$, temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $55 \pm 5\%$.



Figura 3.8 – Câmara de carbonatação acelerada.

Para a manutenção da umidade foram utilizados no interior da câmara algumas pedras de sílica em gel azul reutilizáveis. Quando elas ficavam úmidas, mudavam sua

coloração para rosa indicando a necessidade de secagem. Eram então secas em estufa e assim prontas para reutilização.

Os corpos de prova foram cobertos com parafina deixando-se duas faces opostas livres para que a carbonatação ocorresse exclusivamente através delas. Nas datas do ensaio eles eram retirados da câmara e rompidos transversalmente no sentido do fluxo de penetração do CO_2 , Figura 3.9.

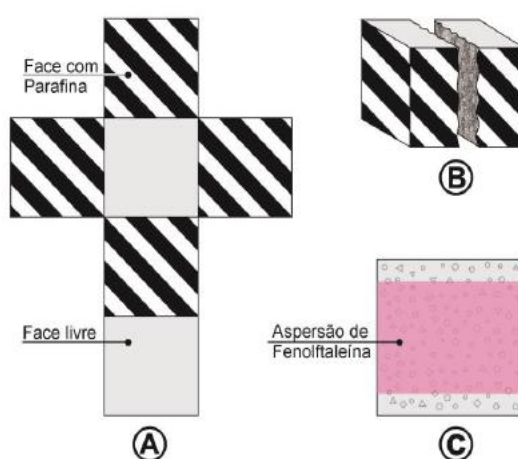


Figura 3.9 – Imagem da amostra submetida à carbonatação: A) faces com e sem parafina; B) sentido do corte de seção; C) aspersão de fenolftaleína. (Adaptado de DINIZ, 2018).

Após a ruptura, foi aspergida fenolftaleína (2g de fenolftaleína PA ($\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$) + 120 ml de álcool etílico PA ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) + 80 ml de água destilada), Figura 3.9 C, esperando-se a substância secar e apresentar coloração róseo avermelhada (Figura 3.10). Onde houve a penetração de CO_2 , foram feitas medições com um paquímetro nas profundidades carbonatadas em 4 pontos de cada lado, na face livre, em cada um dos 3 corpos de prova.. O resultado final da carbonatação foi a média da profundidade de penetração do CO_2 dessas leituras.

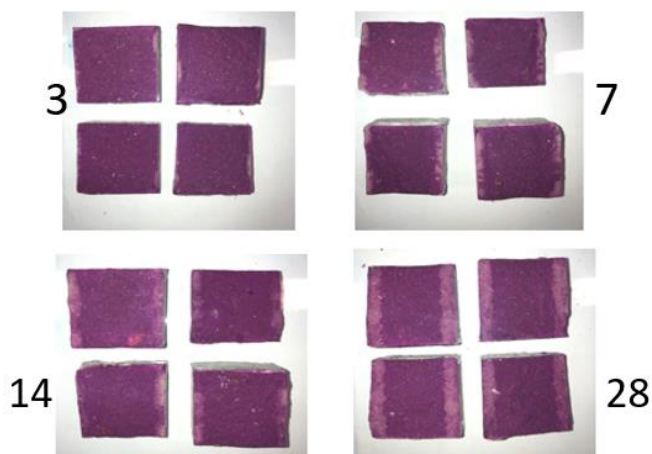


Figura 3.10 – Corpo de prova submetido à carbonatação da mistura referência (3, 7, 14 e 28 dias respectivamente)

3.3.5.4 Difração de Raios X

Para o ensaio de DRX as amostras foram coletadas rompendo-se um corpo de prova moldado para tal ensaio. Os pedaços de material foram colocados em um almofariz e destorroadas com um pilão, de porcelana.

Depois foram peneiradas aproveitando-se as partículas passantes na peneira número 200. O material obtido (em pó) cerca de 20g para cada ensaio, foi coletado e colocado em um Tubo de Eppendorf e enviado ao Laboratório de Caracterização Estrutural de Materiais/UFRN/RN.

Os testes foram realizados em um aparelho Eco D8 ADVANCE (figura 3.11) da marca Bruker, com fonte de radiação anodo de Cobre (Cu-), tensão aplicada de 40 kv, potência de 1000W e corrente de 25 mA. A velocidade de coleta dos dados no goniômetro realizou-se à $0,025^{\circ}2\theta$, com tempo de passo de 0,5 segundos. A faixa varrida coletou dados entre 5 à $60^{\circ}2\theta$ com filtro detector de Nitrogênio.



Figura 3.11 – Aparelho para ensaio de Difração de Raios X

3.3.5.5 Termogravimetria (TG)

O ensaio de TG seguiu o mesmo processo de coleta de material realizado para o ensaio de DRX. A secagem dos corpos de prova ocorreu em temperatura ambiente, sendo posteriormente extraídas as amostras, com broca de Widea, passando-as em peneira com a abertura da malha de 0,075mm.

Para o ensaio foi usada uma termo balança TGA-60 (Figura 3.12), fabricada pela empresa Shimadzu. As amostras foram submetidas a uma atmosfera de gás Nitrogênio com vazão de 50 ml por minuto e possuíam aproximadamente 10 miligramas. Os cadinhos utilizados para suporte são de Alumina. Foi aplicado uma taxa de aquecimento de 10°C /minuto, com temperatura inicial de 20°C e final de 800°C, em função do material do cadinho.



Figura 3.12 – Aparelho para ensaio de Termogravimetria

As análises de Termogravimetria foram realizadas no Laboratório do Instituto de Química, Central Analítica, Laboratório Multiusuário de Análises Térmicas – LAMAT/UFRN/RN.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos Finos

Os materiais finos nesta pesquisa são: Cimento CPV, SCBA, RHA, MK e Cal.

4.1.1 Área Superficial (BET)

A Tabela 4.1 mostra os resultados da área superficial (BET) do cimento Portland e das adições minerais empregadas na pesquisa.

Tabela 4.1 – Área Superficial Específica BET dos Finos

Material	Área Superficial Específica (BET) - (m ² /g)
CIM	1,70
SCBA	54,26
RHA	18,04
MK	18,11
CH	10,64

Todas as adições apresentaram uma área superficial maior que a do cimento, assim poder-se-ia dizer que as adições minerais são mais finas que aquele ligante. Entre as adições destaca-se a SCBA, que apesar do baixo tempo de moagem, devido à sua geometria angular e desuniforme conduziu ao maior valor de área superficial, devendo aumentar a demanda de água nas misturas de argamassas.

Cordeiro e Kurtis (2017) encontraram para o BET os valores de 11,35 m²/g para a SCBA e 38,65 m²/g para a RHA.

Anjos *et al.* (2013) acharam o valor de 43,04 m²/g para a SCBA.

4.1.2 Composição Química

A composição química dos materiais finos foi obtida através da fluorescência de raios X, e está indicada na Tabela 4.2

Tabela 4.2 – Fluorescência de Raio X dos Materiais Finos

Substância	Teor (%)				
	Cimento	SCBA	RHA	MK	CH
CaO	61,39	2,47	0,94	0,45	97,20
SiO ₂	19,13	60,04	92,42	53,92	1,32
Fe ₂ O ₃	3,65	25,78	0,09	9,90	0,47
SO ₃	3,26	0,34	0,13	0,22	0,13
Al ₂ O ₃	3,99	3,08	2,01	30,34	0,40
MgO	3,15	1,02	0,00	0,00	0,00
K ₂ O	0,52	3,39	0,00	2,25	0,40
Outros	4,91	3,88	4,40	2,92	0,08

O cimento apresenta composição coerente com o esperado, com cerca de 80 % de CaO e SiO₂.

Em relação a SCBA, observa-se um alto teor e sílica (SiO₂) seguido do alto teor de óxido de ferro (Fe₂O₃) presente na amostra, fato que Medeiros (2016) e Diniz (2018) acreditaram ser consequência do processo de moagem, feito com esferas metálicas, o que interferiu na sua composição.

Farias (2018), analisou a Fluorescência de Raios X da SCBA, antes e depois da moagem, e percebeu que a amostra sem moagem também continha óxido de ferro em sua composição, nas quantidades de: antes da moagem com 19,20% e depois da moagem, na quantidade de 10%. Farias (2018) afirmou que possivelmente esse teor de Fe₂O₃ seria proveniente do solo da região, também citado por Soares (2014) que utilizou a mesma SCBA. Outro motivo, citado por Soares (2017), seria que a própria cana-de-açúcar possui ferro em sua composição, pois a parte comestível da cana-de-açúcar apresenta 0,8% é de óxido de ferro.

Farias (2018), afirmou ainda que admite-se que haja contaminação durante a moagem, porém a quantidade de óxido de ferro presente no resíduo da biomassa da cana-de-açúcar não é exclusivamente devido a esta situação. Em relação a redução da quantidade de óxido de ferro após a moagem, explica-se pelo fato dos teores dos compostos químicos serem dependentes entre si, como houve um aumento do teor de outros componentes, acontece uma redução proporcional do teor de Fe₂O₃.

Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009) acharam em suas amostras de SCBA, um teor de óxido de ferro (Fe₂O₃) de apenas 0,09%. Já Paula *et al.* (2009), um teor de 6,537 % de óxido de ferro. Castro e Martins (2016) indicaram um valor de Fe₂O₃ de 47,98%.

Nota-se, então, na literatura, uma notável divergência no teor de ferros das cinzas do bagaço de cana, sem que explicações sejam dadas claramente.

Na amostra de RHA, prevaleceu a quantidade de Sílica (SiO_2). Na de metacaulim vê-se uma quantidade de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), coerente com a literatura. A amostra de cal mostrou um valor de 97,20% de óxido de cálcio (CaO), como esperado.

4.1.3 Difração de Raios X

O difratograma de raios-X do cimento Portland está mostrado na Figura 4.1.

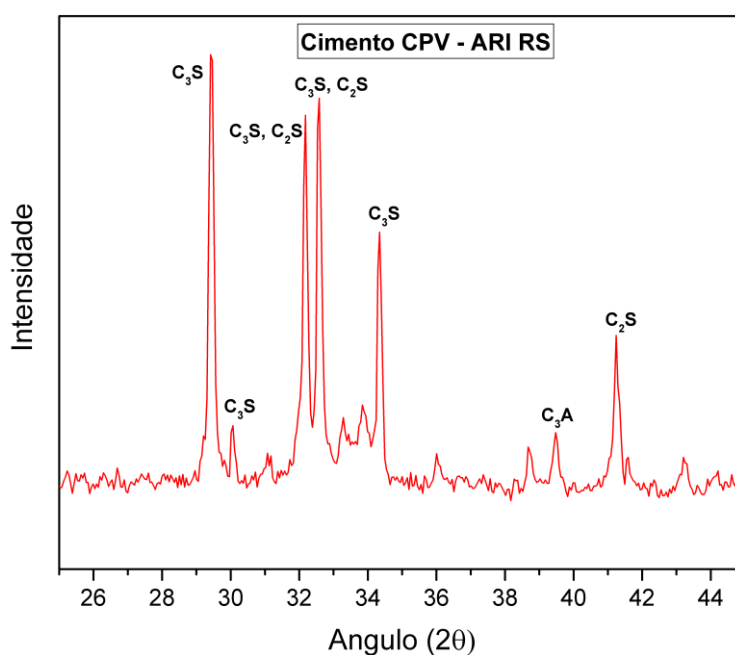


Figura 4.1 – Difração de Raios-X do Cimento Portland

No difratograma de Raios X do cimento Portland, no intervalo do ângulo 2θ de cerca de 25° a 45° , foram encontrados picos de Alita (C_3S), Belita (C_2S) e Aluminatos (C_3A).

Os difratogramas de Raios X das adições minerais (SCBA, RHA e MK) estão expostas nas Figuras (4.2, 4.3 e 4.4) respectivamente. Os halos amorfos mostram que em todas as adições minerais há uma tendência da reatividade pozolânica. Os picos de SiO_2 correspondem a sílica cristalina, praticamente sem reatividade.

Na difração de Raios X da SCBA, está indicando novamente a presença do ferro (Fe_2O_3), como já citado anteriormente. Já no de metacaulim, além de picos de sílica, há também picos de alumina cristalina,

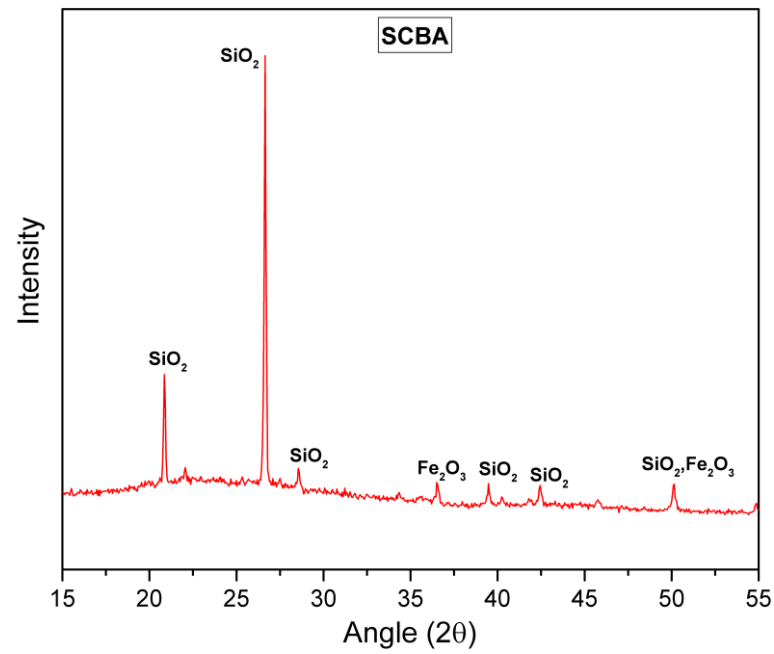


Figura 4.2 – Difração de Raios-X da SCBA

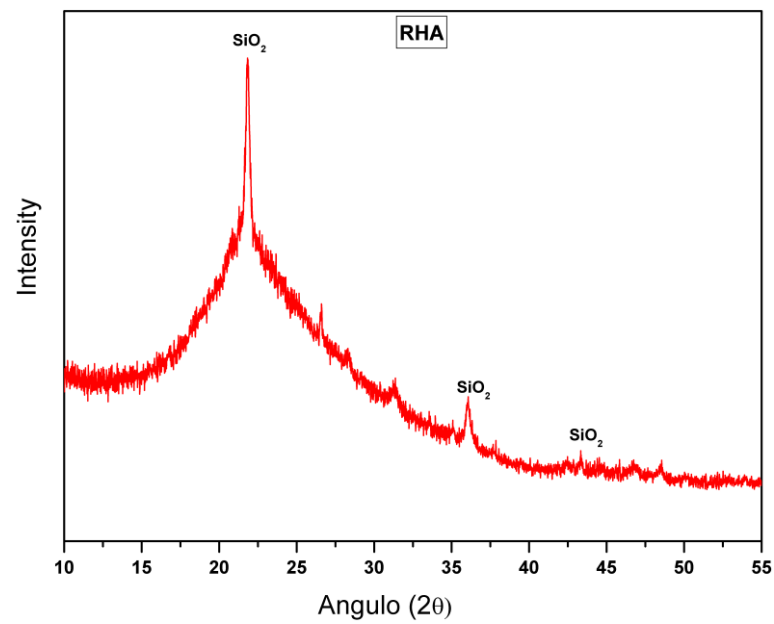


Figura 4.3 – Difração de Raios-X da RHA

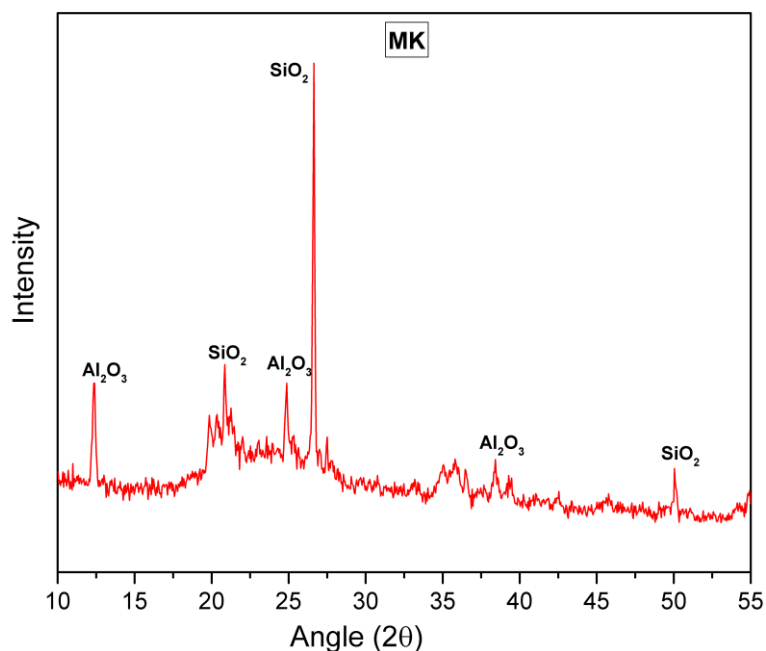


Figura 4.4 – Difração de Raios-X do MK

O difratograma de Raios X da Cal Hidratada é apresentado na Figura 4.5. A presença da calcita (CaCO_3) indica que a queima durante o processo de fabricação da cal não foi perfeita, como também pode indicar um início de carbonatação, devido ao CO_2 e umidade presentes no ar.

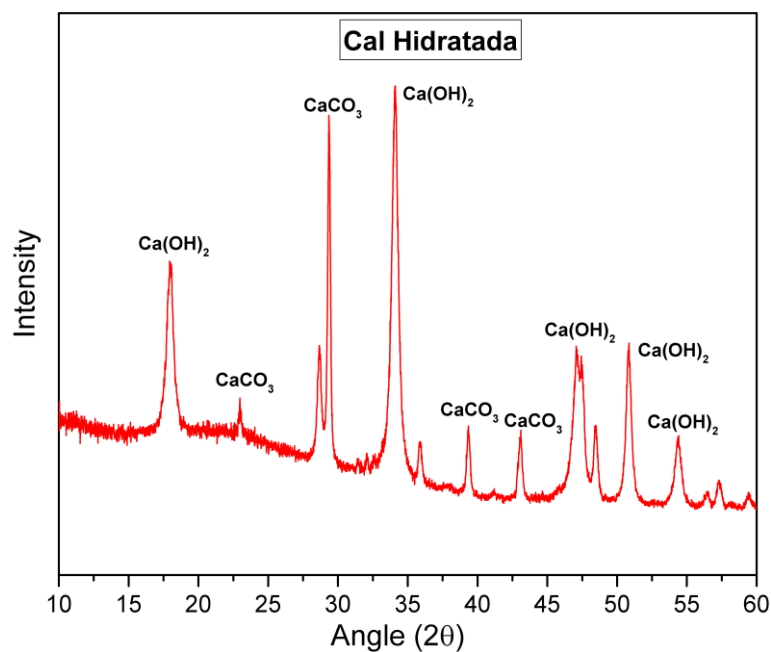


Figura 4.5 – Difração de Raios-X da Cal Hidratada

4.1.4 Granulometria à Laser

O ensaio de Granulometria à Laser foi realizado nos materiais finos das argamassas. Nas Figuras, no eixo das ordenadas estão as porcentagens passante acumuladas e o eixo das abscissas estão os diâmetros dos grãos.

Na Figura 4.6 tem-se o gráfico obtido para o cimento Portland, tendo sido encontrado um diâmetro médio de $12,32\mu\text{m}$.

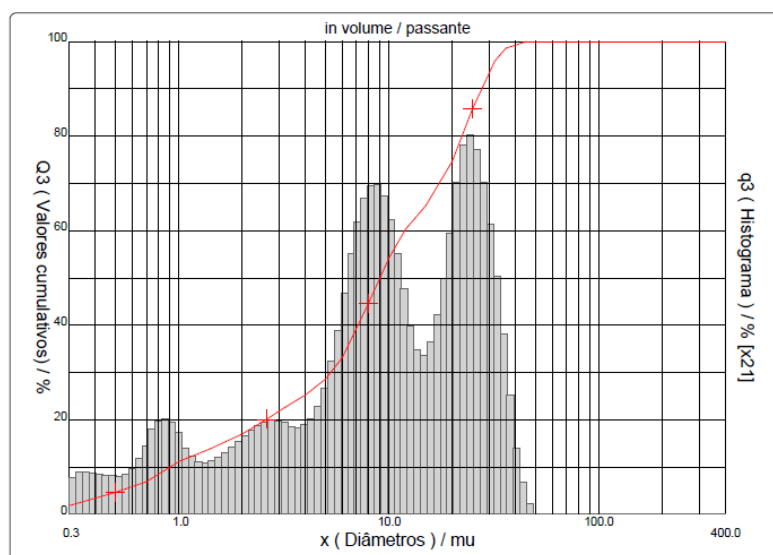


Figura 4.6 – Granulometria à laser do cimento Portland

A distribuição granulométrica da SCBA, Figura 4.7, indica um diâmetro médio de $18,2\mu\text{m}$, ligeiramente superior à do CPV. Entre as adições é a que teve granulometria mais grossa, embora tenha apresentado maior superfície específica.

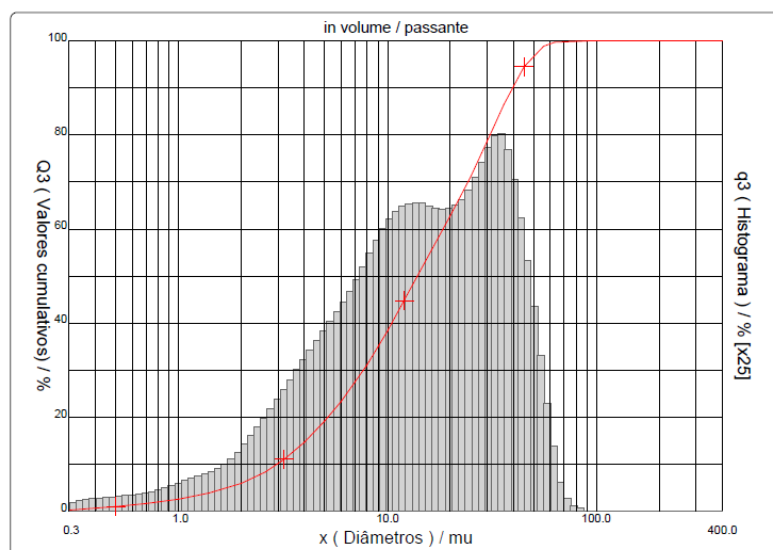


Figura 4.7 – Granulometria à laser da SCBA

A RHA possui um diâmetro médio um pouco menor quando comparado com a SCBA, na faixa de 16,22 μ m (Figura 4.8).

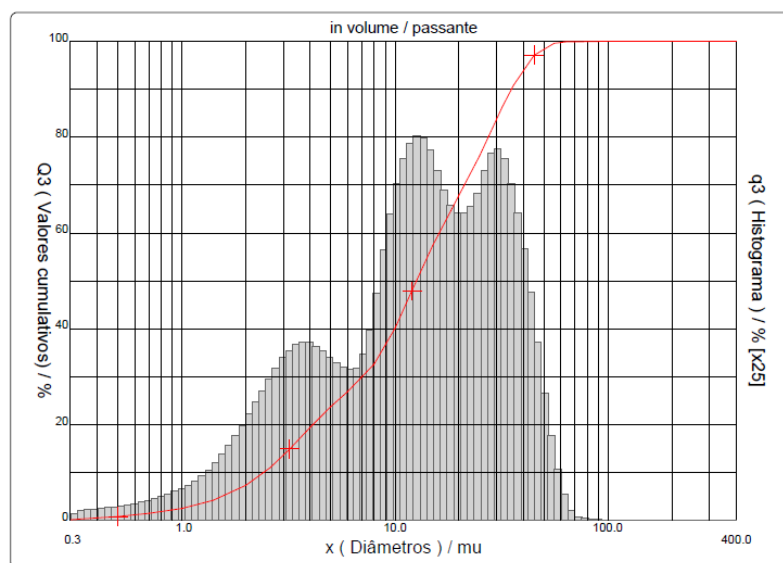


Figura 4.8 – Granulometria à laser da RHA

A Granulometria do MK apresentou diâmetro médio de 10,50 μ m, Figura 4.9, inferior ao do do cimento CPV.

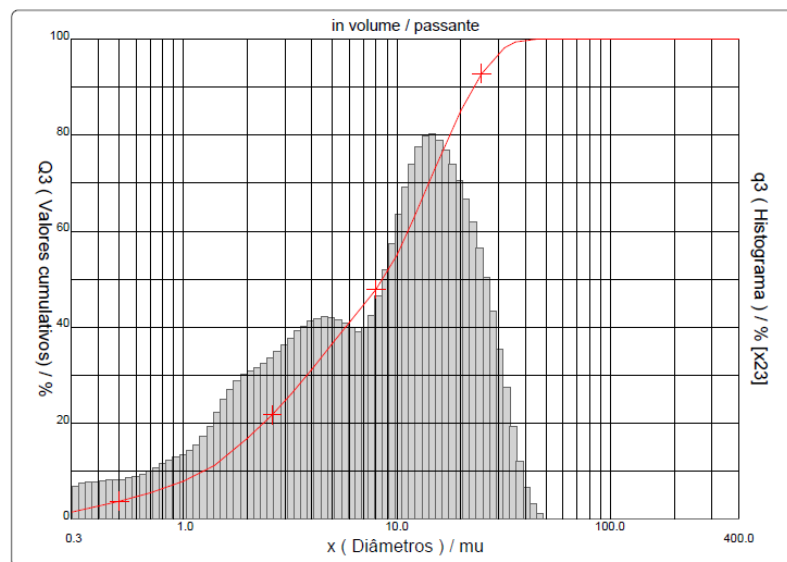


Figura 4.9 – Granulometria à laser do MK

A granulometria à laser da cal hidratada (Figura 4.10) indicou a um diâmetro médio de 6,82 μ m, o menor de todos.

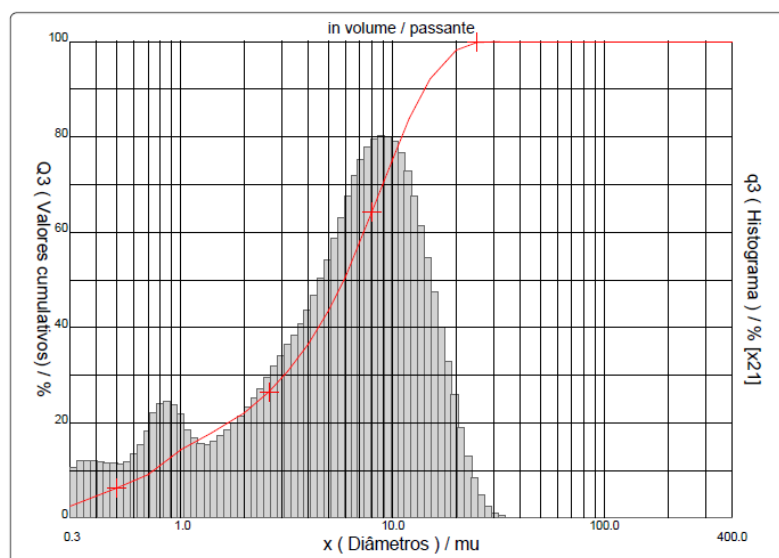


Figura 4.10 – Granulometria à laser da Cal Hidratada

Os resultados da granulometria à laser dos materiais finos estão expostos na Figura 4.11.

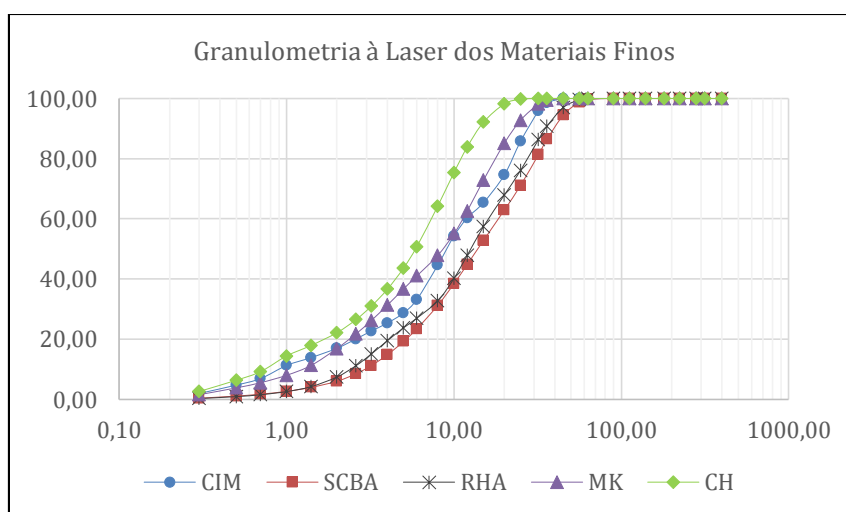


Figura 4.11 – Granulometria à laser dos Materiais Finos

Na Tabela 4.3 tem-se alguns resultados obtidos no ensaio de granulometria à laser dos materiais finos.

Tabela 4.3 – Granulometria à laser

Material	Diâmetro Médio (μm)	Diâmetro a 10% (μm)	Diâmetro a 90% (μm)
Cimento	12,32	0,90	27,75
SCBA	18,21	2,92	39,75
RHA	16,22	2,39	35,24
MK	10,80	1,23	23,06
Cal	6,82	0,74	14,18

Pode-se notar que as pozolana apresentaram, a 10%, grãos com dimensões inferiores a $3\mu\text{m}$. Entre as adições, a que apresentou dimensões menores foi o metacaulim. A cal apresentou partículas menores que o próprio cimento.

Tabela 4.4 – Área superficial e Diâmetro médio

Material	Área Superficial Específica (BET) - (m^2/g)	Diâmetro Médio (μm)
Cimento	1,70	12,32
SCBA	54,26	18,21
RHA	16,04	16,22
MK	16,11	10,80
Cal	10,64	6,82

Na tabela 4.4 tem-se a as áreas superficiais e o diâmetro médio dos materiais finos. Pode-se ver que não existe correlação direta, entre as duas propriedades. Enquanto o cimento tem um diâmetro médio menor, que as adições SCBA e RHA, elas apresentam área superficial muito superior. Já o metacaulim tem diâmetro médio menor que o cimento e sua área superficial é maior, contribuindo para isso o fato de a argila original se apresentar na forma de lamelas muito pequenas.

4.1.5 Índice de Atividade Pozolânica (IAP)

O ensaio de atividade pozolânica da SCBA, RHA e do MK foi realizado conforme a ABNT NBR 5751 (2012), e os resultados estão expostos na Tabela 4.5.

A citada norma recomenda que a resistência a compressão das argamassas aos 7 dias seja superior a 6 MPa.

As resistências aos 7 dias das argamassas com SCBA foi de 3,35 MPa e daquelas com RHA foi de 4,71 MPa, o que indica que existe uma certa atividade pozolânica

dessas duas adições. Porém em um grau menor que as pozolanas comerciais, como o metacaulim, que apresentou valor de 13,85 MPa.

Medeiros (2016) e Diniz (2018), usaram em suas pesquisas as mesmas adições minerais. O resultado do IAP da SCBA e da RHA também ficou abaixo do recomendado pela ABNT NBR 12653, porém foi possível produzir concretos com resistências acima de 35 MPa.

Tabela 4.5 – Índice de Atividade Pozolânica das Adições.

Adição Mineral	IAP (MPa)
SCBA	3,35
RHA	4,71
MK	13,85

Os resultados do índice de atividade pozolânica não foram satisfatórios para a SCBA e a RHA, pois não atingiram o valor mínimo requerido. A SCBA, apesar de ter a maior superfície específica, tem um conteúdo de sílica e alumina pouco superior a 63%, o que, em parte, pode contribuir para a baixa reatividade. Porém a cinza da casca de arroz, que tem um halo amorfo considerável no DRX, e ser formada por mais de 92% de sílica se mostrou mais ativa que a SCBA. No entanto, não conseguiu atingir a meta da ABNT NBR 5751, o que foi um resultado inesperado.

Deve-se considerar que as pozolanas têm diferentes cinéticas de reação, e o da cinza da casca de arroz deve ser mais lenta, como atestam os resultados de resistência à compressão, que serão adiante apresentados. Ali, pode-se ver que, nas misturas unárias, enquanto a resistência de argamassa em que há RHA aumenta 2,45 vezes a resistência entre 7 e 28 dias, aquela em que há o metacaulim só cresce 1,88 vezes. Sem as adições, o crescimento é de apenas 1,21 vezes. E no caso da SCBA esse crescimento é de 2 vezes. Então, se o ensaio de atividade pozolânica fosse feito aos 28 dias, as SCBA e RHA teriam melhor desempenho.

4.2 Comportamento das Argamassas no Estado Fresco

4.2.1 Composição das Argamassas

As composições das argamassas autoadensáveis estão expostas na Tabela 4.6, onde são apresentados os consumos de materiais destas por metro cúbico de argamassas. No CAA, seria acrescido o agregado graúdo, o que reduziria significativamente o consumo de cimento por m³ de concreto.

Tabela 4.6 – Consumo dos Materiais das Misturas de Argamassa

CONSUMO (KG/M ³)	Misturas	Finos				Areia	Água	Aditivo(%)	
		CIM	SCBA	RHA	MK				Cal
	REF	719,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1180,637	316,756	0,35
	S40	411,822	274,548	0,000	0,000	0,000	1125,648	302,003	3,50
	S40C10	373,474	248,983	0,000	0,000	62,246	1122,912	301,269	3,20
	R40	415,518	0,000	277,012	0,000	0,000	1135,750	304,713	0,70
	R40C10	376,511	0,000	251,007	0,000	62,752	1132,043	303,719	0,95
	M40	424,089	0,000	0,000	282,726	0,000	1159,178	310,999	2,10
	M40C10	383,535	0,000	0,000	255,690	63,922	1153,161	309,385	2,40
	S20R20	413,662	137,887	137,887	0,000	0,000	1130,676	303,352	1,10
	S20R20C10	374,986	124,995	124,995	0,000	62,498	1127,459	302,489	1,00
	S20M20	417,866	139,289	0,000	139,289	0,000	1142,167	306,435	2,10
	S20M20C10	378,437	126,146	0,000	126,146	63,073	1137,835	305,273	1,80
R20M20	419,760	0,000	139,920	139,920	0,000	1147,344	307,824	0,95	
R20M20C10	379,990	0,000	126,663	126,663	63,332	1142,504	306,526	1,20	

As argamassas autoadensáveis partiram de um traço chamado referência (REF) o qual foi produzido apenas com o cimento Portland como aglomerante. A relação água/finos permaneceu constante para todas as misturas, alterando-se apenas as adições e seus teores de substituição ao cimento Portland.

Os percentuais de adições que substituíram parcialmente o cimento foi escolhido de forma a se ter 40% ou 50% de substituição.

Quando se usou uma única adição, o percentual de substituição do cimento foi de 40%. Quando foram usadas duas adições na mesma mistura, o percentual de cada uma foi de 20%.

Com a substituição de finos percebe-se uma redução no consumo de cimento Portland, porém um aumento significativo na quantidade do aditivo superplastificante, pelo fato que às partículas das adições minerais têm-se uma maior porosidade e área superficial, havendo maior demanda de água.

Le, Sheen e Lam (2018) verificaram que as partículas de SCBA tem formato irregular e alta porosidade, absorvendo água da mistura e diminuindo a trabalhabilidade do concreto, necessitando de mais superplastificante para manter um nível ideal de trabalhabilidade em relação a mistura referência.

4.2.2 Teor de Ar Incorporado

O teor de ar incorporado das diferentes misturas consta na Figura 4.12.

O teor de ar incorporado à argamassa interfere na absorção capilar, que diminui com a presença de bolhas que interrompem a passagem de líquido pelos canais capilares quando o concreto ou a argamassa estão no estado endurecido. (RAMACHANDRAN,1984).

Verificou-se que o maior valor do teor de ar incorporado ocorreu nos traços com maiores quantidades de aditivo, pois ele favorece à formação de bolhas de ar durante o processo de mistura.

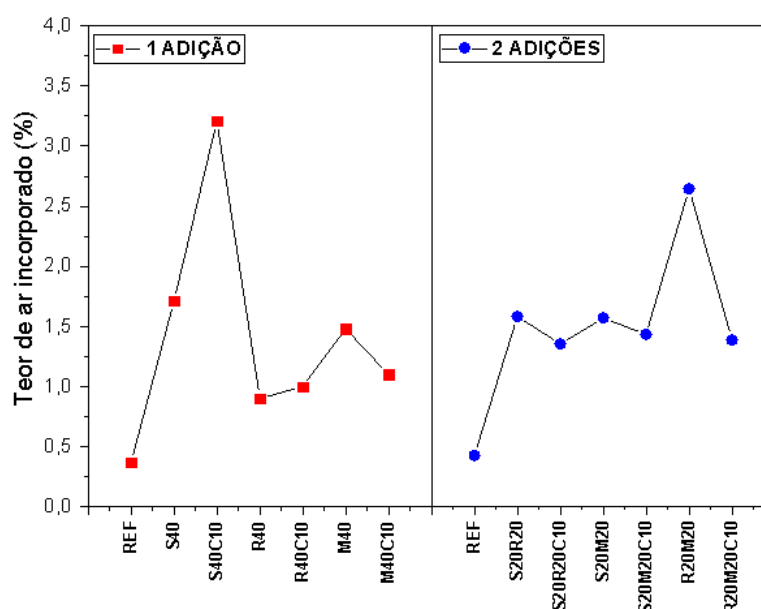


Figura 4.12 – Teor de Ar Incorporado

4.2.3 Índice de Consistência x Teor de Aditivo

O Índice de consistência das argamassas está exposto nas Figuras 4.13 e 4.14.

Observa-se no gráfico que em todas as misturas a consistência ficou dentro da faixa esperada pela EFNARC (2005), diâmetro entre 300mm $\pm$ 50mm.

O maior teor de aditivo exigido foi nas misturas com SCBA que é justamente o material de maior área superficial.

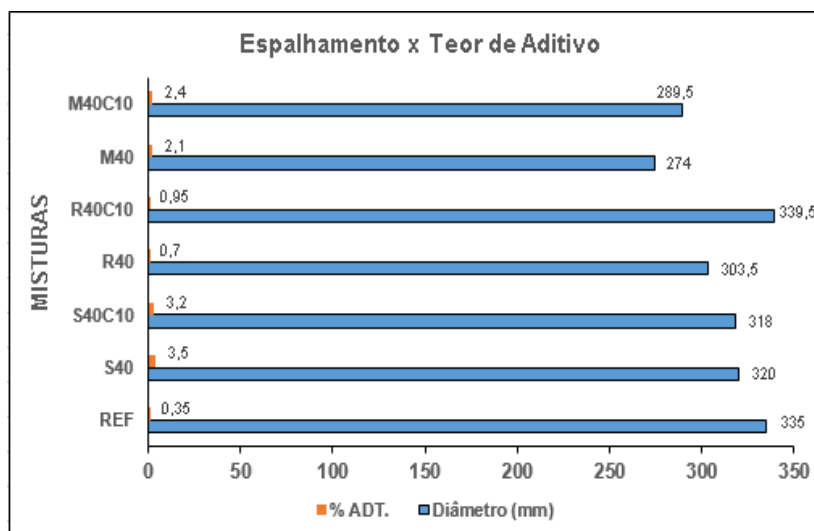


Figura 4.13 – Consistência x Teor de Aditivo das Misturas Unárias

A influência da cal é pequena, e quando há, ocorre em geral aumentando um pouco a necessidade de aditivo, isto porque ela mesma, na prática é usada para dar plasticidade às argamassas.

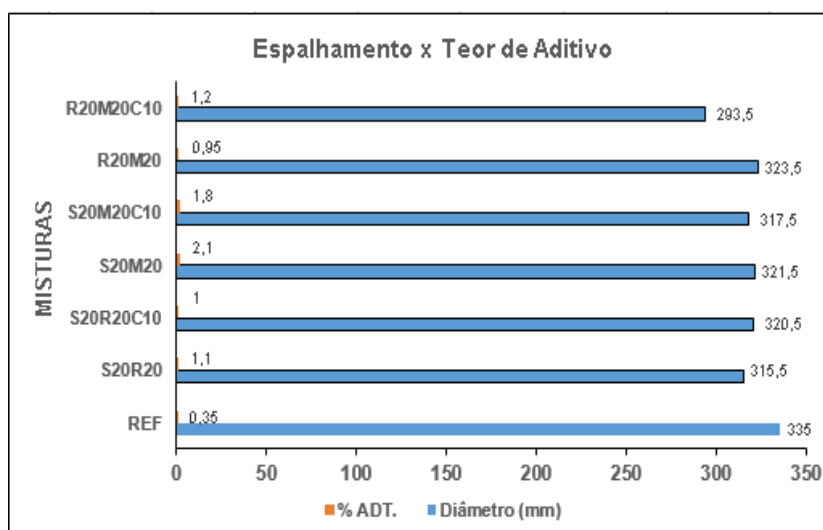


Figura 4.14 – Consistência x Teor de Aditivo das Misturas Binárias

Nas Figuras 4.13 e 4.14, observa-se que há aumento na quantidade de aditivo com o uso das adições minerais, visto que as adições possuem partículas mais finas em comparação ao cimento. As misturas com adição aumentam a demanda por

superplastificante devido a maior área superficial e rugosidade das suas partículas. A RHA e o MK têm áreas superficiais bem maiores que o cimento utilizado.

Quando se comparam as misturas com 40% de adição, observa-se que a SCBA tem um maior consumo do aditivo em relação a RHA, fato que ocorre devido ao SCBA ter maior área superficial, indicado no BET.

Le e Ludwig (2016) afirmaram que a substituição parcial do cimento por adições com maior área superficial promovem um aumento da superfície absorvente do superplastificante, elevando o seu teor e o ponto de saturação do aditivo.

Chusilp, Jaturapitakkul e Kiattikomol (2009) alegaram ser necessário maior dosagem de superplastificante para misturas de concreto com SCBA quando comparado ao concreto referência, para manter o valor de espalhamento, confirmando a diminuição da fluidez.

A adição de MK e RHA afetou a trabalhabilidade, mas não significativamente. Foi observado um pequeno aumento na demanda de água com a adição de MK e RHA. Isso pode ser devido ao pequeno tamanho das partículas do MK à medida que substituem o cimento, o que leva a áreas de superfície mais altas.

4.3 Comportamento das Argamassas no Estado Endurecido

Neste item serão apresentados os resultados dos ensaios das argamassas no seu estado endurecido, obtendo-se suas propriedades físicas e seus comportamentos em relação a parâmetros relacionados à durabilidade, buscando-se valores de resistência para serem utilizadas em concretos autoadensáveis.

4.3.1 Resistência à Compressão

As figuras 4.15 e 4.16 mostram a resistência à compressão dos traços de argamassas autoadensáveis aos 3, 7, 28 e 70 dias. O valor final da resistência à compressão é a média da resistência de 3 (três) corpos de prova cilíndricos (5cm x10cm), mostrando-se também o desvio padrão amostral em cada traço.

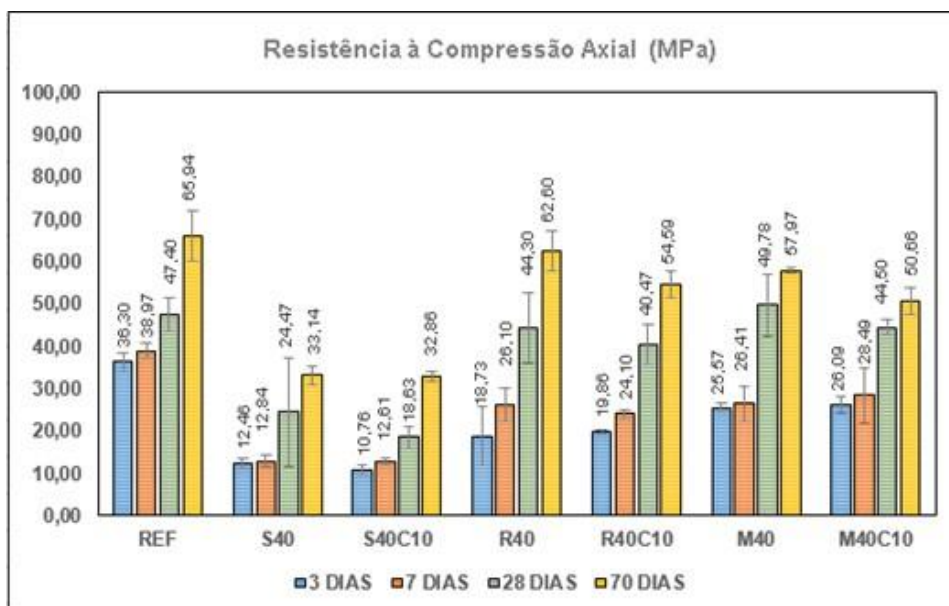


Figura 4.15 – Resistência à Compressão Axial com a Idade das Misturas Unárias

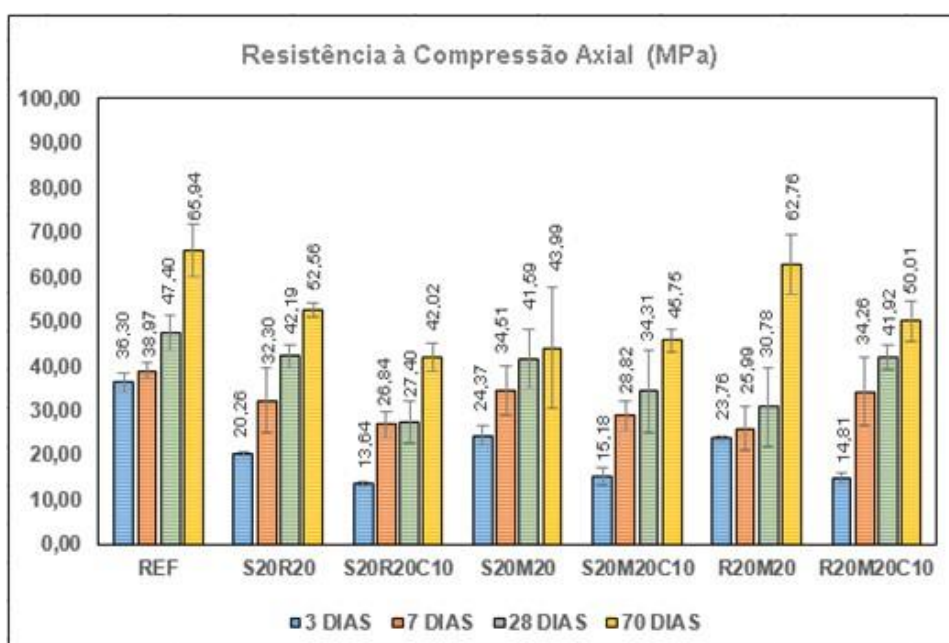


Figura 4.16 – Resistência à Compressão Axial com a Idade das Misturas Binárias

Nos gráficos de resistência a compressão das argamassas, com a idade, Figuras 4.15 e 4.16, observa-se que:

- A resistência cresce com a idade dos corpos de prova, como era de se esperar;
- Aos três dias, as resistências das misturas com adições são bem inferiores à da mistura referência, fato também já esperado. Com o passar do tempo essa diferença

vai diminuindo, chegando quase a igualar seus valores aos 70 dias na mistura R40 e na mistura S20M20;

- As misturas binárias, em geral, conduziram a maiores valores de resistência à compressão, podendo o fator de empacotamento de partículas ter atuado favoravelmente;
- A incorporação de cal interferiu pouco na resistência à compressão;
- As misturas de desempenho mais fraco foram as que tinham SCBA como única pozolana, sem e com a presença da cal na mistura, o que já era de se esperar, considerando-se seu baixo índice de atividade pozolânica;
- Aos 70 dias, quando isoladamente, as cinzas da casca de arroz e o metacaulim tiveram muito bom desempenho. Os dois juntos, conduziram a uma resistência ligeiramente maior, quase igual à da referência.

Le e Ludwig (2016) verificaram que aos 7 dias a mistura referência apresentou resistência superior aos outros traços. Isso acontece porque as adições necessitam da formação do hidróxido de cálcio, ao passar dos dias, proveniente das reações de hidratação do cimento, para dar início à reação pozolânica, através da formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados.

Safiuddin, West e Soudki (2010), afirmaram que a adição de RHA aumentou a resistência à compressão dos seus concretos nas idades de 7, 28 e 56 dias.

O uso de metacaulim (KANNAN e GANESAN, 2014; KAVITHA *et al.*, 2015) e da SCBA (SAFIUDDIN; WEST, SOUDKI, 2010; CHOPRA, SIDDIQUE; KUNAL, 2015) mostram que a utilização desses materiais como substitutos parciais do cimento em até 40% aumentam o valor da resistência à compressão quando comparados com a mistura referência.

Observando o efeito da cal hidratada, pode-se dizer que ela não foi relevante para a maioria das misturas, independentemente da idade analisada, mesmo aos 70 dias. O resultado não foi o esperado, pois pensava-se ter um aumento nos valores da resistência com a adição da cal devido a sua reação com as adições minerais. No entanto, tem que ser considerado que quando se colocou cal, reduziu-se mais 10% do cimento. Talvez a quantidade de cal nas misturas não tenha sido suficiente para incrementar as reações pozolânicas.

A Tabela 4.7 mostra o percentual no ganho da resistência com o passar dos dias, percebe-se que esses valores foram mais relevantes nas misturas com adições minerais. É visível que entre os 3 dias e os 70 dias, as adições promoveram um maior ganho de resistência, fato já comprovado na literatura.

Tabela 4.7 – Percentual de Crescimento da Resistência à Compressão por Idade

Traços	Crescimento da Resistência			
	De 3 para 7 dias (%)	De 7 para 28 dias (%)	De 28 para 70 dias (%)	De 3 para 70 dias (%)
REF	107,36	121,64	139,11	181,67
S40	103,05	190,60	135,45	266,04
S40C10	117,20	147,78	176,38	305,48
R40	139,37	169,73	141,31	334,28
R40C10	121,33	167,94	134,88	274,83
M40	103,27	188,53	116,44	226,71
M40C10	109,20	156,23	113,83	194,20
S20R20	159,38	130,62	124,58	259,37
S20R20C10	196,80	102,10	153,36	308,14
S20M20	141,60	120,49	105,77	180,47
S20M20C10	189,81	119,05	133,34	301,32
R20M20	109,40	118,44	203,89	264,19
R20M20C10	231,30	122,35	119,31	337,62

4.4 Indicativos de Durabilidade

4.4.1 Absorção de Água por Capilaridade

As Figuras 4.17 e 4.18 apresentam os gráficos da absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo.

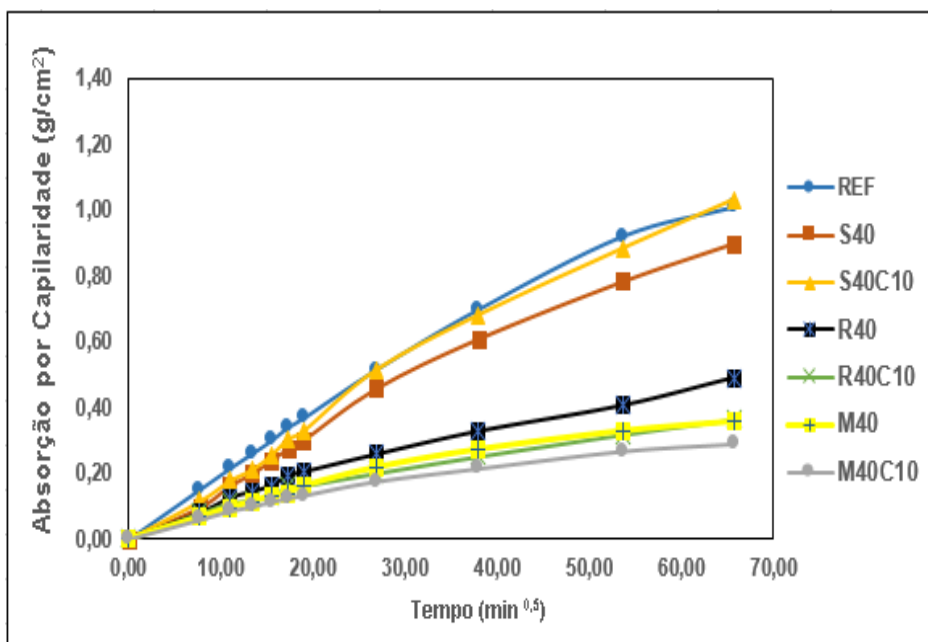


Figura 4.17 – Absorção Capilar com a Idade das Misturas com uma Pozolana

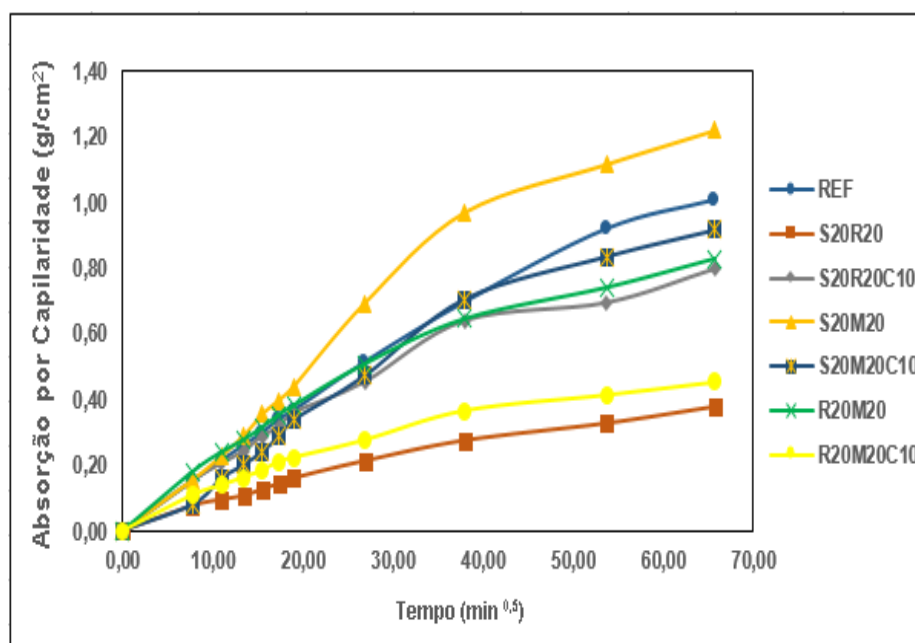


Figura 4.18 – Absorção Capilar com a Idade das Misturas Binárias

Este ensaio é um parâmetro que está ligado à durabilidade de uma determinada composição, isto porque, quanto mais baixos forem os valores da absorção, maior será a dificuldade de penetração de agentes agressivos (Campos, 2012).

Observa-se que, aos 28 dias, todas as argamassas com adições apresentaram absorção de água por capilaridade consideravelmente menor que o REF, com exceção da mistura S40C10 e S20M20.

Na Tabela 4.8 tem-se uma maneira de se avaliar a quantidade de água que penetrou nos corpos de prova. Nela está indicado o acréscimo de peso antes do ensaio e ao final dele.

Tabela 4.8 – Acréscimo de peso dos corpos de prova submetidos à absorção capilar.

Misturas	Acréscimo de Peso (%)
REF	6,55
S40	6,43
S40C10	7,34
R40	3,21
R40C10	2,37
M40	2,32
M40C10	1,88
S20R20	2,56
S20R20C10	5,52
S20M20	8,37
S20M20C10	6,35
R20M20	5,67
R20M20C10	2,94

Na Tabela 4.8 nota-se que, excetuando-se as misturas com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e cal, e esse material com o metacaulim, todas as demais reduziram, algumas de forma significativa, a absorção capilar. Isto quer dizer que se tem uma melhoria na estrutura de poros do material, apesar de não se ter verificado ganho de resistência à compressão.

A mistura de melhor desempenho, quanto a absorção capilar, foi a mistura com 40% de metacaulim e 10% de cal (M40C10), que apresentam apenas 28,7% da absorção de água da mistura referência.

A absorção de água por capilaridade está relacionada com a porosidade da matriz cimentícia, principalmente com os poros capilares (PERLOT; ROUGEAU; DEHAUDT, 2013) e sua interconexão. Assim, pode-se dizer que as divergências entre os resultados da resistência à compressão e absorção por capilaridade estão relacionadas ao tamanho dos poros das matrizes cimentícias bem como a ligação entre eles.

O metacaulim foi mais eficiente no refinamento da estrutura porosa em relação a pozolana da casca do arroz, pois, segundo Kannan e Ganesan (2014), o metacaulim possui elevada reatividade e produz C-S-H. No caso foi a pozolana que apresentou maior índice de atividade, o que levou à redução do tamanho dos poros.

Gill e Siddique (2018) em seus concretos com metacaulim e cinza da casca de arroz, acharam redução na absorção capilar em relação a mistura referência.

Safiuddin, West e Soudki (2010) observaram que a absorção de água dos concretos diminuiu com um maior teor de RHA. O valor mais baixo de absorção de água foi atingido quando usado 30% de substituição de RHA.

Diniz (2018), trabalhando com concretos auto-adensáveis também verificou que a introdução de cal reduziu a taxa de absorção. Segundo ele, isso se deve a sua granulometria fina e melhor formação dos produtos hidratados que promovem um melhor empacotamento.

4.4.2 Profundidade da Penetração de Carbonatação

As Figuras 4.19 e 4.20 mostram os resultados da profundidade de penetração de carbonatação das misturas em função do tempo de exposição ao CO_2 , com suas respectivas idades, indicando-se também o desvio padrão.

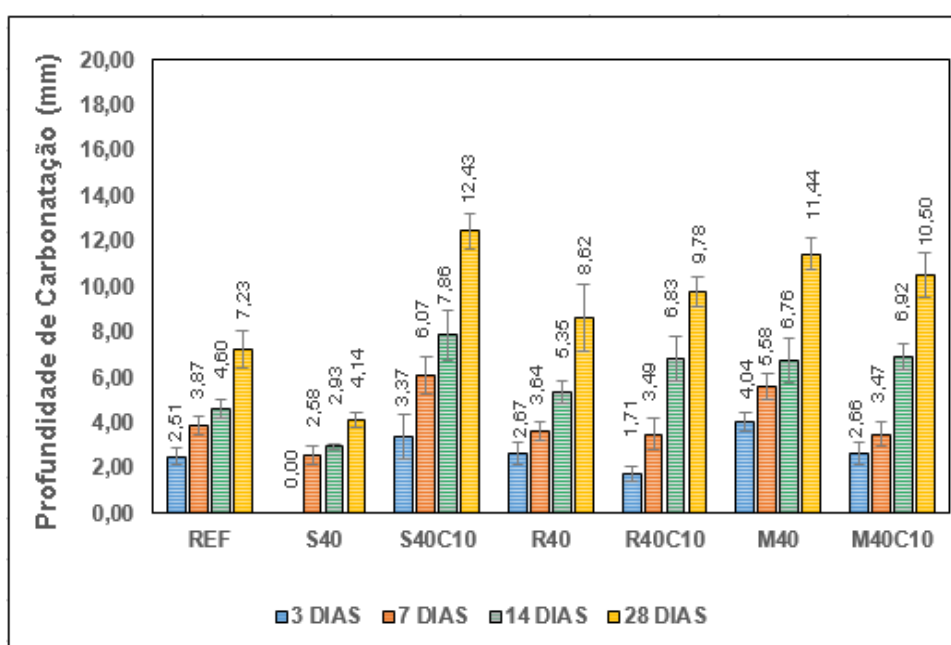


Figura 4.19 – Carbonatação com a Idade das Misturas com uma Pozolana

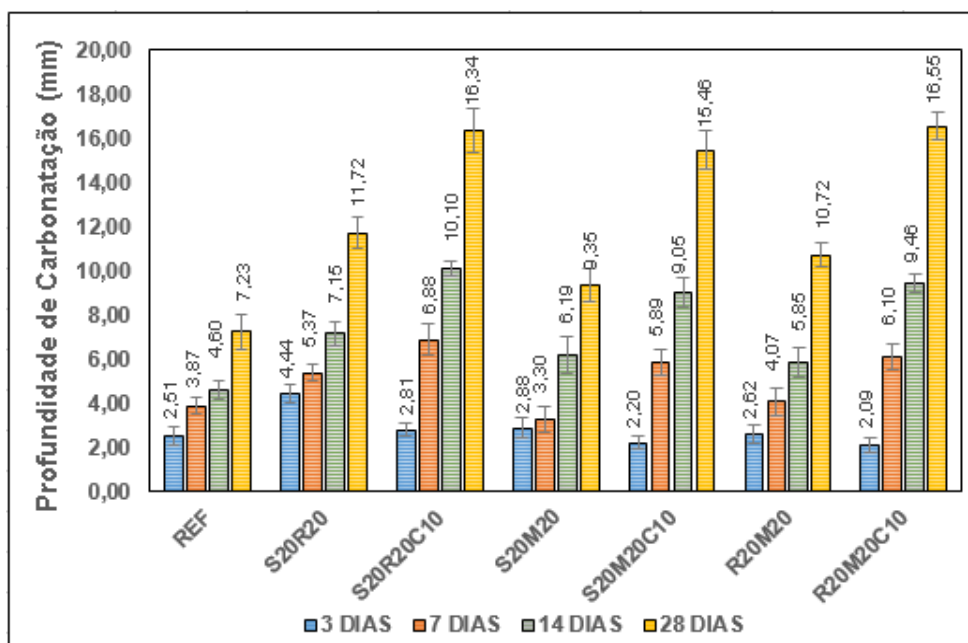


Figura 4.20 – Carbonatação com a Idade das Misturas Binárias

Inicialmente verificou-se que todas as argamassas, antes de penetração na câmara de carbonatação acelerada, não apresentaram nenhuma carbonatação. A primeira verificação da profundidade de carbonatação foi aos 3 dias de exposição na câmara, a 10% de CO₂.

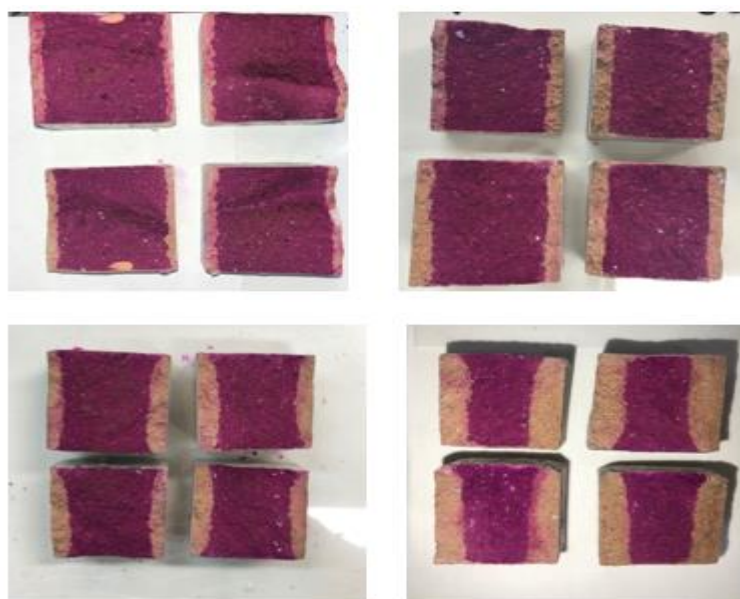


Figura 4.21 – Penetração de Carbonatação da Mistura M40 (3, 7, 14 e 28 dias respectivamente).

Na Figura 4.21 tem-se um exemplo mostrado da penetração da frente de carbonatação na mistura M40. As demais imagens das aferições da profundidade de penetração de carbonatação encontram-se nos anexos.

Em relação aos resultados expostos nas Figuras 4.19 e 4.20, a mistura referência foi a que apresentou menor profundidade de carbonatação, durante exposição na câmara de carbonatação acelerada, e as misturas binárias, tendem a apresentar maiores profundidades. Isto ocorre porque um maior teor de cimento resulta na formação de mais Portlandita, responsável pelo alto pH.

Nota-se que as misturas que incorporam a cal, apresentaram maior profundidade de carbonatação. É provável que tenha ocorrido aumento da porosidade interna pelo fato de se ter retirado mais 10% do cimento e substituído pela cal.

Corroborando a isto, Silva e Andrade (2017) afirmam que o aumento do nível de adições minerais pozolânicas, a carbonatação do concreto aumenta. Este fenômeno é principalmente devido à redução do teor de álcalis nos materiais cimentícios e porque o C-S-H da reação pozolânica absorve mais íons alcalinos, diminuindo assim o nível de pH no concreto. Isso não é regra geral, depende também do impacto na redução da permeabilidade ao gás carbônico.

A Tabela 4.9 mostra o aumento da profundidade de carbonatação, em %, com o decorrer dos dias de exposição na câmara de carbonatação acelerada.

Tabela 4.9 – Percentual de Aumento da Profundidade de Carbonatação

Misturas	Aumento da Profundidade de Carbonatação (%)			
	De 3 para 7 dias (%)	De 7 para 14 dias (%)	De 14 para 28 dias (%)	De 3 para 28 dias (%)
REF	54,18	18,86	57,17	188,05
S40	258,00	13,57	41,25	400,00
S40C10	79,96	29,63	58,04	268,67
R40	36,49	46,86	61,22	223,15
R40C10	104,65	95,35	43,33	473,02
M40	38,12	21,15	69,23	183,17
M40C10	30,72	99,15	51,80	295,20
S20R20	20,92	33,26	63,92	164,13
S20R20C10	145,03	46,94	61,73	482,29
S20M20	14,54	87,72	50,99	224,65
S20M20C10	167,95	53,69	70,80	603,36
R20M20	54,94	43,85	83,34	308,64
R20M20C10	191,96	54,95	74,96	691,48

Chatveera e Lertwattanak (2011) também observaram em seu estudo que os traços com adições minerais apresentaram maiores carbonatação, pois a incorporação de uma adição mineral pozolânica diminuiu a quantidade hidróxido de cálcio livre.

Samimi, Kamali-Bernard e Maghsoudi (2018) afirmaram que o processo de carbonatação tende a se desenvolver mais rapidamente em concretos contendo adições minerais.

As misturas binárias apresentaram maior penetração de CO₂. As binárias com SCBA tiveram melhor desempenho, sendo o melhor deles a mistura de SCBA com MK.

Vale ressaltar que, todas as misturas de argamassas, foram mensuradas com as mesmas datas de exposição na câmara de carbonatação.

Um modelo para prever o avanço da frente de carbonatação no concreto é expresso pela equação:

$$X = K\sqrt{t}$$

Onde:

X = Profundidade de carbonatação (mm);

K = Coeficiente de carbonatação (mm/ano^{1/2});

t = Tempo em anos, correspondente à profundidade X.

Com base nesta expressão pode-se estimar o valor de K para cada argamassa, a partir dos dados experimentais.

Considerando a argamassas de referência e obtendo-se K a partir do valor experimental aos 28 dias:

$$K = X/\sqrt{t} = 7,23/\sqrt{28/365} = 26,1 \text{ mm/ano}^{1/2}$$

Então, a profundidade de carbonatação, teoricamente, pode ser determinado por:

$$X = 26,1\sqrt{t}$$

Pode-se então, organizar a Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Profundidade de Carbonatação Teórico e Experimental da REF

t (dias)	X (Teórico)	X (Experimental)	X (Teórico)/X (Experimental)
3	2,36	2,51	0,94
7	3,61	3,87	0,93
14	5,11	4,60	1,11
28	7,23	7,23	1,00

Observa-se que esse modelo dá apenas uma prévia da profundidade de carbonatação, para esse caso de concentração de 10% de CO₂.

Considerando-se todas as misturas de argamassas, pode-se calcular o coeficiente K a partir do valor experimental aos 28 dias. Os resultados constam na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Coeficiente de Carbonatação para as Diferentes Misturas

Mistura	K (mm/ano ^{1/2})	K/K _{ref}
REF	26,10	1,00
S40	15,00	0,57
S40C10	44,80	1,71
R40	31,10	1,20
R40C10	35,30	1,30
M40	41,30	1,50
M40C10	37,90	1,40
S20R20	42,30	1,62
S20R20C10	58,90	2,25
S20M20	33,80	1,29
S20M20C10	55,80	2,13
R20M20	38,70	1,48
R20M20C10	59,70	2,28

Pode-se observar que:

- Com exceção da argamassa S40, todas as demais apresentaram coeficiente de carbonatação superior ao da mistura referência, indo de 1,20 a 2,25 vezes maior;
- Quando há presença de cal na mistura, houve um acréscimo no coeficiente de permeabilidade ao CO₂, com exceção da argamassa com metacaulim;
- Esta última constatação provavelmente se deve à maior quantidade de CH disponível aliada ao alto teor de CO₂ (10%), provocando uma carbonatação mais intensa.

A permeabilidade aos gases é menor que a permeabilidade à água (METHA; MONTEIRO, 2014), daí não se ter uma correlação direta entre a absorção capilar e a espessura de carbonatação.

4.4.3 DRX/TG

Neste item são apresentados os resultados das análises de difração de raios X (DRX) e análise termogravimétrica (TG) realizadas nas argamassas autoadensáveis. Os ensaios foram feitos antes de o material entrar na câmara de carbonatação acelerada (0 dias de carbonatação), quando todas as amostras já tinham 42 dias de idade, e após 70 dias de idade (com 28 dias de carbonatação).

Para realização do ensaio aos 0 dias de carbonatação foi retirada uma pequena quantidade de material da parte central do corpo de prova para realização dos DRX e TG. Para o ensaio aos 28 dias de carbonatação, as amostras foram retiradas da parte carbonatada.

A intenção é verificar o que ocorre na microestrutura, enfatizando-se a presença de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio das argamassas autoadensáveis quando o CO_2 entra em contato com elas.

No ensaio de TG não existe consenso na literatura com referência às temperaturas iniciais e as faixas em que os hidróxido e carbonato de cálcio se decompõem, como se pode ver na Tabela 4.12

Tabela 4.12 – Faixas de temperatura de decomposição dos hidróxidos e carbonato de cálcio

Composição	Faixa de Temperatura (°C)	Composto	Referência
Hidróxido de Cálcio	530-550	Ca(OH)_2	Taylor (1997)
	440-580	Ca(OH)_2	BHATTY;REID (1985);G.Baert et al (2008)
	350-500	Ca(OH)_2	DWECK et al (2000;2008)
Carbonato de Cálcio	750-900	CaCO_3	Ramachandran (1984)
	500-800	CaCO_3	DWECK et al (2000;2008)
	580-1000	CaCO_3	BHATTY;REID (1985)

Visto a falta de consenso da Tabela 4.12, aqui, nos ensaios de TG, foi considerado portlandita o material que se decompõem entre 350°C e 500°C e o carbonato de cálcio

entre 500°C a 800°C como sugerido por DWECK *et al.* (2008). Tendo em vista a indefinição do exato valor das faixas de temperatura, não se fez ajuste da concentração do hidróxido de cálcio obtida pela TG, pois a simples mudança da temperatura de início da decomposição dos produtos citados já mudaria os resultados. Assim, os valores expressos se referem à perda de massa nas faixas de temperatura admitidas acima. Vale lembrar que entre o chamado 0 dia de carbonatação e 28 dias de carbonatação, internamente os silicatos do cimento ainda devem estar produzindo hidróxido de cálcio.

A perda de massa entre os 350°C e 500°C se refere ao carbonato de cálcio, mas certamente também estão envolvidos outros carbonatos, como de sódio e de potássio.

4.4.3.1 Misturas das Argamassas com uma Pozzolana

➤ Argamassa de Referência

Na Figura 4.22, tem-se o DRX da argamassa de referência. Nota-se que apesar dos 28 dias de presença na câmara de carbonatação acelerada o hidróxido de cálcio ainda se faz presente, embora em menor quantidade.

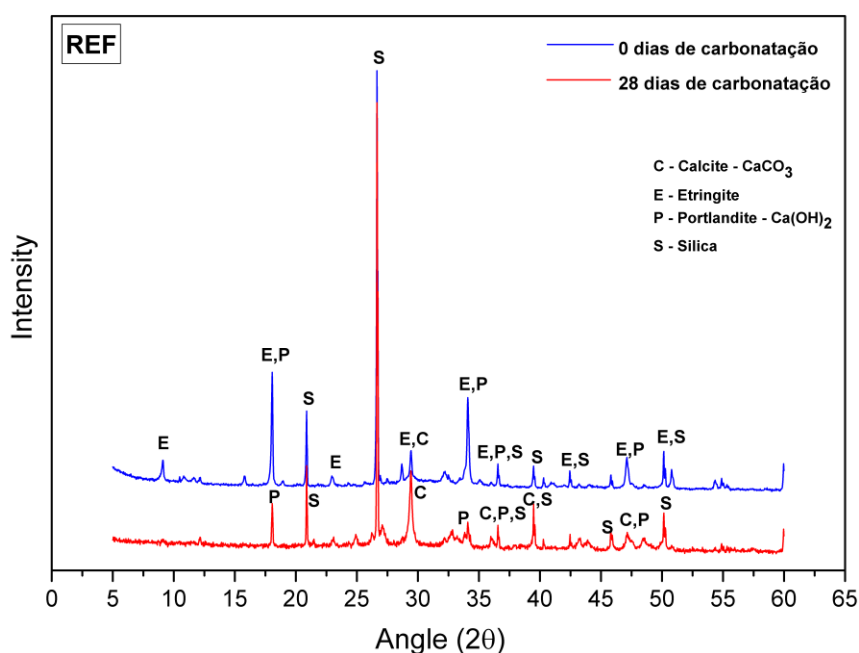


Figura 4.22 – DRX da Mistura Referência

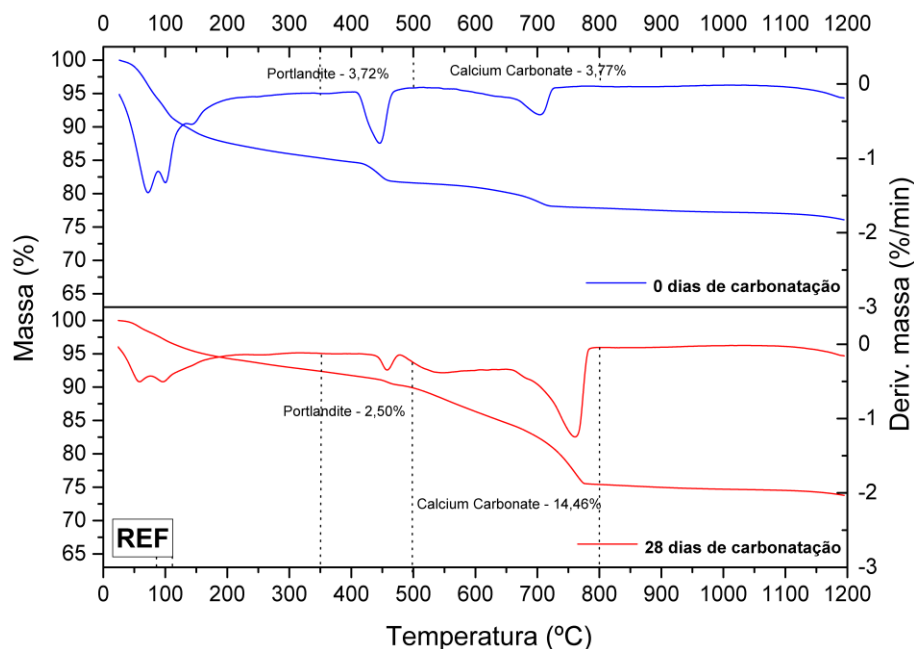


Figura 4.23 – TG da Mistura Referência

Isto se atesta na Figura 4.23, onde se vê que o teor de portlandita caiu para menos de um terço do teor inicial, enquanto o teor de calcita mais que duplicou. Os picos de sílica são devido à presença de areia na mistura.

➤ Argamassas com Cinzas do Bagaço de Cana-de-açúcar

Nas Figuras 4.24 e 4.25 tem o DRX e TG das argamassas com as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar substituindo parcialmente o cimento Portland, sem e com adição de cal, respectivamente.

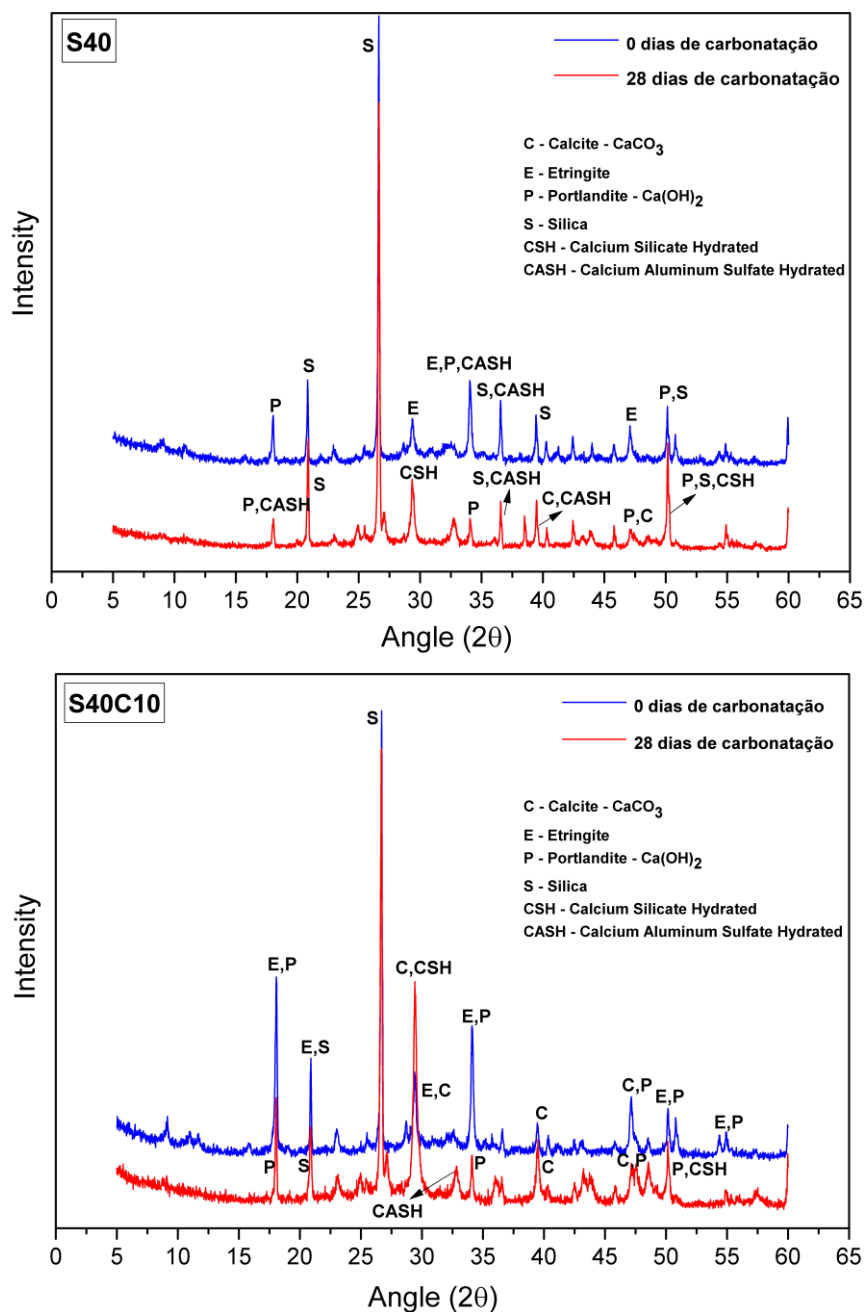


Figura 4.24 – DRX das argamassas com cinzas do bagaço de cana sem e com cal.

Nota-se que apesar dos 42 dias de idade e alto teor de pozolana, o hidróxido de cálcio não foi consumido totalmente, antes de entrar na câmara de carbonatação acelerada, como indicado no gráfico azul superior. A reação pozolânica ocorreu mas não foi suficiente para reagir totalmente com a portlandita.

Quando se usou cal, um maior número de picos de portlandita foi encontrado (gráfico azul). Mesmo após a carbonatação acelerada, esse mineral ainda se fez presente, como pode ser constatado no gráfico da TG, Figura 4.25.

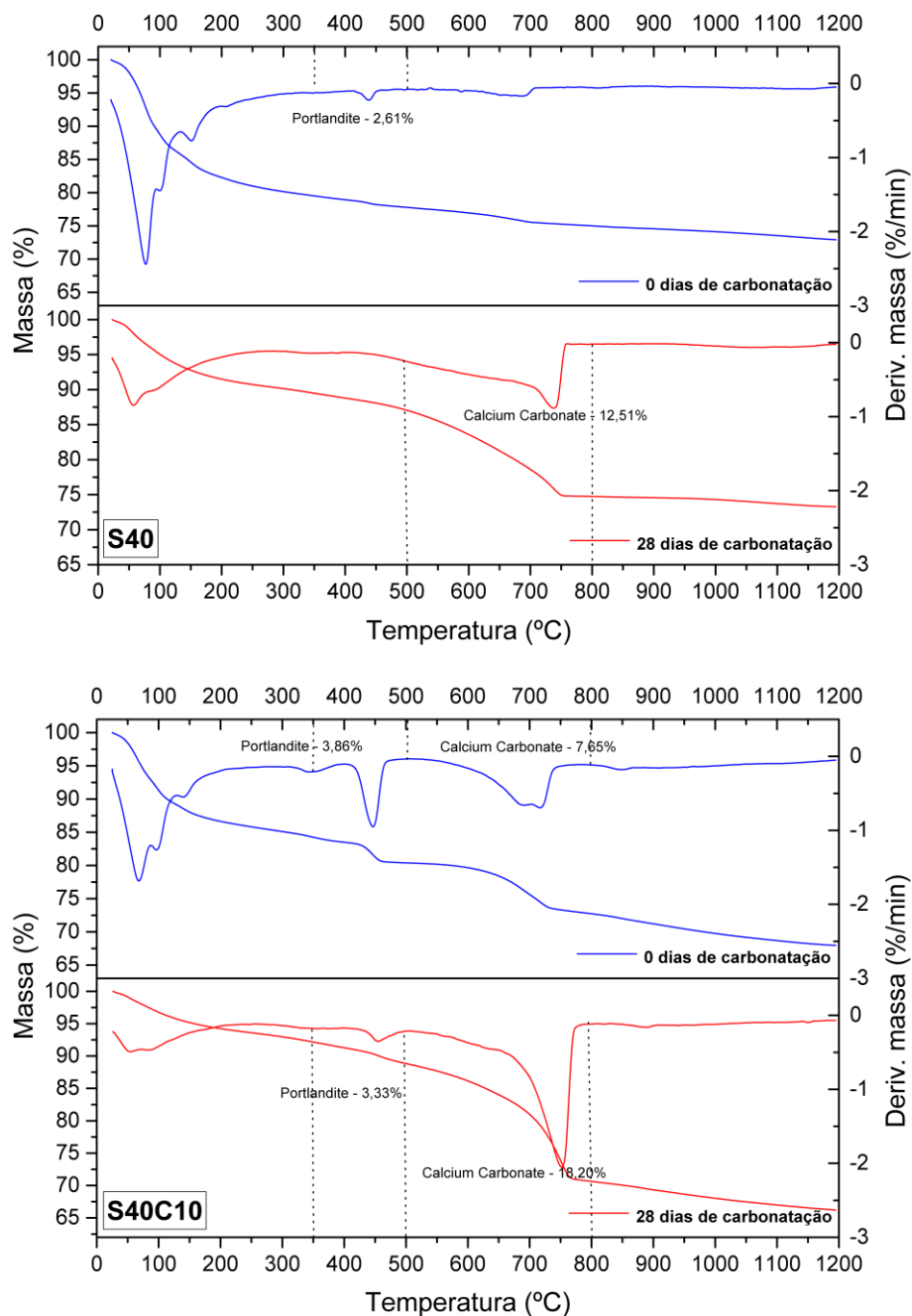


Figura 4.25 – TG das argamassas com cinzas do bagaço de cana sem e com cal.

Então, sem adição de cal o ensaio de TG indica que a portlandita foi totalmente consumida após os 28 dias na câmara de carbonatação acelerada.

Já com a cal incorporada, esse tempo não foi necessário para carbonatar todo o hidróxido de cálcio presente. Nos gráficos em azul a portlandita existe, estando em maior quantidade na argamassa em que foi incorporada cal. No gráfico vermelho superior não se percebeu a existência do hidróxido, apesar de o DRX ter constatado sua presença.

➤ Argamassas com Cinzas da Casca de Arroz

Na Figura 4.26 tem-se agora os DRX das argamassas nas quais se usou cinzas da casca de arroz como pozolana.

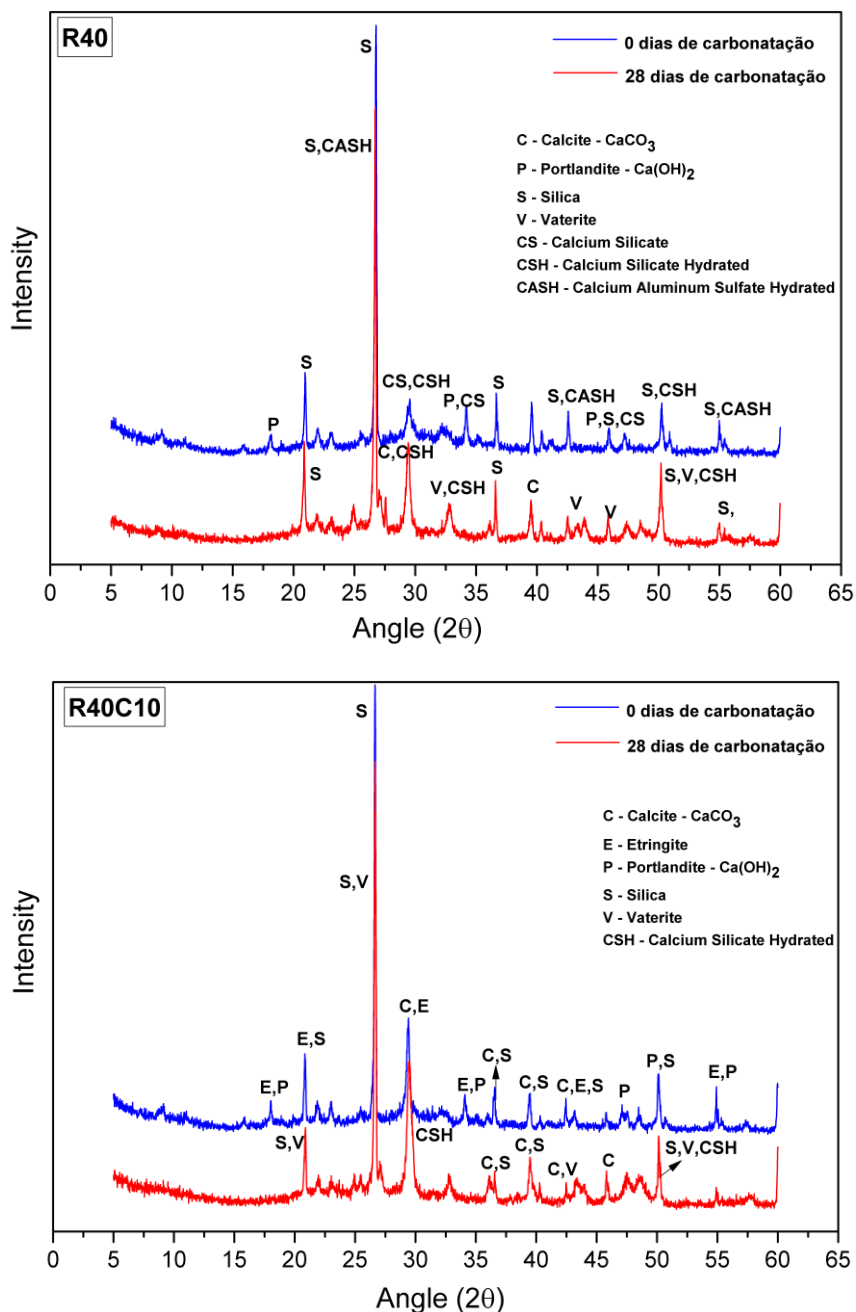


Figura 4.26 – DRX das argamassas com cinzas da casca de arroz sem e com cal.

Percebe-se uma maior eficácia desse material pozolânico, em relação à SCBA. No DRX, após a carbonatação os picos de portlandita já não existem, indicando que houve o seu consumo pelo processo de carbonatação.

Observou-se que a incorporação da cal promove um maior aparecimento da calcita, isso pelo fato de a cal hidratada ser basicamente o hidróxido de cálcio, produto que mais facilmente reage com o CO_2 . Também dá para perceber que a carbonatação ainda está ocorrendo, pois, surgiram picos de Vaterite, que é uma forma de carbonato de cálcio.

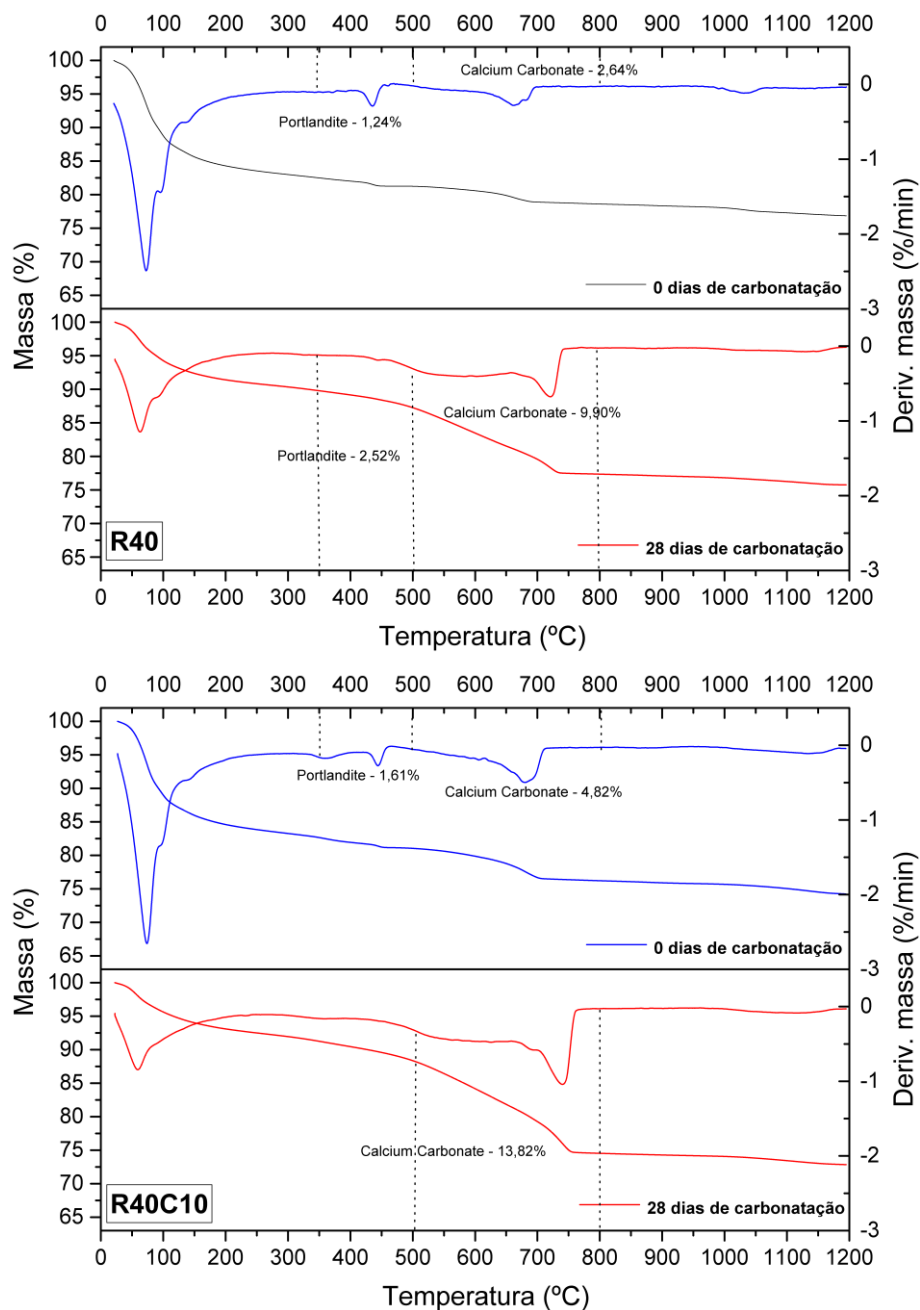


Figura 4.27 – TG das argamassas com cinzas da casca de arroz sem e com cal.

Nas TGs, Figura 4.27, não se detecta portlandita após a permanência da argamassa na câmara de carbonatação acelerada, mesmo com cal incorporada. A quantidade de carbonato de cálcio cresceu na mistura com a presença da cal.

➤ Argamassas com Metacaulim

Na Figura 4.28 podem ser vistos os DRX das argamassas nas quais se usou metacaulim. A Figura 4.29 apresentam-se as TG correspondentes.

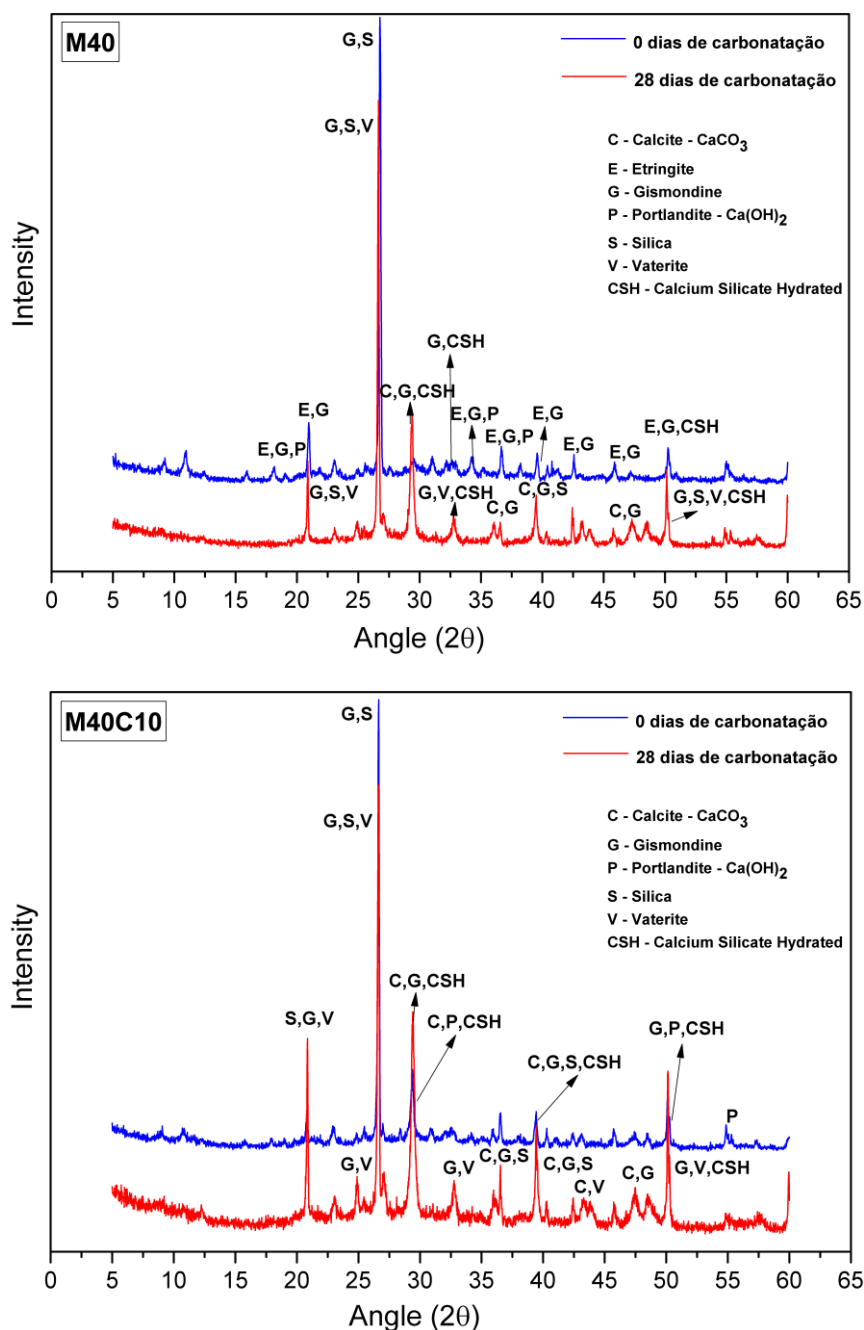


Figura 4.28 – DRX das argamassas com metacaulim sem e com cal.

Os ensaios aqui atestam a melhor qualidade dessa pozolana em relação às cinzas do bagaço de cana-de-açúcar. Antes da carbonatação já era pequeno o teor de hidróxido de cálcio, nas duas argamassas (sem e com cal), sinal de que ele foi consumido pelo metacaulim. Após a carbonatação desapareceram os picos de portlandita no DRX e as TGs indicam também a sua ausência.

No DRX também aparece a formação de novos aluminatos, em decorrência da composição do metacaulim, que tem alto teor de alumina.

A presença da vaterita após a argamassa ser colocada na câmara de carbonatação indica novamente a reação da cal com o CO_2 .

Nos TGs, os picos correspondentes ao carbonato de cálcio são menores que os da referência e o da argamassa com cinzas do bagaço de cana-de-açúcar. Isto indica que de fato o metacaulim reduziu bastante o teor de hidróxido de cálcio presente.

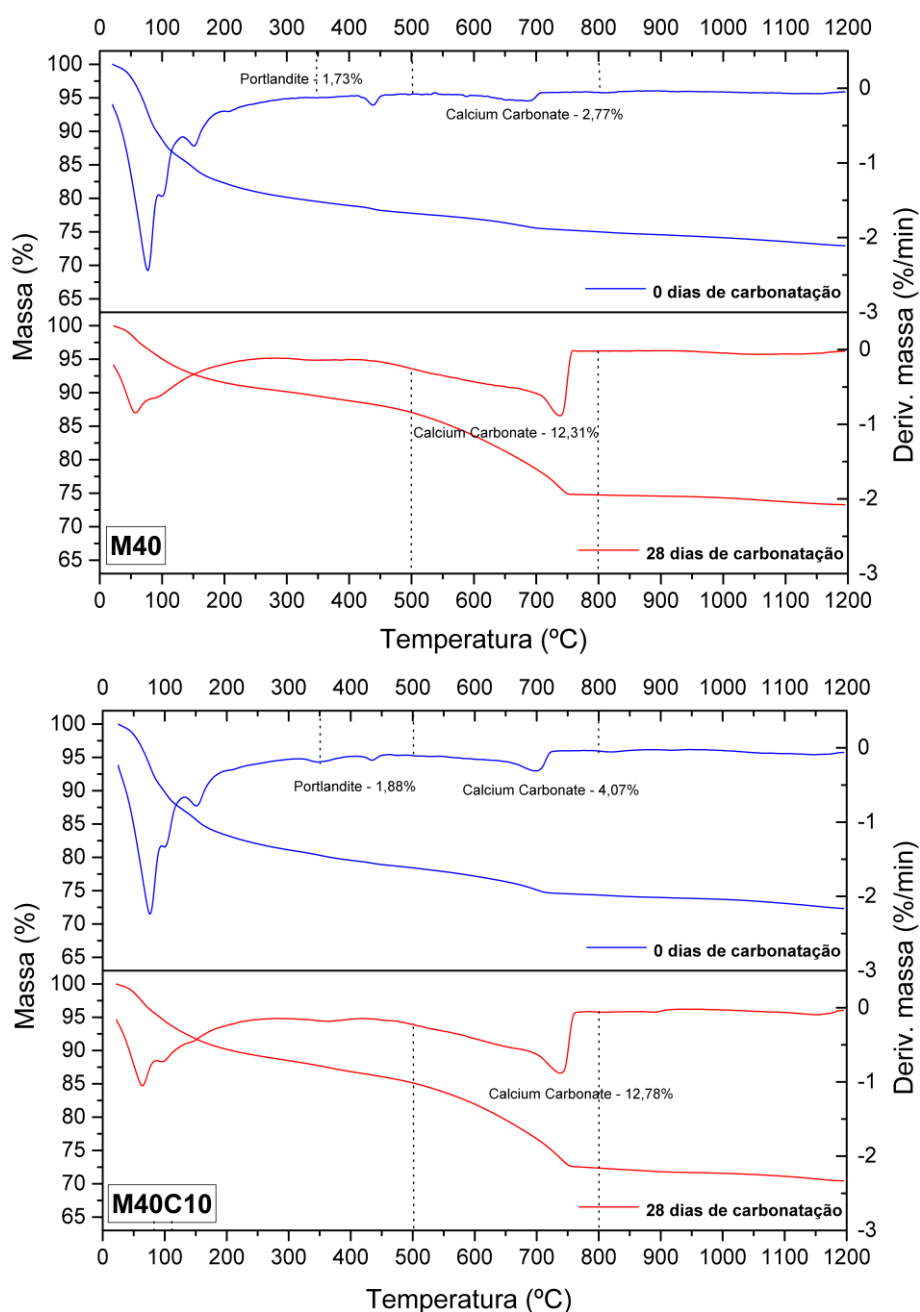


Figura 4.29 – TG das argamassas com Metacaulim sem e com cal

→ Resumo do Desempenho das Argamassas com uma Pozolana

Simplificadamente pode-se concluir que:

A cinza da casca de arroz e o metacaulim tem melhor desempenho como pozolana que a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, com base em:

- Antes da carbonatação as argamassas com as duas primeiras pozolanas já tem um baixo teor de hidróxido de cálcio, mesmo com a incorporação de cal;
- Após a carbonatação elas estão livres de portlandita;
- O teor de carbonato de cálcio é menor nas argamassas com as duas citadas pozolanas que na de referência e na argamassa com cinzas do bagaço de cana-de-açúcar;
- A incorporação de cal nas argamassas com cinzas de casca de arroz e com metacaulim interfere muito pouco no resultado dos ensaios, enquanto se faz sentir fortemente no caso da argamassa com cinzas do bagaço de cana.

4.4.3.2 Misturas Binárias

As argamassas com duas pozolanas, as misturas binárias, tem os resultados apresentados a seguir:

- Argamassas com cinzas do Bagaço de Cana-de-açúcar e cinzas da Casca de Arroz

Nas figuras 4.30 e 4.31 tem-se os DRX e TG das argamassas com cinzas do bagaço de cana e cinzas da casca de arroz com e sem cal, respectivamente.

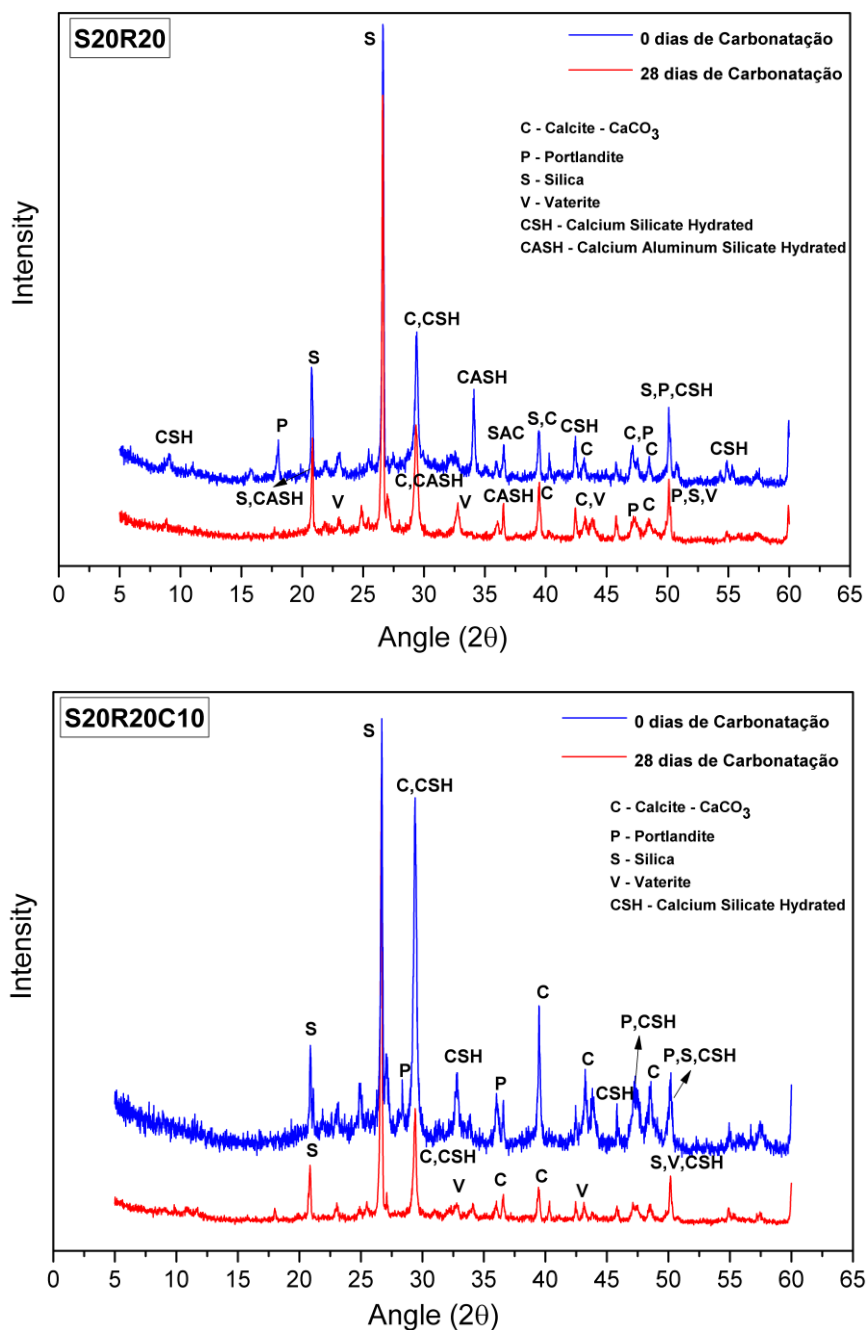


Figura 4.30 – DRX das argamassas com cinzas do bagaço de cana e cinzas da casca de arroz sem e com cal.

Nos DRX vê-se que a portlandita nas duas argamassas (sem e com cal) só foi consumida totalmente após a permanência na câmara de carbonatação acelerada. De fato, nas TG desaparece o pico correspondente àquele material.

Os picos de carbonato de cálcio são significativos, indicando que a reação pozolânica não consegue por si só consumir o hidróxido de cálcio presente.

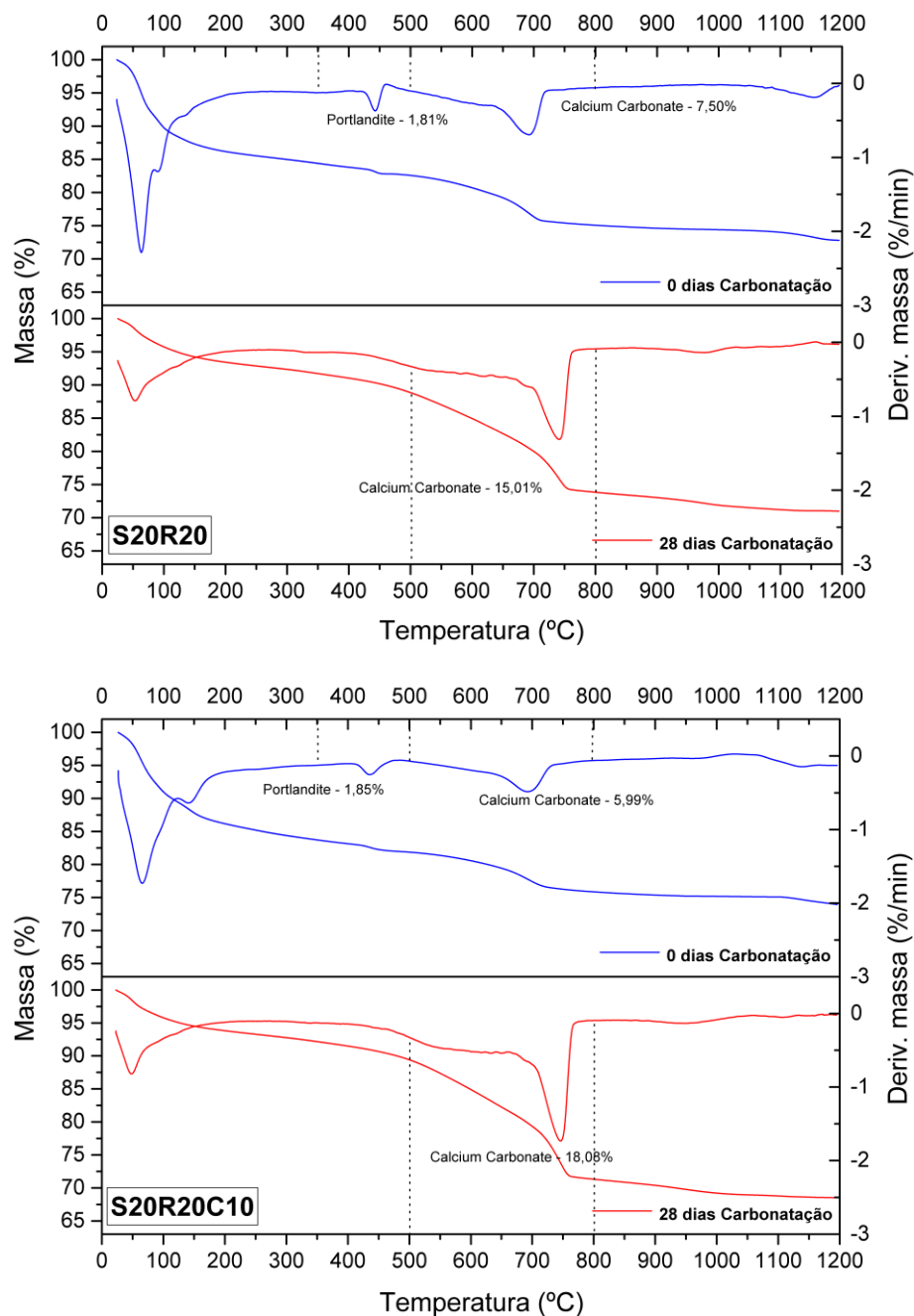


Figura 4.31 – TG das argamassas com cinzas do bagaço de cana e cinzas da casca de arroz sem e com cal.

➤ Argamassas com cinzas do Bagaço de Cana-de-açúcar e Metacaulim

Antes de entrar na câmara de carbonatação acelerada as argamassas sem e com cal apresentaram picos de portlandita no DRX, Figura 4.32. Eles desapareceram após a inserção dos corpos de prova na câmara de carbonatação acelerada.

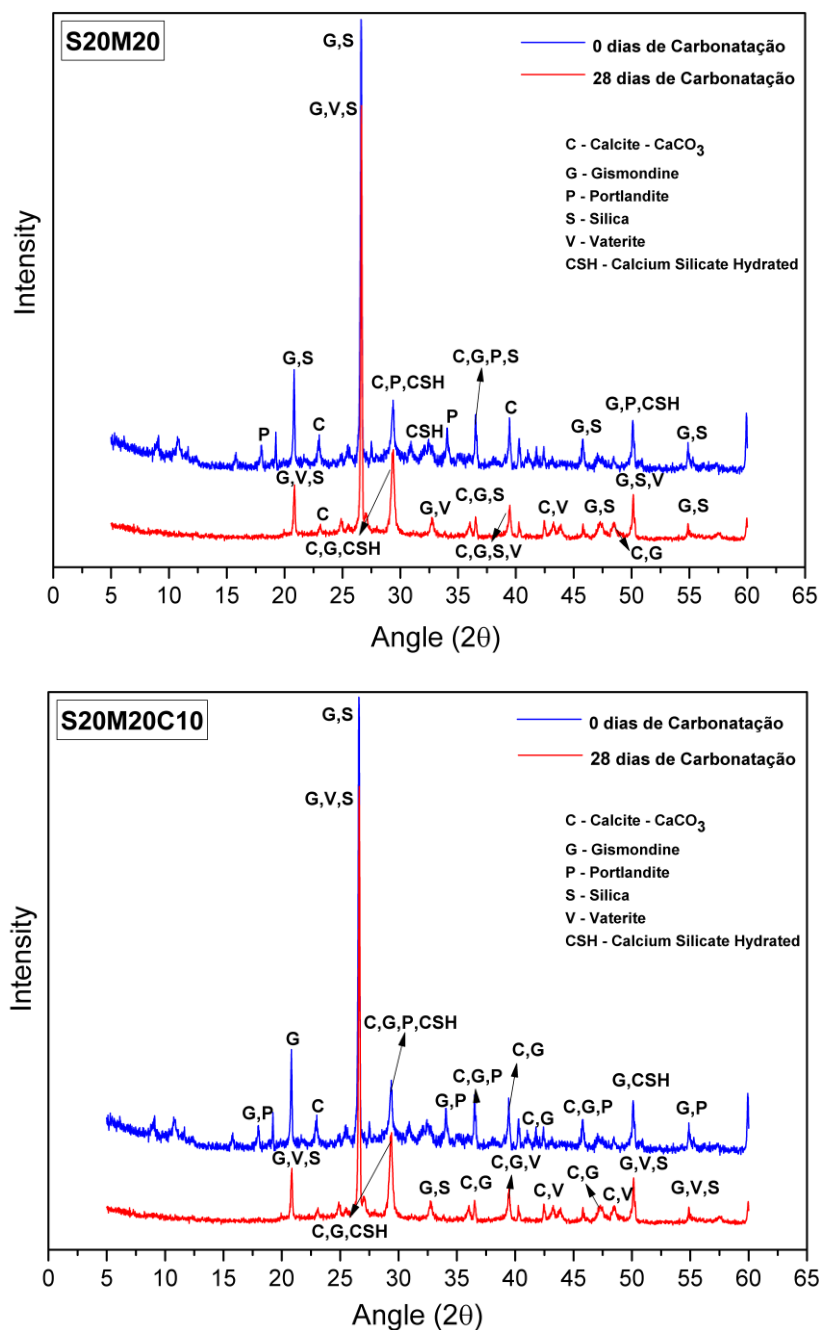


Figura 4.32 – DRX das argamassas com cinzas do bagaço de cana e metacaulim sem e com cal.

O ensaio de TG, Figura 4.33, comprova a ausência de portlandita após a presença dos corpos de prova na citada câmara. Os picos de carbonato de cálcio nesse ensaio aumentaram consideravelmente o que indica que a portlandita está mais reagindo com o CO_2 que sendo consumida pela reação pozolânica. Pode estar acontecendo carbonatação de outros produtos do cimento hidratado.

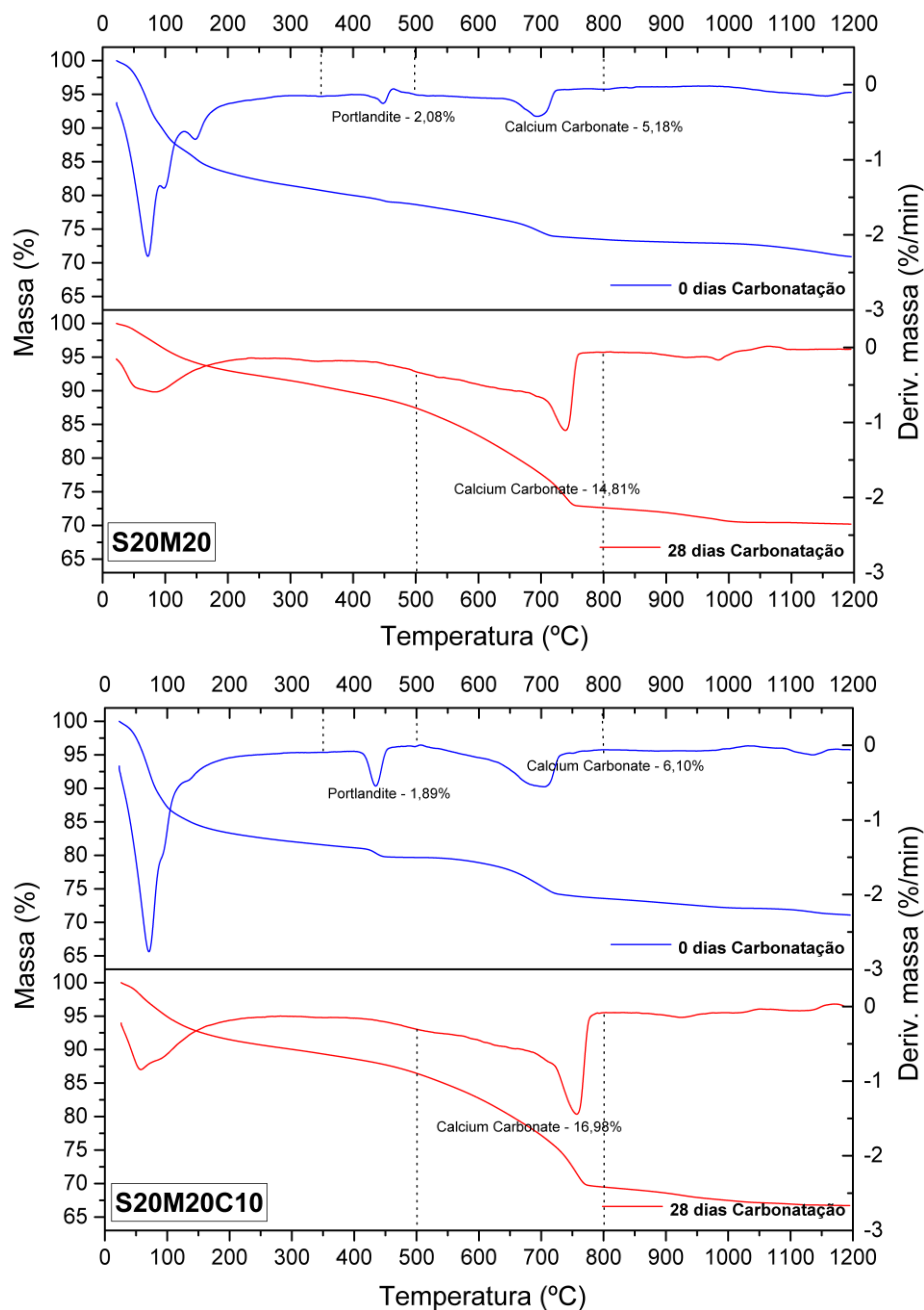


Figura 4.33 – TG das argamassas com cinzas do bagaço de cana e metacaulim sem e com cal.

➤ Argamassas com Cinzas da Casca de Arroz e Metacaulim

Na Figura 4.34 tem-se o DRX e na Figura 4.35 tem-se a TG das argamassas com a mistura das duas pozolanas mais eficazes.

Embora nos ensaios de DRX não tenha sido detectada a portlandita na argamassa com cal incorporado, nos ensaios de TG ela se faz presente em ambos os casos, ainda que em pequena quantidade. A pouca quantidade dela antes de os corpos de

prova irem para a câmara de carbonatação acelerada indica que as reações pozolânicas processaram-se de maneira eficiente.

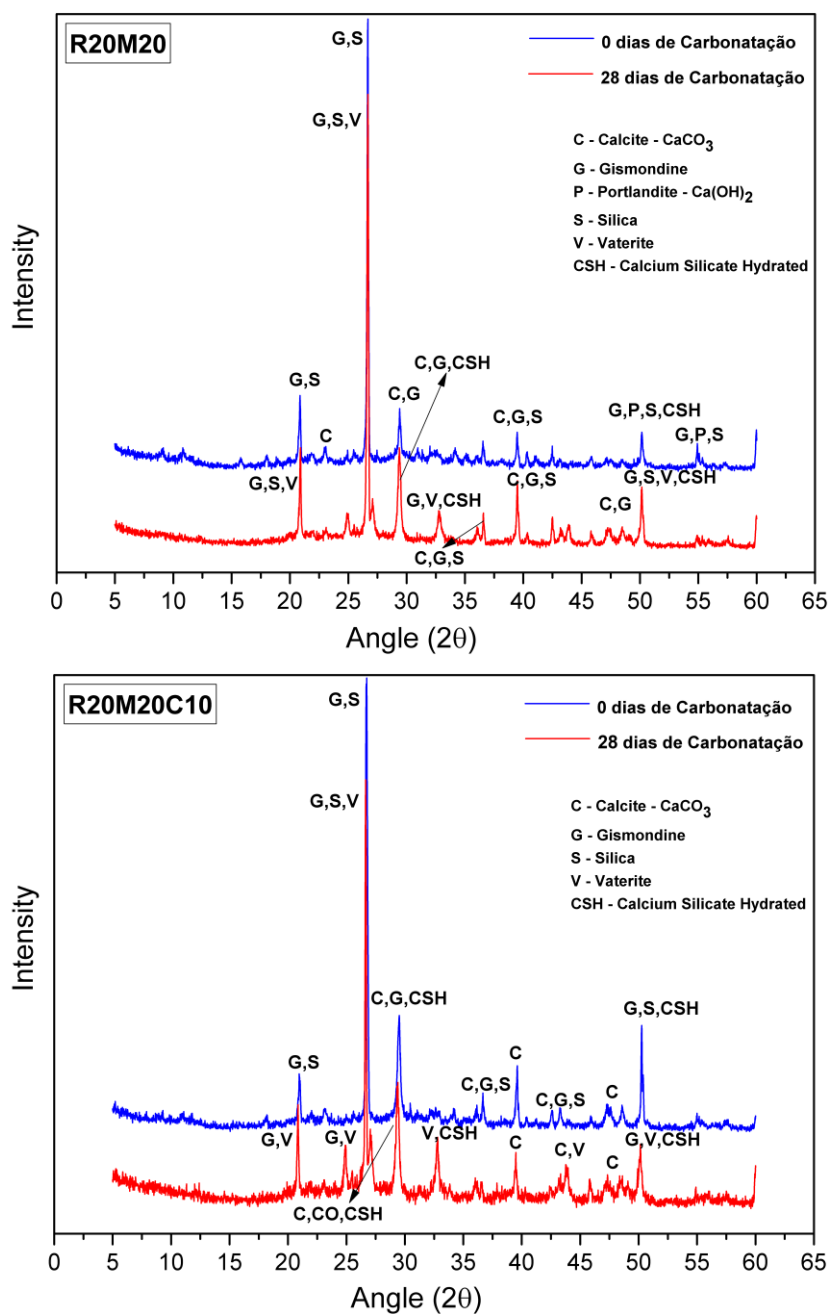


Figura 4.34 – DRX das argamassas com cinzas da casca de arroz e metacaulim sem e com cal.

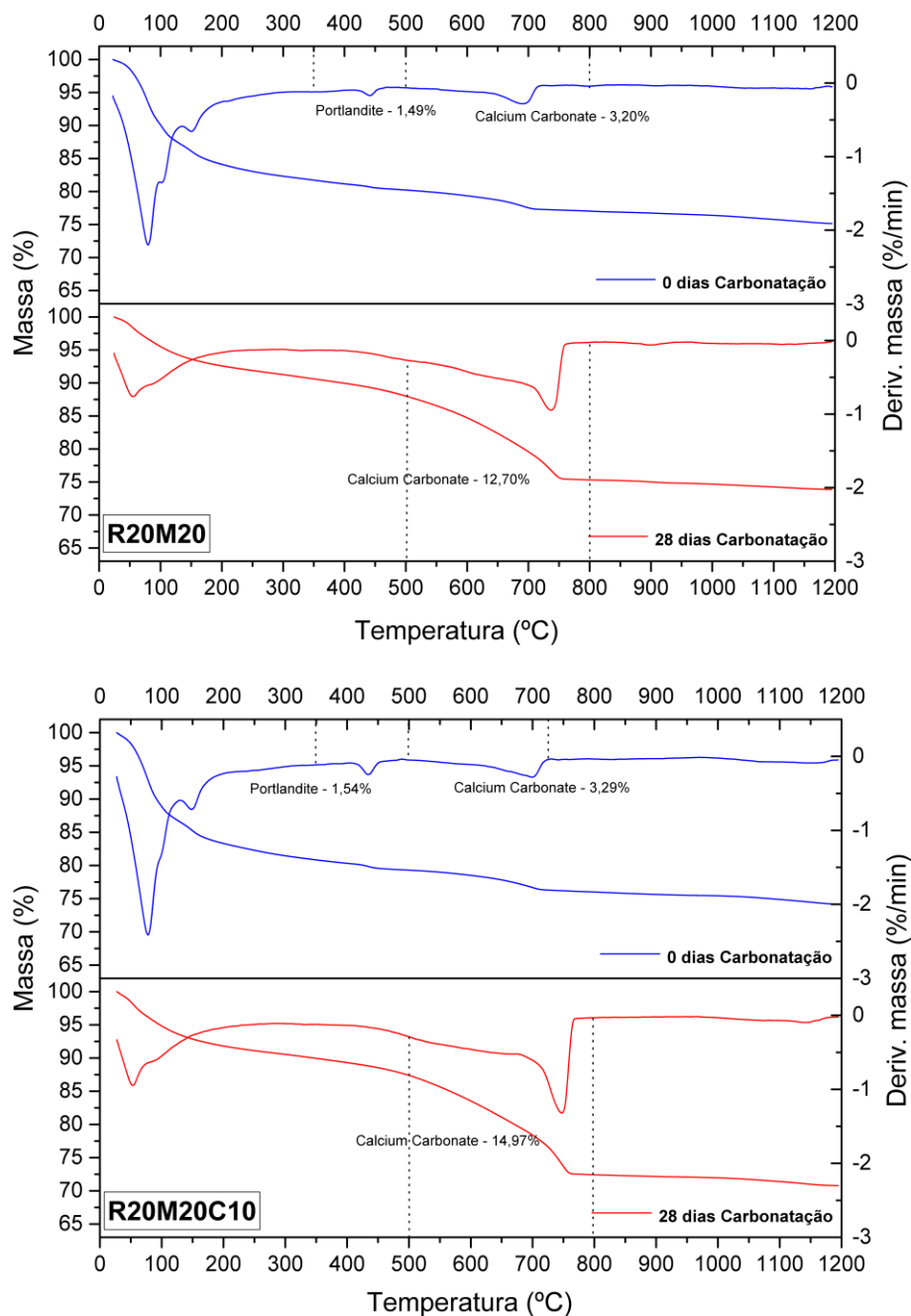


Figura 4.35 – TG das argamassas com cinzas da casca de arroz e metacaulim sem e com cal.

→ Resumo do Desempenho das Pozolanas Binárias:

Simplificadamente pode-se concluir que:

- Considerando-se os ensaios das misturas binárias das pozolanas, percebe-se que a mais eficaz é a que tem cinzas de casca de arroz e metacaulim, pois é onde se nota o maior consumo de hidróxido de cálcio.

- Também se percebe que a substituição de metade da cinza de bagaço de cana por cinza de casca de arroz ou por metacaulim melhora o desempenho das cinzas do bagaço, o que também se comprova nos ensaio mecânicos.

→ Avaliação Geral

Considerem-se as argamassas que apresentaram maior resistência à compressão aos 70 dias, quais sejam, REF, R40 e R20M20.

Pode-se organizar a Tabela 4.13 para verificar o que ocorre nestas argamassas.

Tabela 4.13 – Avaliação Geral dos Resultados das Misturas

Mistura	Resistência à Compressão (MPa)	Absorção Capilar ((g/cm ₂)vt)	Penetração CO ₂ (mm)	Presença de CH			
				DRX		TG	
				Antes	Depois	Antes	Depois
REF	65,94	1,00	7,23	Sim	Sim	Sim	Sim
R40	62,60	0,40	8,82	Sim	Não	Sim	Não
R20M20	62,76	0,80	10,72	Sim	Não	Sim	Não

Pode-se comentar que:

- A resistência não se correlaciona com a capilaridade, pois ela é mais sensível à porosidade;
- A permeabilidade ao CO₂ é maior nas composições com adições;
- Na mistura referência ainda existe hidróxido de cálcio mesmo após permanência na câmara de carbonatação acelerada, ao passo que nas demais composições ele foi totalmente consumido.
- Nos ensaios de TG é possível notar que a quantidade de CaCO₃ é maior na mistura referência e na mistura S40 que nas misturas R40 e M40. Isto quer dizer que nas duas últimas argamassas houve o consumo do hidróxido de cálcio pela reação pozolânica, disponibilizando menor quantidade de CH para reagir com o CO₂ e formar a calcita.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Neste trabalho foram estudados três materiais em substituição parcial do cimento Portland com vistas a reduzir o impacto ambiental daquele ligante em argamassas para concretos autoadensáveis.

Um dos materiais empregados foi a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, por ser um material local presente na região Nordeste do Brasil. Os outros dois foram cinzas da casca de arroz e o metacaulim.

Como a substituição do cimento por materiais pozolânicos, em geral, reduz a alcalinidade das matrizes cimentícias, procurou-se avaliar o efeito da incorporação de 10% de cal nas suas propriedades.

Os resultados de caracterização dos materiais mostraram que a SCBA apresentou área superficial BET muito maior que o próprio cimento Portland. As demais pozolanas também. No entanto, o ensaio de granulometria a laser indicou que o diâmetro médio das pozolanas foi maior que o do cimento, excetuando-se o do metacaulim, que foi ligeiramente menor. Isto mostra que não se tem uma correlação direta entre área superficial BET e diâmetro médio dos grãos.

O índice de atividade pozolânica da SCBA e RHA com cal foi inferior ao valor indicado na ABNT NBR 12653 (2014), que é de 6,0 MPa. O metacaulim apresentou índice de 13,85 MPa, valor bem superior ao exigido por aquela Norma.

No estado fresco, a quantidade de aditivo superplastificante requerida para as argamassas autoadensáveis aumenta quando se tem presença das adições.

A resistência a compressão aumenta com a idade, mas a de todas as misturas ficaram abaixo do valor da referência. Os melhores resultados foram obtidos para as argamassas R40 e R20M20, que quase atingiram o valor da referência, cerca de 66 MPa aos 70 dias de idade. No entanto, os níveis de resistência obtidos são compatíveis com a fabricação de concretos auto-adensáveis,

As argamassas que tiveram cal incorporada apresentaram ligeiro decréscimo na resistência à compressão, o que se explica por conta da diminuição do teor de cimento Portland em mais 10%, em relação às misturas sem adição de cal. É bem provável que em um ambiente com disponibilidade de água, ao longo do tempo haja uma redução do decréscimo observado.

Quanto à capilaridade, aos 28 dias, a absorção de água foi menor nos traços com adições minerais, principalmente nos traços que contém o metacaulim. Isto ocorre devido a um refinamento dos poros causado pelas adições minerais e consequente minoração da permeabilidade à água. Os traços com adição de SCBA, praticamente apresentaram a mesma absorção capilar que o traço referência, por ser a pozolana menos eficiente.

A penetração de CO_2 aconteceu de forma mais marcante nos traços com as adições minerais, SCBA, RHA e MK, pois a incorporação delas diminui a quantidade do hidróxido de cálcio disponível. Nos traços com adição de SCBA, essa profundidade de carbonatação foi mais intensa. A presença da cal nos traços interferiu na penetração de gás carbônico, provavelmente devido ao alto teor dele na câmara de carbonatação acelerada. A permeabilidade ao gás carbônico, contrariamente à água, foi maior nas argamassas com adições.

Verificou-se também que as argamassas, antes da exposição na câmara de carbonatação acelerada, não apresentaram nenhuma carbonatação.

Ficou claro que as adições, de uma maneira geral, reduzem a permeabilidade das argamassas à água, porém aumentam a permeabilidade ao gás carbônico. São efeitos que se contrabalançam, porém devem ser levados em conta nos projetos estruturais por um aumento no cobrimento dos ferros. Em algumas composições a penetração do CO_2 não chega a ser nem 1,5 vezes maior que a da referência.

Em geral, a análise térmica diferencial comprova os resultados da difratometria de raios X, no que diz respeito à presença ou não do hidróxido de cálcio e o seu consumo a partir das reações pozolânicas e de carbonatação.

A experimentação mostrou que não há uma correlação direta entre as propriedades do concreto e os ensaios de resistência à compressão, absorção capilar, carbonatação, DRX e TG.

Maior resistência não significa menor absorção capilar de água; maior penetração de CO₂ não significa maior absorção capilar; maior presença de CH não quer dizer menor resistência.

As adições têm comportamento diverso, algumas podendo ter melhor desempenho em uma propriedade que em outra. Por exemplo, o metacaulim conduziu a uma maior resistência à compressão e menor absorção capilar que as cinzas da casca de arroz, porém esta última levou a uma menor penetração de carbonatação.

Como conclusão final, pode-se agora responder às questões postas na justificativa deste trabalho:

I. O desempenho das cinzas do bagaço de cana pode ser melhorado através de misturas binárias com outras pozolanas, como cinzas de casca de arroz e metacaulim?

Nas propriedades de resistência, sim. Na absorção capilar, a RHA melhorou a propriedade enquanto o MK foi desfavorável. Na carbonatação a mistura com essas pozolanas foi desfavorável.

- ✓ Tomado como base a idade de 28 dias, a resistência à compressão da argamassa unária com SCBA foi melhorada em de 1,72 vezes com a RHA e de 1,70 com o MK;
- ✓ A absorção de capilar de água foi reduzida de 2,5 vezes com a RHA porém a mistura com metacaulim foi desfavorável, aumentando-a de 1,3 vezes;
- ✓ A penetração da carbonatação foi aumentada de 2,8 vezes com a mistura com RHA e 2,26 vezes com o MK.

II. Qual o papel da substituição do cimento por cal nas propriedades de argamassas envolvendo altos teores de adição?

A substituição de 10% cimento por cal provocou os efeitos:

- ✓ Resistência à compressão aos 28 dias
 - a argamassa unária com SCBA teve diminuída de 0,77 vezes a resistência original;
 - a argamassa unária com RHA teve diminuída de 0,92 a resistência original;

- a argamassa unária com MK teve diminuída para 0,82 a resistência original.
- ✓ Quanto à absorção capilar aos 28 dias:
 - a argamassa unária com SCBA teve a absorção aumentada de 1,14 vezes;
 - a argamassa unária com RHA teve diminuída de 0,73 a absorção original;
 - a argamassa unária com MK teve diminuída de 0,80 a absorção original.
- ✓ Quanto à carbonatação:
 - a argamassa unária com SCBA teve a penetração de CO₂ aumentada de 2,98 vezes;
 - a argamassa unária com RHA teve penetração de CO₂ aumentada de 1,14 vezes;
 - a argamassa unária com MK teve diminuída de 0,91 vezes a penetração de CO₂.

III - qual o comportamento das argamassas com altos teores de substituição do cimento quando submetidas à carbonatação acelerada?

Os altos teores de substituição do cimento, em geral, aumentam consideravelmente a permeabilidade ao CO₂, tanto em misturas unárias quanto binárias, tendo-se como exceção do S40. Assim, as profundidades de carbonatação das misturas com adições foram sempre superiores à da argamassa de referência.

Finalmente, com base nos resultados obtidos para as diferentes misturas de argamassas autoadensáveis, conclui-se que é possível produzir concretos autoadensáveis com baixos teores de cimento Portland, com substituição do cimento por adições minerais como, SCBA, RHA e MK, o que é uma alternativa de maior sustentabilidade em sua produção. No entanto, deve-se levar em conta o que foi aqui apontado, indicando que se uma propriedade for melhorada, não significa que outras o sejam da mesma forma.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKRAM, Tayyeb; MEMON, Shazim Ali; OBAID, Humayun. Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 23, n. 2, p.703-712, fev. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.012>.

ALGHAZALI, Hayder H.; MYERS, John J. Shear behavior of full-scale high volume fly ash-self consolidating concrete (HVFA-SCC) beams. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 157, p.161-171, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.061>.

ALMEIDA, Fernando C.R. *et al.* Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 82, p.31-38, maio 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.039>.

ALRIFAI, Amjad *et al.* Paste and mortar studies on the influence of mix design parameters on autogenous shrinkage of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 47, p.969-976, out. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.024>.

AMERI, Farshad *et al.* Optimum rice husk ash content and bacterial concentration in self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 222, p.796-813, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.190>.

Anjos M. A. S. **Adição do Resíduo de Biomassa da cana-de-açúcar em Pastas para Cimentação de Poços Petrolíferos Produtores de Óleos Pesados**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 171p.

ANJOS, M. A. S. *et al.* Avaliação da durabilidade de concretos autoadensáveis com reduzido teor de cimento e elevados teores de adições minerais. **Anais do XIII Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção - CONPAT**. Lisboa, Portugal, 2015.

ANJOS, M. A. S.; CAMÕES, A.; JESUS, C. CAMPOS, P. Avaliação da durabilidade de concretos autoadensáveis com reduzido teor de cimento e elevados teores de adições minerais. **Anais do XIII Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção - CONPAT**. Lisboa, Portugal, 2015.

ANJOS, M.A.S; REIS, R.; CAMÕES, A.; DUARTE, F.; JESUS, C. Evaluation of hydration of cement pastes containing high volume of mineral additions. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, [s.l.], p.1-17, 22 may 2017. Informa UK Limited.

ANJOS, Marcos A. S. et al. Effect of high volume fly ash and metakaolin with and without hydrated lime on the properties of self-compacting concrete. **Journal of Building Engineering**, [s.l.], v. 27, p.100985-100992, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100985>.

ANJOS, Marcos A. S. et al. Hydration of oil well cement containing sugarcane biomass waste as a function of curing temperature and pressure. **Journal Of Petroleum Science and Engineering**, [s.l.], v. 109, p.291-297, set. 2013.

ARIF, Elisabeth; CLARK, Malcolm W.; LAKE, Neal. Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co-generation boiler: Applications in cement and mortar production. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 128, p.287-297, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.091>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1**: Concreto autoadensável - Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 14 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica - índice de atividade pozolânica com cal - Método de ensaio. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento - Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2013. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR NM 47**: Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 6 p.

BACARJI, E. *et al.* Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 45, p.1-10, ago. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.032>.

BADOGIANNIS, Efstratios G. *et al.* Durability of metakaolin Self-Compacting Concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 82, p.133-141, maio 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.023>.

BHATTY, J.I. e REID, K.J., Use of thermal analysis in the hydration studies of a type 1 portland cement produced from mineral tailings. *Thermochimica Acta*, 91, 95-105 (1985).

BEHERA M., BHATTACHARYYA S.K., MINOCHA A.K., DELOIYA R., MAITI S. (2014): Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 501–516. Elsevier BV <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003>

Bezerra, I. M. T. Souza, J., Carvalho, J. B. Q, Neves, G. A. Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.15, p.639–645, 2011 Campina Grande, PB. 2010.

BORGES, Paulo H.R. *et al.* Carbonation of CH and C–S–H in composite cement pastes containing high amounts of BFS. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 40, p.284-292, fev. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.020>.

CACHIM, Paulo; VELOSA, Ana Luísa; ROCHA, Fernando. Effect of Portuguese metakaolin on hydraulic lime concrete using different curing conditions. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 24, n. 1, p.71-78, jan. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.010>.

CACHIM, Paulo; VELOSA, Ana Luísa; ROCHA, Fernando. Effect of Portuguese metakaolin on hydraulic lime concrete using different curing conditions. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 24, n. 1, p.71-78, jan. 2010. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.010>

CALVO, J.L. García *et al.* Durability performance of sustainable self compacting concretes in precast products due to heat curing. **Construction and Building**

Materials, [s.l.], v. 111, p.379-385, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.097>.

Campos, P. G. S. **Betões eco-eficientes com elevados teores de adições minerais**. Dissertação (mestrado), Universidade do Minho, 94p.

CARDOSO, Ariane da Silva *et al.* Análise da Influência da Adição de Sílica Ativa como Substituição Parcial do Cimento em Argamassas Contra Ação de CO₂ e Íons Cloreto. *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, [s.l.], v. 2, n. 3, p.167-175, 28 ago. 2017. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.25286/rep.v2i3.714>.

CASTRO, T. R., MARTINS, C. H. Caracterização das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar como material alternativo para a redução de impactos ambientais. **Mix Sustentável**, Edição 03, 2016.

CHAO-LUNG, Hwang; ANH-TUAN, Bui Le; CHUN-TSUN, Chen. Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 25, n. 9, p.3768-3772, set. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.009>.

CHATVEERA, B.; LERTWATTANARUK, P. Durability of conventional concretes containing black rice husk ash. **Journal of Environmental Management**, [s.l.], v. 92, n. 1, p.59-66, jan. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.08.007>.

CHOPRA, Divya; SIDDIQUE, Rafat; KUNAL. Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash. **Biosystems Engineering**, [s.l.], v. 130, p.72-80, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.12.005>.

CHUSILP, Nuntachai; JATURAPITAKKUL, Chai; KIATTIKOMOL, Kraiwood. Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 23, n. 11, p.3352-3358, nov. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.030>.

CORDEIRO, G.C. *et al.* Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 30, n. 5, p.410-418, maio 2008. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.01.001>

CORDEIRO, G.C.; TAVARES, L.M.; TOLEDO FILHO, R.D. Improved pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash by selective grinding and classification. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 89, p.269-275, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.08.020>.

CORDEIRO, G. C.; KURTIS, K. E. Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 97, p.41-49, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.03.008>.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Química Nova**, [s.l.], v. 32, p.82-86, 2009. FapUNIFESP (SciELO).

DAL RI, M. **Efeito da adição de cal hidratada em concretos com altos teores de adição mineral na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto**. Dissertação de mestrado, 111 p. Universidade Federal de Santa Maria, 2002.

DINIZ, H. A. A. **Estudo das propriedades mecânicas e dos parâmetros de durabilidade de concretos autoadensáveis com elevados teores de adições minerais submetidos à carbonatação**. 2018. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

DUAN, Ping *et al.* Efficiency of mineral admixtures in concrete: Microstructure, compressive strength and stability of hydrate phases. **Applied Clay Science**, [s.l.], v. 83-84, p.115-121, out. 2013. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.08.021>

DWECK, J.; BUCHLER, P.M.; COELHO, A.V.; CARTLEDGE, F. Hydration of a Portland cement blended with calcium carbonate. *Thermochimica Acta*, [s.l.], v. 346, n. 1-2, p.105-113, mar. 2000. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.141>.

DWECK, J.; BUCHLER, P.M.; COELHO, A.V.; CARTLEDGE, F. Hydration of a Portland cement blended with calcium carbonate. *Thermochimica Acta*, 346 (1), 105-113 (2008).

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (2002). Specification and guidelines for self-compacting concrete. EFNARC.

FARIAS, F.C. **Avaliação da durabilidade frente ao ataque de CO_2 e Cl^- em concretos autoadensáveis com elevados teores de resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim**. Dissertação de Mestrado, 173 p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2019.

FONSECA, T. V. **Avaliação de concretos autoadensáveis com baixos consumos de cimento incorporando metacaulim, pozolana da casca do arroz, fíler calcário e adição de cal hidratada**. Dissertação de Mestrado, 121 p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2016.

GILL, Anhad Singh; SIDDIQUE, Rafat. Durability properties of self-compacting concrete incorporating metakaolin and rice husk ash. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 176, n. 1, p.323-332, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.054>.

GOŁASZEWSKI, J. *et al.* Mortar as a model to predict self-compacting concrete rheological properties as a function of time and temperature. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 124, p.1100-1108, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.136>.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil II, 318 p. São Paulo, 2008.

ISAIA, G.C.; FURQUIM, P.; GASTALDINI, A.I.G. A statistical approach of binary and ternary concrete mixtures with mineral additions. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 36, p.597-603, nov. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.026>.

JAMIL, M. *et al.* Physical and chemical contributions of Rice Husk Ash on the properties of mortar. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 128, n. 1, p.185-198, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.029>.

JOSHAGHANI, A.; MOEINI, M. A. Evaluating the effects of sugar cane bagasse ash (SCBA) and nanosilica on the mechanical and durability properties of mortar. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 152, p.818-831, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.041>.

KANNAN, V. Strength and durability performance of selfcompacting concrete containing self-combusted rice husk ash and metakaolin. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 160, p.169-179, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.043>.

KANNAN, V.; GANESAN, K. Chloride and chemical resistance of self compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 51, p.225-234, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.050>.

KATARE, V. D.; MADURWAR, M. V. Experimental characterization of sugarcane biomass ash – A review. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 152, p.1-15, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.142>.

KAVITHA, O.R. *et al.* Fresh, micro- and macrolevel studies of metakaolin blended self-compacting concrete. **Applied Clay Science**, [s.l.], v. 114, n. 1, p.370-374, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2015.06.024>.

KAVITHA, O.R. *et al.* Microstructural studies on eco-friendly and durable Self-compacting concrete blended with metakaolin. **Applied Clay Science**, [s.l.], v. 124-125, p.143-149, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2016.02.011>.

KHATIB, J. M.; MANGAT, P.S. Absorption characteristics of concrete as a function of location relative to casting position. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 25, n. 5, p.999-1010, jul. 1995. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00095-t](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(95)00095-t).

LE, Duc-Hien; SHEEN, Yeong-Nain; LAM, My Ngoc-Tra. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete with sugarcane bagasse ash-slag blended cement. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 185, p.138-147, out. 2018. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.029>

LE, H. T; LUDWIG, H-M.. Effect of rice husk ash and other mineral admixtures on properties of self-compacting high performance concrete. **Materials & Design**, [s.l.], v. 89, p.156-166, jan. 2016.

MADANDOUST, Rahmat; MOUSAVI, S. Yasin. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 35, p.752-760, out. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.109>.

MEDEIROS, E. N. M. **Uso da técnica de planejamento experimental para otimização de massa cerâmica com incorporação de resíduos de cinza de casca de arroz, cinza de lenha e lodo de eta**. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil). UNB, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília 2010. 166 p.

MEDEIROS, F. K. **Estudo de concretos autoadensáveis com reduzidos teores de cimento e elevados teores de adições minerais**. 134f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto – estrutura, propriedades e materiais. 4ª edição, Ed. Pini, São Paulo, 2014.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2. ed. São Paulo: **IBRACON**. 2014. 782 p.

MIRA, P; PAPADAKIS, V.G; TSIMAS, S. Effect of lime putty addition on structural and durability properties of concrete. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 32, n. 5, p.683-689, maio 2002. Elsevier BV. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00744-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00744-X)

MORAES, J.C.B. *et al.* Assessment of sugar cane straw ash (SCSA) as pozzolanic material in blended Portland cement: Microstructural characterization of pastes and mechanical strength of mortars. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 94,

p.670-677, set. 2015. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.108>.

MORETTI, Juliana Petermann; NUNES, Sandra; SALES, Almir. Self-compacting concrete incorporating sugarcane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 172, p.635-649, maio 2018. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.277>.

NEPOMUCENO, M.; OLIVEIRA, L.; LOPES, S. M. R. Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 26, n. 1, p.317-326, jan. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.027>.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. Tecnologia do concreto. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p. Tradução: Ruy Alberto Cremonini.

OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. Durabilidade do concreto: Bases cimentícias para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente, IBRACON, São Paulo (2014) 615p.

OLUTOGE, Festus A.; ADESINA, Peter A. Effects of rice husk ash prepared from charcoal-powered incinerator on the strength and durability properties of concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 196, p.386-394, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.138>.

PAIVA, H. *et al.* Microstructure and hardened state properties on pozzolan-containing concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 140, p.374-384, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.120>.

PAULA, M. O., TINOCO, I. F, F., RODRIGUES, C., S., SILVA, E., N., SOUZA, C., F. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.13, n.3, p.353–357, 2009 Campina Grande, PB, UAEA/UFCG – 2009.

PAYÁ, Jordi *et al.* Bagasse ash. Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete, [s.l.], p.559-598, 2018. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-102156-9.00017-1>.

PELISSER, F.; VIEIRA, A.; BERNARDIN, A. Ml. Efficient self-compacting concrete with low cement consumption. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 175, p.324-332, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.084>.

PEREIRA, A. *et al.* Mechanical and durability properties of alkali-activated mortar based on sugarcane bagasse ash and blast furnace slag. **Ceramics International**, [s.l.], v. 41, n. 10, p.13012-13024, dez. 2015. Elsevier BV.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.07.001>

PERLOT, C.; ROUGEAU, P.; DEHAUDT, S.. Slurry of metakaolin combined with limestone addition for self-compacted concrete. Application for precast industry. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 44, p.50-57, nov. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.07.003>.

QIU, Qiwen. A state-of-the-art review on the carbonation process in cementitious materials: Fundamentals and characterization techniques. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 247, p.118503-118524, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118503>.

RAMACHANDRAN, V. M. Concrete admixtures handbook. Noyes Publications, New York, 1984.

RAMEZANIANPOUR, A. A.; JOVEIN, H. Bahrami. Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 30, n. 1, p.470-479, maio 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.050>.

RÍOS-PARADA, V. *et al.* Characterization and use of an untreated Mexican sugarcane bagasse ash as supplementary material for the preparation of ternary concretes. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 157, p.83-95, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.060>.

SHAFIGH, Payam *et al.* Engineering properties of oil palm shell lightweight concrete containing fly ash. **Materials & Design**, [s.l.], v. 49, p.613-621, ago. 2013. Elsevier BV.

SAFIUDDIN, M.D.; WEST, J.S.; SOUDKI, K.A. Properties of freshly mixed self-consolidating concretes incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 30, p.833-842, maio 2012. Elsevier BV <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.066>

SAFIUDDIN, MD.; WEST, J.S.; SOUDKI, K.A. Hardened properties of self-consolidating high performance concrete including rice husk ash. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 32, n. 9, p.708-717, out. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.006>.

SAMIMI, K.; KAMALI-BERNARD, S.; MAGHSOUDI, A. A. Durability of self-compacting concrete containing pumice and zeolite against acid attack, carbonation and marine environment. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 165, p.247-263, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.235>.

SCCEPG. The European guidelines for self-compacting concrete: specification, production and use. West Midlands, UK: Self-Compacting Concrete European Project Group (SCCEPG), the European Federation of Concrete Admixtures Associations; 2005.

SENSALE, G. R. Effect of rice-husk ash on durability of cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 32, n. 9, p.718-725, out. 2010. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.008>

SFIKAS, I. P.; BADOGIANNIS, E. G.; TREZOS, K. G. Rheology and mechanical characteristics of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 64, p.121-129, ago. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.048>.

SILVA, P.R. BRITO, J. Experimental study of the porosity and microstructure of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 86, p.101-112, jul. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.110>.

SILVA, S. R.; ANDRADE, J. J. O.. Investigation of mechanical properties and carbonation of concretes with construction and demolition waste and fly ash. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 153, p.704-715, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.143>.

SINGH, Navdeep; SINGH, S.P. Carbonation and electrical resistance of selfcompacting concrete made with recycled concrete aggregates and metakaolin. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 121, p.400-409, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.009>.

SOARES, E. A. **Avaliação Físico-química e sensorial de caldo de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agroecologia e Desenvolvimento Rural, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2017.

SUA-IAM, G.; MAKUL, N. Effect of incinerated sugarcane filter cake on the properties of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 130, p.32-40, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.033>.

SUA-IAM, G.; MAKUL, N. Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 57, p.308-319, out. 2013. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.009>

TASHIMA M. M. **Cinza de Casca de Arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, São Paulo, SP, 2006.

TASHIMA, M. M., FIORITI, C. F., AKASAKI, J. L., BERNABEU, J. P., SOUSA, L. C., MELGES, J. L. P. Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de produção e atividade pozolânica. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 2, p. 151-163, 2012.

TAYLOR H.F.W. Cement chemistry 2nd edition, THOMASTELFORD, New York (1997) 469p.

TORGAL, F. P. *et al.* An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: Evaluation, use of SCMs and/or RAC. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 36, p.141-150, nov. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.066>.

UYSAL, M.; YILMAZ, K. Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 33, n. 7, p.771-776, ago. 2011. Elsevier BV <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.005>

VEJMELKOVÁ, E. *et al.* Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 25, n. 3, p.1325-1331, mar. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.012>.

YE, Hailong *et al.* Chloride penetration in concrete exposed to cyclic drying-wetting and carbonation. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 112, p.457-463, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.194>.

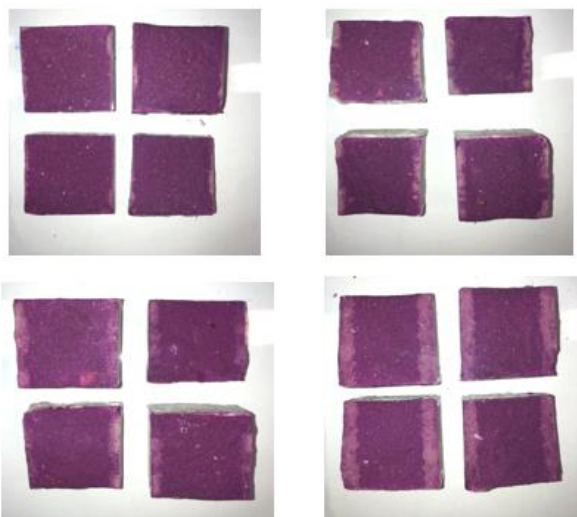
WONGKEO, W. *et al.* (2014): Compressive strength and chloride resistance of selfcompacting concrete containing high level fly ash and silica fume. **Materials and Design** v 64, p. 261-269.

ANEXO

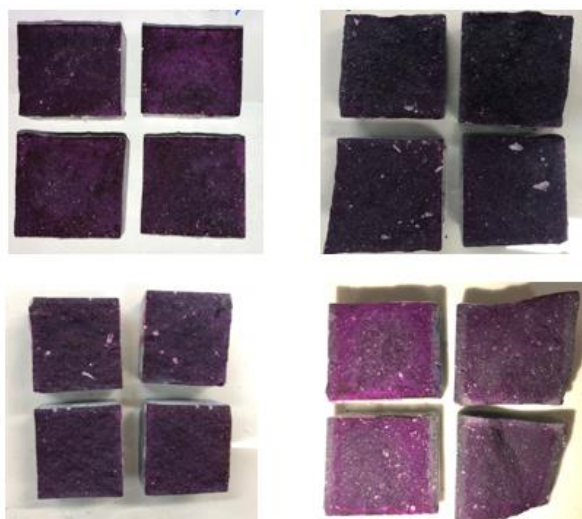
☐ Imagens da Profundidade de Carbonatação

Imagens da profundidade de carbonatação dos corpos de prova das misturas, com suas respectivas idades de carbonatação.

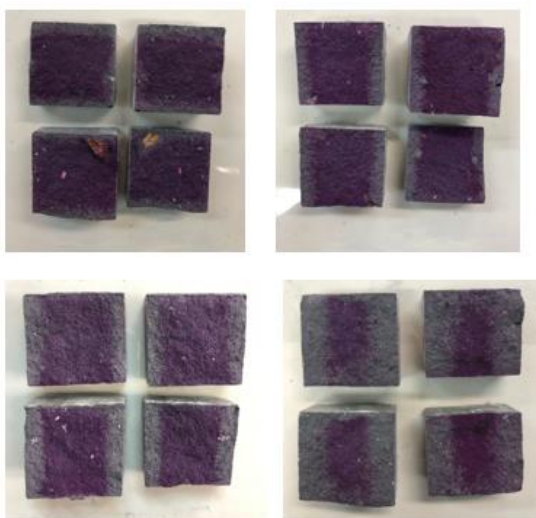
- ✓ Mistura referência (REF) aos 3, 7, 14 e 28 dias dentro da câmara.



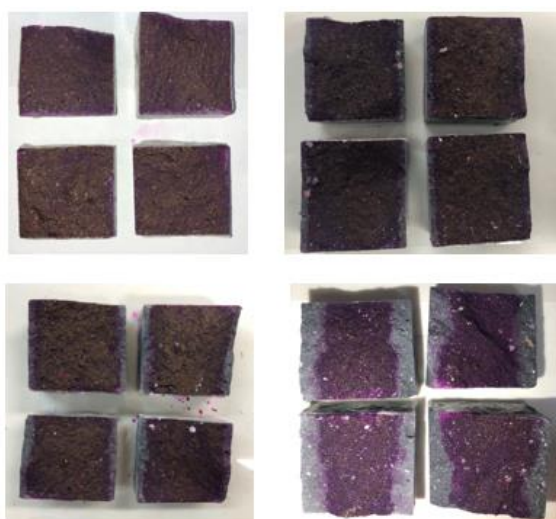
- ✓ Mistura S40, aos 3, 7, 14 e 28 dias dentro da câmara.



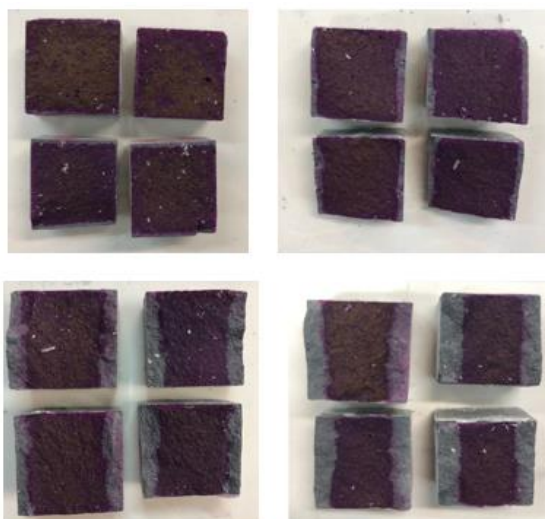
✓ Mistura S40C10, aos 3, 7, 14 e 28 dias dentro da câmara.



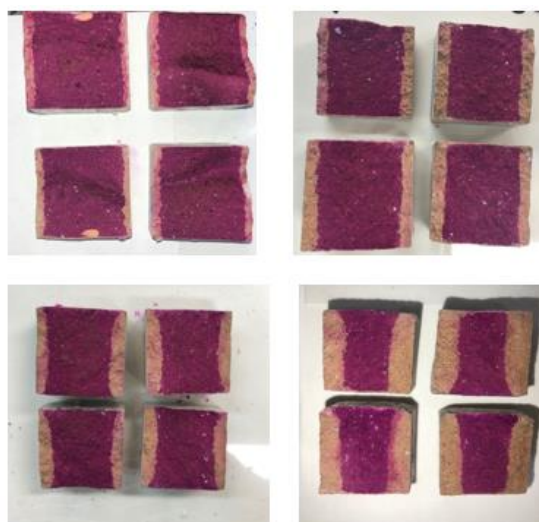
✓ Mistura R40, 3, 7, 14 e 28 dias dentro da câmara.



✓ Mistura R40C10, aos 3, 7, 14 e 28 dias dentro da câmara.



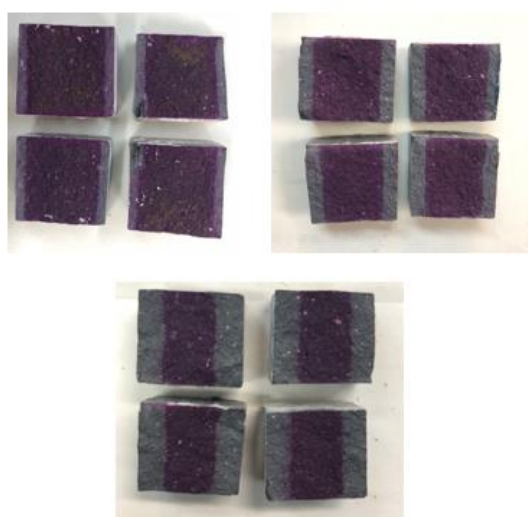
✓ Mistura M40, 3, 7, 14 e 28 dias dentro da câmara.



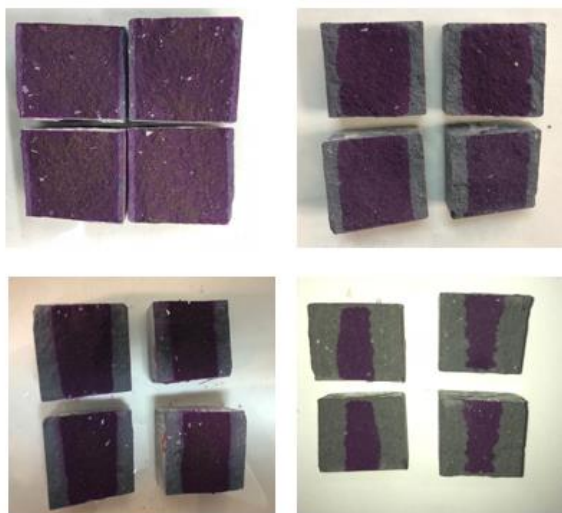
✓ Mistura M40C10, 3, 7, 14 e 28 dias dentro da câmara.



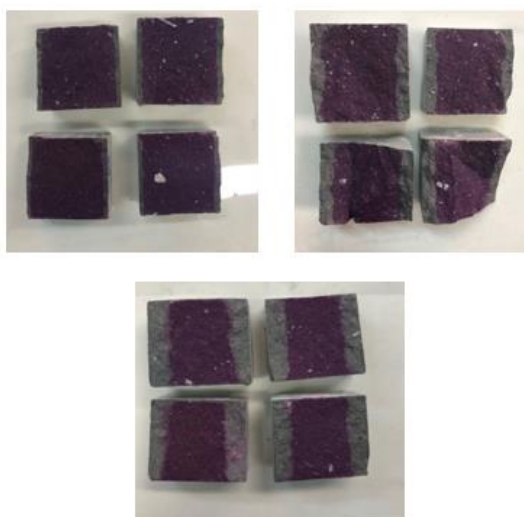
✓ Mistura S20R20, aos 3, 14 e 28 dias dentro da câmara.



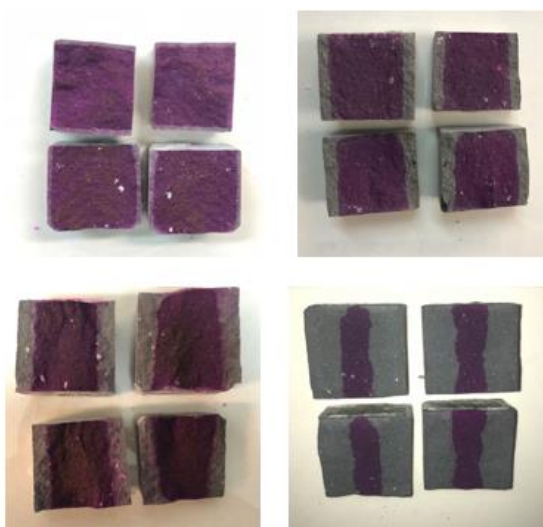
✓ Mistura S20R20C10, aos 3, 7, 14 e 28 dias dentro da câmara.



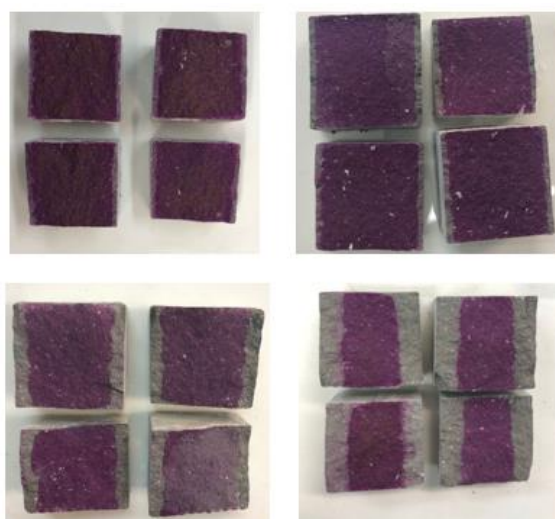
✓ Mistura S20M20, aos 3, 14 e 28 dias dentro da câmara.



✓ Mistura S20M20C10, aos 3, 7, 14 e 28 dias dentro da câmara.



✓ Mistura R20M20, aos 3, 7, 14 e 28 dias dentro da câmara.



✓ Mistura R20M20C10, aos 3, 7, 14 e 28 dias dentro da câmara.

