



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Fernanda Karolline de Medeiros

**ESTUDO DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM REDUZIDOS
TEORES DE CIMENTO E ELEVADOS TEORES DE ADIÇÕES
MINERAIS**

**Natal
2016**

Fernanda Karolline de Medeiros

**ESTUDO DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM REDUZIDOS
TEORES DE CIMENTO E ELEVADOS TEORES DE ADIÇÕES
MINERAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia Civil, da
Universidade Federal do Rio Grande do Norte,
como requisito parcial à obtenção do título de
Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos
Co-orientador: Prof^a. Dr^a. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

Natal
2016

Catálogo da Publicação na Fonte
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Sistema de Bibliotecas
Biblioteca Central Zila Mamede / Setor de Informação e Referência

Medeiros, Fernanda Karolline de.

Estudo de concretos autoadensáveis com reduzidos teores de cimento e elevados teores de adições minerais / Fernanda Karolline de Medeiros. - Natal, RN, 2016.

133 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos.

Coorientador: Prof.^a Dr.^a Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

1. Concreto – Durabilidade - Dissertação. 2. Sustentabilidade - Dissertação. 3. Sílica da casca de arroz - Dissertação. 4. Cinza da cana-de-açúcar - Dissertação. 5. Cloretos - Dissertação. 6. Concreto autoadensável (CAA) – Dissertação. I. Anjos, Marcos Alyssandro Soares dos. II. Almeida, Maria das Vitórias Vieira. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 666.972.16

FERNANDA KAROLLINE DE MEDEIROS

**ESTUDO DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM REDUZIDOS
TEORES DE CIMENTO E ELEVADOS TEORES DE ADIÇÕES
MINERAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos – Orientador

Prof^a. Dr^a. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá – Co-orientadora

Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa – Examinador Externo (UFPB)

Prof^a. Dr^a. Andreza Kelly Costa Nobrega – Examinador Externo (UFERSA)

Natal, 06 de maio de 2016.

ESTUDO DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM REDUZIDOS TEORES DE CIMENTO E ELEVADOS TEORES DE ADIÇÕES MINERAIS

Fernanda Karolline de Medeiros

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares do Anjos

Co-orientador: Prof^a. Dr^a. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

RESUMO

O processo de produção de concreto gera um significativo impacto ambiental por ser um dos maiores consumidores de matéria-prima, como areia, pedra e água. Entretanto, o maior impacto é causado pela produção do cimento Portland, material indispensável ao concreto. Materiais como a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (RBC), sílica da casca de arroz (PCA), metacaulim (MK) e sílica ativa, são adições minerais que desempenham um importante papel nas propriedades de resistência e de durabilidade, quando utilizados em mistura com cimento Portland e, sob certas condições, podem perfeitamente substituir altos teores de cimento nas misturas, conferindo a elas, além dos benefícios conhecidos que a redução de cimento acarreta, aumento significativo de durabilidade. A utilização de concreto autoadensável (CAA) tem crescido significativamente por suas características de alta fluidez e coesão e pela possibilidade de moldagem in loco sem vibração, com capacidade de fluxo através do seu peso próprio, preenchendo completamente as fôrmas e atingindo a compactação mesmo em estruturas densamente armadas. Frente ao exposto, este trabalho avaliou as propriedades reológicas, físicas, mecânicas e de durabilidade frente ao ataque de íons cloreto dos eco-concretos autoadensáveis com a incorporação de altos teores de cinza da biomassa da cana-de-açúcar, sílica da casca de arroz e metacaulim. Para isso, foi analisado um concreto autoadensável com materiais convencionais sem adições minerais para

utilização como referência e quatro concretos com incorporação de 40% e 50% de adições, utilizando cinza do bagaço da cana-de-açúcar, pozolana da casca de arroz e metacaulim. Os resultados evidenciaram que a sinergia resultante das misturas desenvolvidas revelou desempenhos mecânicos e de durabilidade, frete ao ataque de íons cloreto, superiores ao CAA de referência. Quando comparados com o concreto de referência, os concretos com adições apresentaram um aumento de até 13,4% da resistência à compressão aos 28 dias e redução de até 87% da penetração de íons cloreto aos 91 dias. Os resultados obtidos no estudo também evidenciaram que a incorporação de altos volumes de adições minerais no CAA causa uma diminuição do impacto ambiental gerado pelas emissões antropogênicas de CO₂, pela energia consumida e pelo consumo de materiais naturais, confirmando assim a relevância da pesquisa. É possível, então, produzir concretos autoadensáveis com desempenhos promissores, utilizando altos teores de RBC, PCA e MK, com redução significativa do consumo de cimento para níveis de cerca 220 kg/m³, contribuindo para a sustentabilidade da indústria da construção, minimizando energia liberada e a compactação.

Palavras-chave: Durabilidade; sustentabilidade; sílica da casca de arroz; cinza da cana-de-açúcar; cloretos.

INCORPORATION OF THE RESIDUE ORIGINATING FROM THE IMPROVEMENT OF KAOLIN IN ASPHALT CONCRETE

Fernanda Karolline de Medeiros

Adviser: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

Co-adviser: Prof^a. Dr^a. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

ABSTRACT

The concrete production process generates a significant environmental impact as one of the largest consumers of raw materials, like sand, stone and water. However, the greatest impact is caused by the production of Portland cement, an essential material to the concrete. Materials such as sugarcane bagasse ashes (RBC), silica from rice husk (PCA), metakaolin (MK) and silica fume, are mineral additions that play an important role in resistance and durability properties, when used in combination with Portland cement and, under certain conditions, can perfectly replace high cement content in mixtures, given to them in addition to the known benefits that cement reduction entails, like significant increase in durability. The use of self-compacting concrete (SCC) has grown significantly by its high fluidity characteristics and cohesiveness and the possibility of forming in situ without vibration, forming a fault and void-free product which has also flowability by its own weight completely filling the molds and reaching compaction even in heavily armed structures. Based on these, this study aimed to evaluate the rheological, physical, mechanical and durability properties of self-compacting eco-concrete with the high percentage incorporation of sugarcane biomass ashes, silica from rice husk and metakaolin. Based on these, this study evaluated the rheological properties, physical, mechanical and durability freight to attack by chloride ions of self-compacting eco-concrete with the incorporation of high content of ash biomass sugarcane, rice husk silica and metakaolin. For this, a self-compacting concrete with conventional

materials without mineral admixtures for use as a reference and four concrete incorporating 40% and 50% additions were analyzed using gray bagasse from sugarcane, pozzolan rice husk and metakaolin. The results showed that the resulting synergy of developed mixtures revealed mechanical and durability performance, freight to attack by chloride ions, above the reference SCC. When compared to the reference concrete, concrete with additions showed an increase of up to 13.4% of the compressive strength at 28 days and reducing to 87% the penetration of chloride ions to 91 days. The results of the study also showed that incorporating high volumes of mineral additions in the SCC causes a reduction of the environmental impact generated by the anthropogenic emissions of CO₂, the energy consumed and the consumption of natural materials, thus confirming the relevance of the research. It is possible to produce self-compacting concrete with promising performances, using high RBC levels, PCA and MK, with a significant reduction in cement consumption to levels of about 220 kg / m³, thus contributing to the sustainability of the construction industry, minimizing energy released and compression.

Key-words: Durability; sustainability; silica from rice husk; Ash sugarcane; chlorides.

*“Se fui capaz de ver mais longe, é porque
estava de pé em ombros de gigantes.”*

(Sir Isaac Newton)

Àqueles que sempre acreditaram: meus
amados avós, exemplos de dedicação, de vida
e de amor, Seu Silvino e Dona Luiza (*in
memorian*). Adorada mãe, Lúcia, e irmãos,
Joyce e José Carlos.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por iluminar meu caminho e me abençoar com saúde, força e determinação para buscar a realização dos meus sonhos;

Ao meu amado amigo e companheiro de todas as horas, Eudes Araújo, pelo carinho, amor, compreensão, paciência, incentivo e companheirismo em todos os momentos, principalmente na execução dos tantos ensaios. Apoio fundamental para a conclusão de mais uma etapa em minha vida;

À minha família, principal razão das minhas lutas e conquistas. Em especial à tia Heloísa e Gilson, por todo o incentivo, auxílio e amor;

Ao meu orientador Dr. Marcos Alyssandro, pela dedicação, paciência e toda a atenção e disponibilidade que precisei durante o desenvolvimento do estudo. Agradeço por ter me dado a honra de desenvolver parte do seu projeto. Seu apoio foi fundamental no desenvolvimento de toda a pesquisa e para o meu enriquecimento individual e profissional;

À minha querida orientadora Dra. Maria das Vitórias, por escutar minhas aflições, me orientar nos momentos difíceis e por acreditar em meu potencial. Não há palavras que possam descrever minha gratidão a Deus por tê-la colocado em meu caminho;

Aos professores Normando Perazzo e Andreza Nobrega pelas orientações e pela leitura e correção da dissertação, fundamentais para o enriquecimento do trabalho;

Aos demais professores que, por meio dos conhecimentos transmitidos, auxiliaram na minha formação;

À UFRN e ao PEC, pela oportunidade de crescimento profissional;

Ao IFRN, por todo o apoio que necessitei para realização dos ensaios;

Ao CNPQ, pelo suporte financeiro;

À CAPES e FUNCERN pela concessão de bolsa durante parte da realização deste trabalho;

Aos amigos Larissa, Talita, Evilane, Tomaz e Aline e a todos os bolsistas que me ajudaram durante os ensaios experimentais. Sem vocês, nem sei como seria;

Aos meus amigos do PEC e de vida Elton, Cléber e Wesley, companheiros e incentivadores durante toda a caminhada, os levarei sempre em meu coração;

Aos demais amigos, pela atenção e disponibilidade. E a todos aqueles que, mesmo não tendo sido citados, colaboraram de alguma forma, direta ou indiretamente, para o desenvolvimento deste trabalho, muito obrigada.

SUMÁRIO

Lista de figuras	
Lista de tabelas	
Lista de equações	
Lista de siglas e abreviaturas	
1. Introdução	1
1.1 Objetivos da pesquisa	5
1.1.1 Objetivo Geral	5
1.1.2 Objetivos Específicos	5
1.2 Justificativa	5
1.3 Organização da Dissertação	6
2. Revisão bibliográfica	8
2.1 Sustentabilidade na Indústria Cimenteira e do Concreto	8
2.2 Adições Minerais	9
2.2.1 Sílica da Casca de Arroz e seu emprego como adição mineral	11
2.2.2 Cinza da Biomassa da Cana-de-Açúcar e seu emprego como adição mineral	13
2.2.3 Metacaulim e seu emprego como adição mineral	18
2.3 Concretos com Elevados Teores de Adições	20
2.4 Concreto Autoadensável	22
2.4.1 Considerações gerais	22
2.4.2 Ensaio e requisitos do CAA no estado fresco	24
2.4.3 Concretos autoadensáveis com baixos teores de cimento e elevados teores de adições minerais	26
2.5 Ataque químico por íons cloreto	27
2.6 Determinação do Coeficiente de Difusão dos Cloretos por migração em regime não estacionário	29
3. Projeto experimental	34
3.1 Caracterização dos materiais utilizados	35
3.1.1 Cimento	35
3.1.2 Resíduo da biomassa da cana-de-açúcar	37
3.1.3 Metacaulim	38
3.1.4 Agregado graúdo	38
3.1.5 Agregado miúdo	40
3.1.6 Água	41
3.1.7 Aditivo	41
3.1.8 Sílica da casca de arroz	42
3.2 Definição dos traços e produção dos concretos	43
3.3 Metodologia dos ensaios	45
3.4 Ensaio no estado endurecido	47
3.4.1 Velocidade do pulso ultrassônico	47
3.4.2 Resistência à compressão axial (f_c)	49
3.4.2.1 Módulo estático de elasticidade à compressão	49
3.4.2.2 Absorção de água, índice de vazios e massa específica	50
3.4.3 Ensaio de durabilidade	51
3.4.3.1 Absorção por capilaridade	51
3.4.3.2 Migração de cloretos em regime não estacionário	53

3.4.4	Atividade Pozolânica	56
3.4.4.1	Índice de Atividade Pozolânica com Cimento Portland.....	56
3.4.4.2	Índice de Atividade Pozolânica com Cal.....	57
3.4.4.3	FRX	58
3.4.4.4	DRX.....	58
4.	Resultados e discussões.....	60
4.1	Caracterização dos materiais utilizados.....	60
4.1.1	Cimento	60
4.1.2	Sílica da Casca de Arroz	62
4.1.3	Cinza da Biomassa da Cana-de-Açúcar.....	64
4.1.4	Metacaulim	66
4.1.5	Avaliação da pozolanicidade	68
4.2	Ensaio no estado fresco	71
4.2.1	Análise das composições	71
4.2.2	Ensaio de caracterização no estado fresco	72
4.2.2.1	Fluidez e viscosidade	75
4.3	Ensaio no estado endurecido.....	76
4.3.1	Ultrassom	76
4.3.2	Resistência à compressão axial	78
4.3.3	Módulo de elasticidade dinâmico.....	81
4.3.4	Módulo de elasticidade estático à compressão	82
4.3.5	Absorção de água, índice de vazios e massa específica	84
4.4	Ensaio de durabilidade	86
4.4.1	Absorção por capilaridade	86
4.4.2	Migração em regime não estacionário.....	88
4.5	Avaliação da contribuição do estudo para diminuição do impacto ambiental gerado na produção do CAA	91
5.	Considerações finais	97
5.1	Conclusões	97
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	99
	Referências Bibliográficas	100
	ANEXO 1.....	111
	ANEXO 2.....	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Representação aproximada das faixas composicionais de adições minerais e cimento Portland no sistema $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$	10
Figura 2.2	Difração de raios X da PCA determinados por (a) Gastaldini <i>et al.</i> (2014) (b) Chopra <i>et al.</i> (2015) (c) Cordeiro <i>et al.</i> (2012).....	12
Figura 2.3	Ciclo de geração do resíduo da biomassa da cana-de- açúcar.....	13
Figura 2.4	Processo de geração do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar com proposta de utilização.....	14
Figura 2.5	Produção de cana-de-açúcar das safras de 2000 a 2016.....	15
Figura 2.6	Difração de raios X do RBC determinados por (a) Anjos (2009) (b) Moraes <i>et al.</i> (2015) (c) Cordeiro <i>et al.</i> (2012)	17
Figura 2.7	Difração de raios X do RBC determinados por (a) Andrejkovičová, <i>et al.</i> (2016) (b) Kannan & Ganesan (2014) (c) Li <i>et al.</i> (2015)	19
Figura 2.8	Comparação das proporções de mistura entre o concreto autoadensável e o concreto convencional. (Okamura & Ouchi, 2003).....	23
Figura 2.9	Ensaio realizados no CAA no estado fresco. (a) Slump flow t_{500} Test; (b) J-ring; (c) Caixa “L”; (d) “V” funil; (e) Coluna de segregação.....	25
Figura 2.10	Representação esquemática de um cilindro de concreto armado exposto à água do mar.....	29
Figura 2.11	Ensaio migração de cloretos LNEC.....	30
Figura 2.12	Resistência à compressão de PCA (RHA) e MK misturado concreto (Kannan & Ganesan, 2014).....	32
Figura 3.1	Fluxograma do programa experimental.....	35
Figura 3.2	Processo de captação do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar	37
Figura 3.3	Coleta do agregado graúdo.....	39
Figura 3.4	Curva granulométrica do agregado graúdo de acordo com a NBR NM 248 (2003).....	39
Figura 3.5	Coleta do agregado miúdo.....	40
Figura 3.6	Curva granulométrica do agregado miúdo de acordo com a NBR NM 248 (2003)	41
Figura 3.7	Pundit Lab+.....	48
Figura 3.8	Ensaio de módulo estático de elasticidade à compressão.....	50
Figura 3.9	Ensaio migração de cloretos LNEC.....	54
Figura 3.10	Ilustração da medição das profundidades de penetração dos cloretos.....	55
Figura 4.1	Difração de raios X do cimento CP-V ARI RS.....	61
Figura 4.2	Curva granulométrica do cimento.....	62
Figura 4.3	Difração de raios X do PCA.....	63
Figura 4.4	Curva granulométrica da sílica da casca de arroz.....	64
Figura 4.5	Curva granulométrica da cinza de biomassa de cana-de-açúcar com 3 horas de moagem.....	64
Figura 4.6	Difração de raios X do RBC.....	66
Figura 4.7	Curva granulométrica do metacaulim.....	67
Figura 4.8	Difração de raios X do metacaulim.....	67
Figura 4.9	Curvas granulométricas do cimento e adições utilizadas.....	68
Figura 4.10	Difração de raios X da pasta produzida para IAP com RBC.....	70
Figura 4.11	Difração de raios X da pasta produzida para IAP com PCA.....	71
Figura 4.12	Espalhamentos e anel J dos CAA (a) REFCAA, (b) REFCAA, (c)	

30PCA20MK, (d) 20RBC20MK, (e) 30RBC20MK, (f) 20PCA20MK e (g) 30PCA20MK.....	74
Figura 4.13 Parâmetros de deformabilidade (Γ_c) e a viscosidade (R_c).....	76
Figura 4.14 Evolução das velocidades do pulso ultrassônico com a idade.....	77
Figura 4.15 Evolução das resistências à compressão com a idade.....	78
Figura 4.16 Eixo de simetria no plano de rompimento do corpo de prova durante o o ensaio de resistência à compressão da composição PCA30MK20 aos 14 dias.	81
Figura 4.17 Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade de diferentes CAA em comparação com a faixa de previsão referente ao <i>Model Code 90</i>	83
Figura 4.18 Absorção por imersão e índice de vazios dos concretos produzidos	85
Figura 4.19 Absorção de água por capilaridade dos CAA estudados aos 28 dias.....	87
Figura 4.20 Absorção de água por capilaridade dos CAA estudados aos 91 dias.....	87
Figura 4.21 Coeficiente de difusão dos cloretos dos concretos estudados aos 28 e 91 dias.....	89
Figura 4.22 Profundidades de penetração dos cloretos (a) RBC20MK20 91 (b) PCA30MK20 91 (c) REFCAA 91.....	91
Figura 4.23 Índice e-CO ₂ aos 28 e 91 dias.....	94
Figura 4.24 Índice e-Energia aos 28 e 91 dias.....	94
Figura 4.25 Índice e-Recursos aos 28 e 91 dias.....	95
Figura 4.26 Índice e-Energia (difusão) aos 28 e 91 dias.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Composição de cinzas da casca de arroz determinadas por Della <i>et al.</i> (2002), Cordeiro <i>et al.</i> (2012), Kannan & Ganesan (2014), Kannan & Ganesan (2014), Le <i>et al.</i> (2015) e Chopra <i>et al.</i> (2015).....	12
Tabela 2.2 Composição de cinzas de biomassa da cana-de-açúcar determinadas por Hernández (1998), por Massazza (2004), Cordeiro (2006), Frías <i>et al.</i> (2007) Anjos (2009) e Jiménez-Quero (2013).....	16
Tabela 2.3 Composição do metacaulim determinadas por Kannan & Ganesan (2014), por Barbhuiya <i>et al.</i> (2015), Li <i>et al.</i> (2015), Andrejkovičová <i>et al.</i> (2016) e Kavitha <i>et al.</i> (2016).....	19
Tabela 3.1 Ensaios químicos e físicos do cimento CP V ARI RS - ABNT NBR 5733 (1991) e ABNT NBR 5737 (1992).....	36
Tabela 3.2 Quantidade de corpos moedores utilizado na moagem.....	38
Tabela 3.3 Caracterização do agregado graúdo.....	39
Tabela 3.4 Caracterização do agregado miúdo.....	40
Tabela 3.5 Dados técnicos do GLENIUM®160 SCC.....	41
Tabela 3.6 Composição Química e Propriedades Físico-Químicas da Sílica da Casca de Arroz.....	42
Tabela 3.7 Traços de partida.....	43
Tabela 3.8 Consumo de materiais, em kg/m ³ , para as composições indicadas..	43
Tabela 3.9 Procedimento para mistura dos materiais para produção dos concretos pesquisados.....	44
Tabela 3.10 Classes de espalhamento	45
Tabela 3.11 Classes de viscosidade plástica aparente t ₅₀₀	46
Tabela 3.12 Classes de habilidade passante pelo anel J.....	46
Tabela 3.13 Classes de habilidade passante pela caixa L (sob fluxo confinado).	46
Tabela 3.14 Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V (sob fluxo confinado).....	47
Tabela 3.15 Diferença de potencial e duração do ensaio de migração de uma amostra de concreto.....	54
Tabela 4.1 Composição química do cimento CP-V ARI RS.....	60
Tabela 4.2 Composição potencial de Bogue do cimento CP-V ARI RS.....	61
Tabela 4.3 Composições química do PCA.....	63
Tabela 4.4 Composições química do RBC.....	65
Tabela 4.5 Composições química do Metacaulim.....	66
Tabela 4.6 Resultados das argamassas para determinação do IDC e das pastas para determinação do IAP.....	69
Tabela 4.7 Índices de composição da mistura de CAA conforme EFNARC (2005).....	72
Tabela 4.8 Propriedades dos concretos no estado fresco.....	73
Tabela 4.9 Relação entre a resistência e o consumo de cimento dos concretos produzidos.....	81
Tabela 4.10 Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico.....	82
Tabela 4.11 Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade estático.....	83
Tabela 4.12 Resultados das propriedades físicas dos concretos produzidos.....	84
Tabela 4.13 Coeficiente de absorção de água por capilaridade nas idades de 60 min e 360 min.....	88

Tabela 4.14 Dióxido de carbono incorporado (e-CO ₂), consumo de energia incorporado (e-Energia) e consumo de recursos primários das matérias primas do concreto (e-Recursos)	93
--	----

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1.....	28
Equação 2.2.....	28
Equação 3.1.....	37
Equação 3.2.....	37
Equação 3.3.....	37
Equação 3.4.....	37
Equação 3.5.....	48
Equação 3.6.....	48
Equação 3.7.....	51
Equação 3.8.....	51
Equação 3.9.....	51
Equação 3.10.....	51
Equação 3.11.....	51
Equação 3.12.....	52
Equação 3.13.....	55
Equação 3.14.....	55
Equação 3.15.....	55
Equação 3.16.....	57
Equação 4.1.....	61
Equação 4.2.....	61
Equação 4.3.....	75
Equação 4.4.....	75
Equação 4.5.....	92
Equação 4.6.....	92
Equação 4.7.....	92
Equação 4.8.....	93

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- A - Área da Seção Transversal do Corpo de Prova.
- Ab_{CAP} – Absorção de Água por Capilaridade
- Ab_{IMERSÃO} – Absorção por Imersão
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- Ac - variação da absorção capilar
- ASTM – American Standardization for Testing and Materials
- °C – Graus Celsius
- C₂S – Silicato dicálcico (belita)
- C₃S – Silicato tricálcico (alita)
- C₄AF – Ferroaluminato tetracálcico (ferrita)
- CAA – Concreto Autoadensável
- C-S-H - Silicato de cálcio hidratado
- D* - Coeficiente de Difusão em Regime Não Estacionário
- Demat - Laboratório de Engenharia de Materiais
- EFNARC – European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems
- FRX – Fluorescência de Raios X
- IAP - Índice de Atividade Pozolânica com Cimento Portland;
- IFRN - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
- I_V - Índices de Vazios
- Labcim - Laboratório de Cimentos
- LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Portugal)
- LVDT - Transformador Diferencial Variável Linear
- m_{contato} - Massa da Amostra que Permanece com Uma das Faces em Contato com a Água Durante um Período de Tempo Especificado no Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade
- MK – Metacaulim
- ME_{REAL} - Massa Específica Real
- m_s - Massa da Amostra da Amostra Seca em Estufa, Assim que Atingiu a Temperatura Ambiente

ME_{SECA} - Massa Específica da Amostra Seca

ME_{SAT} - Massa Específica da Amostra Saturada

MPa - megaPascal

NBR – Norma Brasileira Registrada

PCA – Pozolana da Casca de Arroz

PCI – Poder Calorífico Inferior

PE - Pernambuco

P_{TOTAL} - porosidade total

RBC - Resíduo da Biomassa da Cana-de-Açúcar

R_c – Parâmetro de Viscosidade do Concreto Autoadensável

RN – Rio Grande do Norte

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Γ_c – Parâmetro de Deformabilidade

CAPÍTULO 1

1. Introdução

O concreto é o produto industrializado mais utilizado pela sociedade. Misturas de concreto para construção em geral são compostas, em média, de 12% de cimento Portland, 8% de água, e 80% de agregados miúdos e graúdos, em massa (Mehta & Monteiro, 2014). O maior impacto é causado pela produção do cimento Portland, material indispensável ao concreto.

Cimento Portland é um produto industrializado que não é apenas consumidor de energia (4 GJ / tonelada de cimento), mas é também o responsável por grandes emissões antropogênicas de CO₂, cerca de 7% do total de emissões no mundo (Mehta & Monteiro, 2014).

O uso de materiais suplementares é uma boa medida para reduzir o consumo de cimento. Nos dias atuais, as adições minerais normalmente utilizadas são resíduos de indústrias, que seriam normalmente descartados em grandes quantidades em locais impróprios, gerando risco de contaminação do solo e fontes de água (Dal Molin, 2011).

Adições como cinzas volantes, escória de alto forno, sílica ativa, metacaulim, pozolana da casca de arroz (PCA) e resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC), incorporadas na produção de cimentos ou concretos, reduzem o impacto ambiental causado pelos resíduos e a poluição gerada na produção do cimento.

Devido à crescente demanda por energias renováveis e combustíveis menos poluentes, a quantidade de resíduo de biomassa da cana-de-açúcar da indústria sucroalcooleira tem aumentado significativamente.

A safra brasileira de cana-de-açúcar em 2014/2015 foi de 634,8 milhões de toneladas, sendo produzidos, nesse mesmo período, 59,4 milhões de toneladas na região Norte/Nordeste (Conab, 2015).

Segundo dados do relatório da FIESP/CIESP (2001) cada tonelada de cana produzida resulta em aproximadamente 6,2 kg de cinza residual, totalizando aproximadamente, segundo dados apresentados pela Conab (2015), 3,93 milhões de toneladas de cinza de bagaço geradas na safra de 2014/2015.

A produção de arroz na safra brasileira 2014/2015 foi de 12.448,6 mil toneladas, um aumento de 2,7% em relação à safra anterior, sendo 694,7 mil toneladas produzidas na região Nordeste (Conab, 2015)¹.

Cada tonelada de arroz colhido produz cerca de 200 kg de casca que, na combustão, produz aproximadamente 40 kg de cinza (Mehta & Monteiro, 2014), totalizando aproximadamente 479,9 mil toneladas de cinza geradas na safra de 2014/2015.

Diante desse contexto, para tentar amenizar os impactos ambientais gerados pela indústria da construção civil, muitos trabalhos têm estudado alternativas de dosagens com baixas taxas de cimento e incorporação de resíduos em concretos (Corinaldesi & Moriconi, 2009; Isaia *et al.*, 2012; Bacarji *et al.*, 2013), atualmente, muitos deles, em concretos autoadensáveis (Celik *et al.*, 2015; Adekunle *et al.*, 2015; Ling & Kwan, 2016).

O concreto autoadensável (CAA) é definido como um concreto fluido que pode ser moldado in loco sem vibração para formar um produto livre de vazios e falhas e que apresente também, capacidade de fluxo através do seu peso próprio preenchendo completamente as fôrmas e atingindo a compactação mesmo em estruturas densamente armadas. O concreto resultante é denso, homogêneo e com as mesmas propriedades de resistência e durabilidade de concretos convencionais compactados (EFNARC, 2005).

A principal diferença entre o concreto comum e o concreto autoadensável são as características reológicas superiores do último. Além de areia, agregados graúdos e cimento Portland comum ou composto, os materiais necessários para produzir CAA incluem superplastificantes, aditivos modificadores de viscosidade e adições minerais finas (Mehta & Monteiro, 2014). Seus materiais constituintes são responsáveis pela sua capacidade de se autoadensar, obtida com o equilíbrio entre alta fluidez e moderada viscosidade.

Devido sua elevada fluidez o concreto autoadensável precisa de um adequado controle da sua tendência à segregação. A resistência à segregação do CAA é resultado de uma adequada viscosidade, sendo as adições do tipo fillers recomendadas nesse controle.

As misturas de CAA utilizam aditivo superplastificante e adições minerais tipo filler e/ou modificadores de viscosidade, além de menor volume e menor dimensão máxima característica dos agregados graúdos, comparados aos usados nos concretos convencionais (Gomes, 2002).

A adição de materiais finos no CAA melhora diversas propriedades no estado fresco e endurecido. Os finos atuam como pontos de nucleação, ou seja, quebram a inércia do sistema, fazendo com que as partículas de cimento reajam mais rapidamente com a água. Obtém-se, assim, ganhos de resistência nas primeiras idades da mesma forma que, ao aumentar o pacote de partículas finas, cresce a compacidade da pasta, dificultando a penetração de agentes externos agressivos, melhorando a zona de transição (Tutikian & Dal Molin, 2008).

A utilização de adições minerais provenientes de resíduos industriais como componente do concreto, principalmente os denominados concretos especiais, tem crescido em vários países. Seu uso geralmente proporciona ao concreto melhores desempenhos das propriedades no estado endurecido, além de serem ecologicamente corretos, pois, aproveitam resíduos que seriam dispostos no meio ambiente. Os mais utilizados são os provenientes das indústrias metalúrgicas e termoelétricas, como a sílica ativa, cinzas volantes e escória de alto forno, além dos resíduos das cinzas das cascas de arroz e pó de calcário (Barros, 2008).

Com o refinamento dos poros, naturalmente as dosagens com elevados teores de adições nas misturas em substituição parcial do cimento, conferem ao concreto, além dos benefícios conhecidos pela simples redução do cimento, aumento significativo de durabilidade.

Algumas adições como a escória de alto forno e a cinza volante têm atividade pozolânica excelente, porém não são materiais disponíveis na região Nordeste do Brasil. Dessa forma, alguns estudos têm sido desenvolvidos utilizando adições viáveis quanto à produção e ao consumo na região.

O resíduo de biomassa da cana-de-açúcar (RBC) apresenta em sua composição alto teor de sílica, o que o torna uma fonte suplementar para uso como aditivo mineral ou pozolana para a produção de materiais cimentícios (Anjos, 2009). Os resultados do estudo da influência da finura do resíduo de biomassa da cana-de-açúcar na atividade pozolânica com a cal, realizado por Anjos *et al.* (2012) indicam que os resíduos podem ser classificados como pozolanas classe E. A atividade pozolânica foi verificada pela formação de silicato de cálcio hidratado através da análise de difração de raios X realizada na pasta com resíduo moído por 3 horas e 30 minutos.

Assim como o RBC, a pozolana da casca de arroz (PCA) é um material residual de origem natural e que tem potencial de produção no Nordeste. O cultivo de arroz nessa região, na safra 2014/2015, representa aproximadamente 5,6% da produção nacional. A PCA, com características de pozolanidade reconhecidas, foi utilizada também como comparativo ao RBC.

A PCA, material altamente pozolânico, é resultante da combustão da casca de arroz, usada pelas indústrias beneficiadoras de arroz como fonte calorífica na geração de calor e vapor necessários nos processos de secagem e parboilização dos grãos (Dal Molin, 2011). Pode ser resultante também do processo de geração de outras formas de energia, como energia elétrica, em usinas termelétricas, ou ainda, de processos de calcinação para obtenção de sílica com alto teor de pureza (Santos, 2006).

A utilização da PCA como adição, para a produção de concretos, influencia beneficemente tanto os aspectos relacionados à resistência mecânica, como os relacionados à durabilidade (Santos, 2006). Segundo Silveira & Dal Molin (1995), ao serem adicionadas ao cimento ou parte deste, a PCA, tal como outras pozolanas, modifica a microestrutura da pasta do cimento, pois ao se combinarem com o hidróxido de cálcio livre, geram uma pasta menos heterogênea, mais compacta, mais resistente e com menor calor de hidratação.

Assim como o RBC e a PCA, o metacaulim tem potencial de produção no Rio Grande do Norte, devido a presença de boa reserva de caulim (Wilson *et al.*, 1998).

O metacaulim é uma adição mineral aluminossilicosa obtida, normalmente, da calcinação, entre 600°C e 900°C, de alguns tipos de argilas, como as caulínicas e os caulins de alta pureza (Dal Molin, 2011).

Oliveira (2007) constatou que a substituição de cimento por metacaulim promoveu aos concretos avaliados uma microestrutura compacta e homogênea, além de melhorias no desempenho mecânico e na durabilidade dos concretos, sendo a maior eficiência com o teor de substituição do cimento por metacaulim em 15%.

1.1 Objetivos da pesquisa

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar as propriedades reológicas, físicas, mecânicas e de durabilidade dos concretos autoadensáveis com a incorporação de altos teores de pozolana da casca de arroz, de resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o comportamento reológico do CAA com adições de metacaulim, RBC e PCA, totalizando teores de 40% e 50% de substituição do cimento;
- Analisar como a interação entre os materiais utilizados influencia no comportamento físico e mecânico do concreto;
- Avaliar a penetração de íons cloreto dos concretos autoadensáveis com elevados teores de adições minerais;
- Avaliar a eficiência das adições quanto à sustentabilidade.

1.2 Justificativa

O setor de construção é responsável por cerca de 40% do consumo global de energia e mais de 30% das emissões de gases de efeito global (Kusuma, 2015).

Atualmente é iniciada uma era em que a durabilidade e a sustentabilidade dos materiais serão consideradas mais importantes que a alta resistência inicial ou a alta velocidade de produção, que, por razões financeiras, tem sido o principal objetivo da indústria (Mehta & Monteiro, 2014).

A recente tendência na indústria da construção é usar fontes alternativas de materiais de construção, que podem substituir a utilização de matérias-primas naturais com a finalidade de reduzir o impacto ambiental em termos de consumo de energia, poluição, eliminação de resíduos e aquecimento global (Behera *et al.*, 2014). Nesse contexto, tem se desenvolvido diversos estudos de métodos para a diminuição do impacto ambiental da construção (Cordeiro, 2006; Anjos *et al.*, 2014; Behera *et al.*, 2014; Nguyen *et al.*, 2016).

Uma vez que o concreto, devido à sua durabilidade favorável e a relação de custo, é o material de construção mais usado, é alta prioridade na tecnologia de concreto para melhorar a sustentabilidade do concreto com a substituição parcial do cimento Portland por materiais suplementares de cimentação.

Dentro deste contexto, nos últimos anos inúmeras pesquisas têm sido realizadas visando à substituição parcial do cimento por materiais suplementares, buscando a redução do consumo de cimento.

Uma das principais vantagens do uso do CAA no presente estudo é a possibilidade de se utilizar grande quantidade de finos na sua composição, o que propicia substituições parciais do cimento das dosagens por resíduos industriais como: pozolana da casca de arroz, metacaulim e resíduo da biomassa da cana-de-açúcar. É necessário, porém, analisar os aspectos técnicos dos concretos estudados, pois, segundo Müller *et al.* (2014), reduzir o impacto ambiental durante a produção concreto sem olhar para o impacto sobre o desempenho e durabilidade do material seria insuficiente.

A obtenção de produtos cimentícios contendo cinza residual da casca de arroz é uma alternativa para solucionar o problema da disposição das cinzas no meio ambiente, além de gerar um material de maior valor agregado (Cordeiro *et al.*, 2009). O mesmo acontece com o RBC, que por se tratar de um resíduo regional, é objeto de maior atenção durante o estudo.

1.3 Organização da Dissertação

O trabalho encontra-se organizado em 5 capítulos, incluindo o Capítulo 1 de introdução ao tema. No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão sobre sustentabilidade da indústria cimenteira e do concreto, adições minerais, concretos com altos teores

de adições, concreto autoadensável e sobre a determinação do Coeficiente de Difusão dos Cloretos por migração em regime não estacionário.

A apresentação do projeto experimental, onde são relatados os materiais utilizados no estudo e é feita a descrição metodológica utilizada na caracterização dos materiais, na produção e estudo dos concretos, é realizada no Capítulo 3.

No Capítulo 4, apresentam-se os resultados da caracterização dos materiais utilizados e dos concretos produzidos e as discussões pertinentes.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho.

Por fim, em anexo são apresentadas as distribuições granulométricas do cimento e das adições utilizadas, além das tabelas com detalhamento dos resultados obtidos nas determinações dos coeficientes de difusão em regime não estacionário

CAPÍTULO 2

2. Revisão bibliográfica

2.1 Sustentabilidade na Indústria Cimenteira e do Concreto

Cimento Portland, o principal aglomerante hidráulico usado nas misturas do concreto moderno, é um produto industrializado que não é apenas consumidor de energia (4 GJ / tonelada de cimento), mas é também o responsável por grandes emissões antropogênicas de CO₂, cerca de 7% do total de emissões no mundo (Mehta & Monteiro, 2014).

Recentemente, a indústria do cimento tem conseguido significativos progressos, especialmente no campo do desenvolvimento sustentável. As cimenteiras estão reduzindo a emissão de poluentes e resíduos industriais e economizando energia através da utilização da adição mineral como a escória, o fíler e a pozolana (Macedo, 2009).

A tecnologia de produção de cimento irá sem dúvida ser desenvolvida ainda mais nos próximos anos. Os desafios que permanecem para a indústria de cimento são: reduzir os custos de produção, e manter um forte foco em qualidade, desempenho e impacto do cimento na durabilidade do concreto (Schneider, 2015).

Várias estratégias têm sido seguidas, separadamente ou em combinação, para melhorar a sustentabilidade do concreto. Estas estratégias consistem na incorporação de materiais reciclados em concreto, otimização das composições, reduzindo as emissões de CO₂, diminuição do consumo de cimento Portland e substituição parcial do cimento Portland por resíduos, aumentando a durabilidade do concreto, prolongando a sua vida útil e reduzindo recursos de consumo a longo prazo (Long *et al.*, 2015).

A ampla utilização do concreto na construção civil tem impactado significativamente o consumo de energia e qualidade ambiental. Felizmente, o

surgimento de concreto sustentável, muitas vezes feitas com resíduos alternativa ou reciclado materiais, oferece grandes oportunidades para melhorar a sustentabilidade de concreto (Jin *et al.*, 2015).

2.2 Adições Minerais

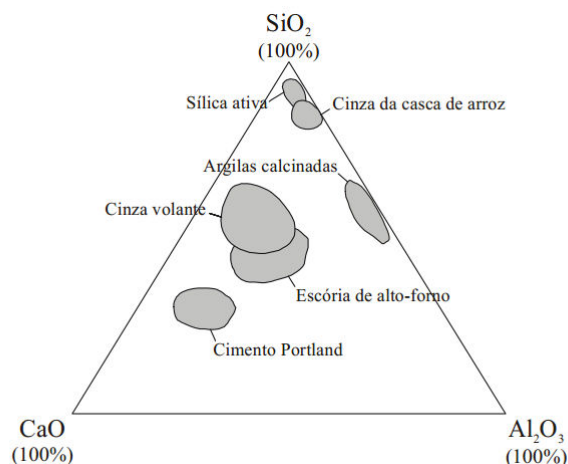
As adições minerais podem ser definidos como materiais utilizados conjuntamente com o cimento Portland com o objetivo de proporcionar um desempenho tecnológico diferenciado a produtos cimentícios. Em alguns casos, pode haver redução dos custos de produção em função da substituição de uma parcela de clínquer por materiais energeticamente menos nobres, uma vez que as adições minerais são obtidas normalmente a partir de resíduos industriais (Cordeiro, 2006).

Além dos benefícios tecnológicos e econômicos em alguns casos, o uso de adições minerais pode reduzir impactos ambientais, tendo em vista o aproveitamento de resíduos, a preservação das jazidas de calcário e argila e a menor emissão de CO₂ e outros gases intensificadores do efeito estufa (CO, CH₄, NO_x, NO₂ e SO₂), gerados durante a fabricação do cimento Portland (Cordeiro, 2006).

As adições minerais são geralmente materiais silicosos finamente divididos, normalmente adicionados ao concreto em quantidades variadas, desde 6 até 70% por massa do material cimentício total. Embora as pozolanas naturais em estado bruto ou após ativação térmica sejam usadas em algumas partes do mundo, devido a aspectos econômicos e ambientais, muitos subprodutos industriais têm se tornado fonte primária de adições minerais no concreto (Mehta & Monteiro, 2014).

As adições minerais mais comumente empregados em conjunto com o cimento Portland compreendem desde pozolanas altamente reativas, como sílica ativa, argilas calcinadas e cinza da casca de arroz, até materiais de menor reatividade, como cinza volante e escória granulada de alto-forno. De modo a possibilitar uma melhor visualização da composição química dos diferentes materiais retrata-se, na figura 2.1, as distribuições aproximadas dos óxidos SiO₂, Al₂O₃ e CaO que compõem as adições minerais e o cimento Portland (Cordeiro, 2006).

Figura 2.1 Representação aproximada das faixas composicionais de adições minerais e cimento Portland no sistema $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$. Fonte: Cordeiro (2006).



Outra adição mineral que vem sendo analisada para uso em materiais cimentícios é a cinza obtida a partir resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (Hernández *et al.*, 1998, Cordeiro, 2006; Frías *et al.*, 2007; Anjos, 2009). Os estudos iniciais desse resíduo foram realizados por Hernández *et al.* (1998), que verificou que a cinza do bagaço da cana-de-açúcar produzida em caldeiras da indústria do açúcar e álcool pode ser classificada como um provável material pozolânico.

As adições minerais podem desempenhar um papel importante para a resistência e durabilidade do concreto, tanto física quanto quimicamente (Tutikian & Dal Molin, 2008).

O efeito físico pode ser desdobrado em três ações principais: o efeito fíler, que é o aumento da densidade da mistura resultante do preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas das adições; o refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento, causado pelas pequenas partículas das adições que podem agir como pontos de nucleação para os produtos de hidratação; e a alteração da microestrutura da zona de transição, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre que, normalmente, fica retido sob os agregados (Tutikian & Dal Molin, 2008).

Como a reação pozolânica envolvendo adições minerais causa um efeito físico de refinamento dos poros que reduz a permeabilidade do concreto, tanto os estudos de campo como os de laboratório mostram melhoria considerável na durabilidade química do concreto contendo essas adições (Mehta & Monteiro, 2014).

Já o efeito químico das adições minerais ocorre a partir da capacidade de reação com o hidróxido de cálcio - Ca(OH)_2 composto frágil e solúvel que se forma durante a hidratação do cimento Portland. Dele deriva um composto resistente, o C-S-H (silicato hidratado de cálcio), que ocupa os vazios de maiores dimensões existentes na pasta de cimento ou na zona de transição, aumentando o desempenho mecânico e a durabilidade do concreto (Tutikian & Dal Molin, 2008).

2.2.1 Sílica da Casca de Arroz e seu emprego como adição mineral

Cascas de arroz, também chamadas de palhas de arroz, são carapaças produzidas durante a operação de beneficiamento do arroz colhido. Como são volumosas, as cascas representam um grande problema de acúmulo para moinhos de arroz centralizados (Mehta & Monteiro, 2014).

Cada tonelada de arroz colhido produz cerca de 200 kg de casca que, na combustão, produz aproximadamente 40 kg de cinza (Mehta & Monteiro, 2014).

A questão ambiental de poluição dos rios e solos, juntamente com a necessidade de minimização das emissões globais de gás carbônico antropogênico, é um ponto favorável à utilização de resíduos como biomassa. A casca de arroz (com 12% de água), por exemplo, tem um poder calorífico inferior (PCI) de 3300 kcal/kg (Cordeiro, 2009).

Devido ao seu poder calorífico e custo praticamente nulo, a casca de arroz vem cada vez mais substituir a lenha empregada na geração de calor e vapor, necessários para os processos de secagem e parbolização dos grãos (Cordeiro, 2009).

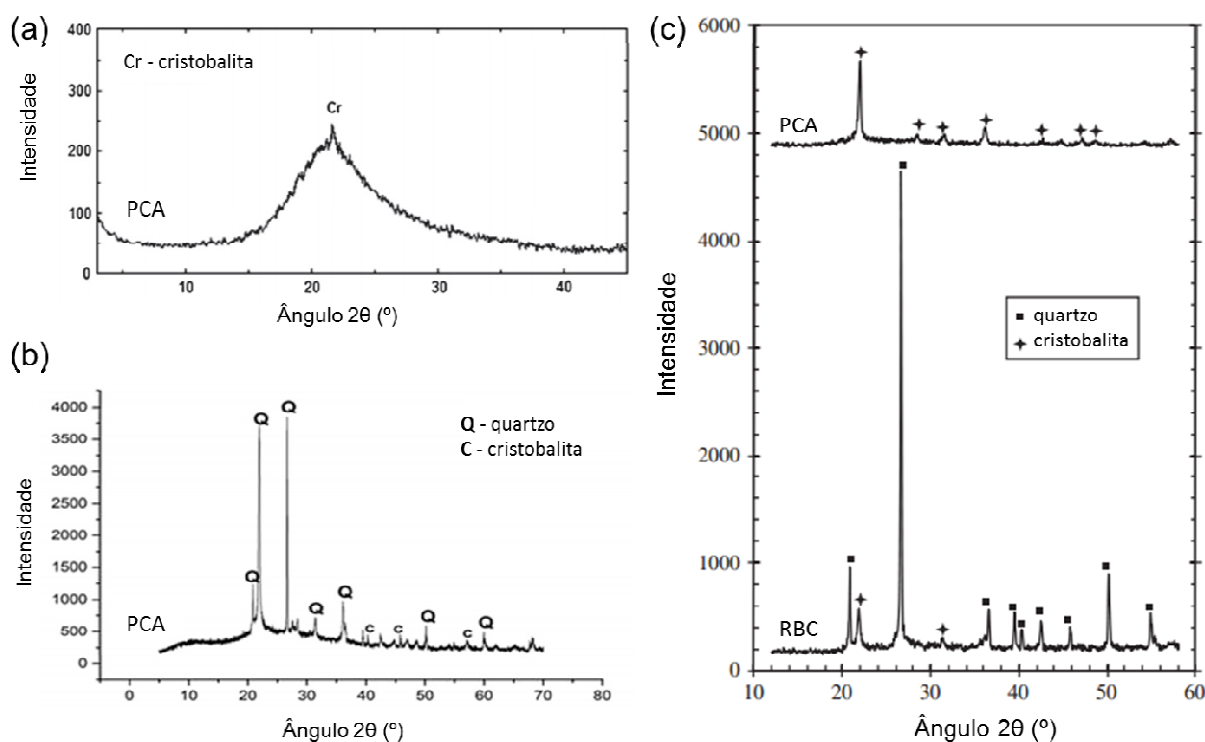
A composição química média e os resultados de difração de raios X da cinza da casca de arroz obtidos por diferentes pesquisadores são mostrados na tabela 2.1 e na figura 2.2, respectivamente.

O resultado do ensaio difração de raios-X, obtido por Gastaldini *et al.* (2014), apresentou uma grande quantidade de materiais amorfs na composição da cinza da casca do arroz (figura 2.2 (a)).

Tabela 2.1 Composição de cinzas da casca de arroz determinadas por Della *et al.* (2002), Cordeiro *et al.* (2012), Kannan & Ganesan (2014), Le *et al.* (2015) e Chopra *et al.* (2015).

Composição	Teor (%)				
	Della <i>et al.</i> (2002)	Cordeiro <i>et al.</i> (2012)	Kannan & Ganesan (2014)	Le <i>et al.</i> (2015)	Chopra <i>et al.</i> (2015)
SiO ₂	94,95	82,6	87,89	87	94
K ₂ O	0,94	-	3,43	2,63	0,5
Al ₂ O ₃	0,39	8,9	0,19	0,8	1,2
SO ₃	-	-	-	0,4	0,3
CaO	0,54	2,2	0,73	1,2	2,93
MgO	0,9	-	0,47	0,6	0,6
Fe ₂ O ₃	0,26	3,6	0,28	0,4	0,37
Na ₂ O	0,25	-	0,66	0,4	-
MnO	0,16	-	-	-	-
P ₂ O ₅	0,74	-	-	-	-

Figura 2.2 Difração de raios X da PCA determinados por (a) Gastaldini *et al.* (2014) (b) Chopra *et al.* (2015) (c) Cordeiro *et al.* (2012).



As análises de DRX da cinza da casca de arroz realizadas por Chopra *et al.* (2015) e Cordeiro *et al.* (2012) obtiveram resultados de um material composto

principalmente de sílica amorfa, com uma menor parcela de sílica cristalina observada na forma de cristobalita. Cordeiro *et al.* (2012) atribuiu a presença predominante do quartzo e cristobalita à existência de contaminação por areia.

Diversos estudos (Cordeiro *et al.*, 2012; Gastaldini *et al.*, 2014; Chopra *et al.*, 2015) comprovam que a adição de PCA no concreto proporciona aumento ou manutenção da resistência à compressão, refinamento dos poros e diminuição da penetração de íons cloreto devido à sua boa atividade pozolânica, principalmente em teores de 20%.

2.2.2 Cinza da Biomassa da Cana-de-Açúcar e seu emprego como adição mineral

Grande parte da massa crua de cana de açúcar torna-se resíduos durante o processo de refino (Sua-iam & Makul, 2013).

A cinza da biomassa da cana-de-açúcar é obtida a partir da queima do bagaço nas fornalhas das caldeiras das usinas produtoras de açúcar e álcool. As figuras 2.3 e 2.4 apresentam respectivamente o ciclo de produção da cana-de-açúcar e o usos possíveis para o resíduo da biomassa da cana-de-açúcar segundo Anjos *et al.* (2012).

Figura 2.3 Ciclo de geração do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar.



A cinza de biomassa, proveniente do resíduo da queima do bagaço de cana-de-açúcar da indústria sucroalcooleira tem despertado interesse devido sua disponibilidade crescente no mercado nacional e por se apresentar como fonte

suplementar de aditivo mineral para a produção de materiais cimentícios (Anjos, 2009; Borja, 2011).

Os principais resíduos sólidos gerados no processo produtivo do setor sucroalcooleiro são a palha, o bagaço da cana, as cinzas da caldeira (queima de bagaço) e embalagens de defensivos agrícolas e agrotóxicos (FIESP/CIESP, 2001).

Figura 2.4 Processo de geração do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar com proposta de utilização.

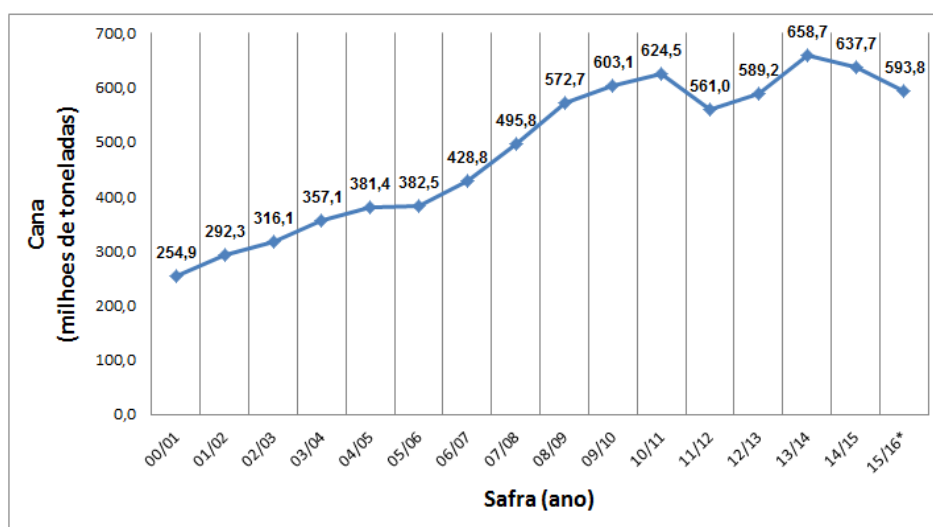


Segundo dados do relatório da FIESP/CIESP (2001) cada tonelada de cana produzida resulta em aproximadamente 6,2 kg de cinza residual, totalizando aproximadamente, segundo dados apresentados pela Conab (2015), 3,93 milhões de toneladas de cinza de bagaço geradas na safra de 2014/2015.

Dessa forma, de acordo com dados da figura 2.5, como na safra de 2013/2014 foram produzidos cerca de 637,7 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, é possível estimar que houve uma produção de aproximadamente 165,8 milhões de toneladas de resíduos de bagaço e 3,78 milhões de toneladas de resíduos de cinzas.

O resíduo da biomassa da cana-de-açúcar é um provável material pozolânico, cuja atividade é influenciada pelas altas temperaturas e de combustão incompleta que ocorrem nas caldeiras, que em alguns casos pode ser desprezível. Os principais fatores que afetam a reatividade são o grau de cristalinidade da sílica presente nas cinzas e a presença de impurezas, tais como o carbono e o material não queimado. Tais impurezas poderiam limitar o contato entre sílica e o hidróxido de cálcio reativo para formar compostos estáveis (Hernández *et al.*, 1998).

Figura 2.5 Produção de cana-de-açúcar das safras de 2000 a 2016.



Fonte: Autora (grafico produzido com dados da DCAA/SPA/EMBRAPA) (*) Valores atualizados em 01/12/2015)

Segundo Frías *et al.* (2007) a cinza do bagaço da cana-de-açúcar tem atividade pozolânica muito alta quando queimada de forma controlada a temperatura de 800°C. Os produtos da reação entre o RBC e cal, formados durante a reação pozolânica não são compostos cristalinos, com base na interpretação dos dados de DRX, no entanto, as curvas TG e DTA sugeriram a formação principalmente de silicato de cálcio hidratados (C-S-H) (Frías *et al.*, 2007).

A composição química média e os resultados de difração de raios X do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar, obtidos por diferentes pesquisadores, são mostrados na tabela 2.2 e na figura 2.6, respectivamente.

Investigações preliminares com cinza de bagaço de cana demonstram que apresenta a composição química adequada para aplicação como uma pozolana, principalmente no que diz respeito ao seu elevado teor de sílica e na presença de sílica amorfa (Hernández *et al.*, 1998; Frías *et al.*, 2007). No entanto, o RBC

normalmente apresenta a distribuição de tamanho de partícula variável e grossas, de modo que requer o uso de moagem ultrafina para transformar este resíduo industrial em uma mistura mineral (Cordeiro, 2008).

Tabela 2.2 Composição de cinzas de biomassa da cana-de-açúcar determinadas por Hernández (1998), por Massazza (2004), Cordeiro (2006), Frías *et al.* (2007) Anjos (2009) e Jiménez-Quero (2013).

Composição	Teor (%)					
	Hernández <i>et al.</i> (1998)	Massazza (2004)	Cordeiro (2006)	Frías <i>et al.</i> (2007)	Anjos (2009)	Jiménez- Quero <i>et al.</i> (2013)
SiO ₂	72,74	75	78,34	70,2	70,02	56,37
Al ₂ O ₃	5,26	6,7	8,55	1,93	5,35	14,61
Fe ₂ O ₃	3,92	6,3	3,61	2,09	9,19	5,04
TiO ₂	0,32	-	0,5	0,02	0,47	0,96
CaO	7,99	2,8	2,15	12,2	3,15	2,36
MgO	2,78	1,1	1,65	1,95	2,63	1,43
SO ₃	0,13	-	-	4,1	2,26	-
K ₂ O	3,47	2,4	3,46	3,05	2,03	3,29
Na ₂ O	0,84	1,1	0,12	0,5	-	-
P ₂ O ₅	1,59	4	1,07	1,4	-	0,85
PF	0,77	0,9	0,42	1,81	18,9	-
Fe	-	-	-	-	-	4,38
MnO	-	-	-	-	-	0,18

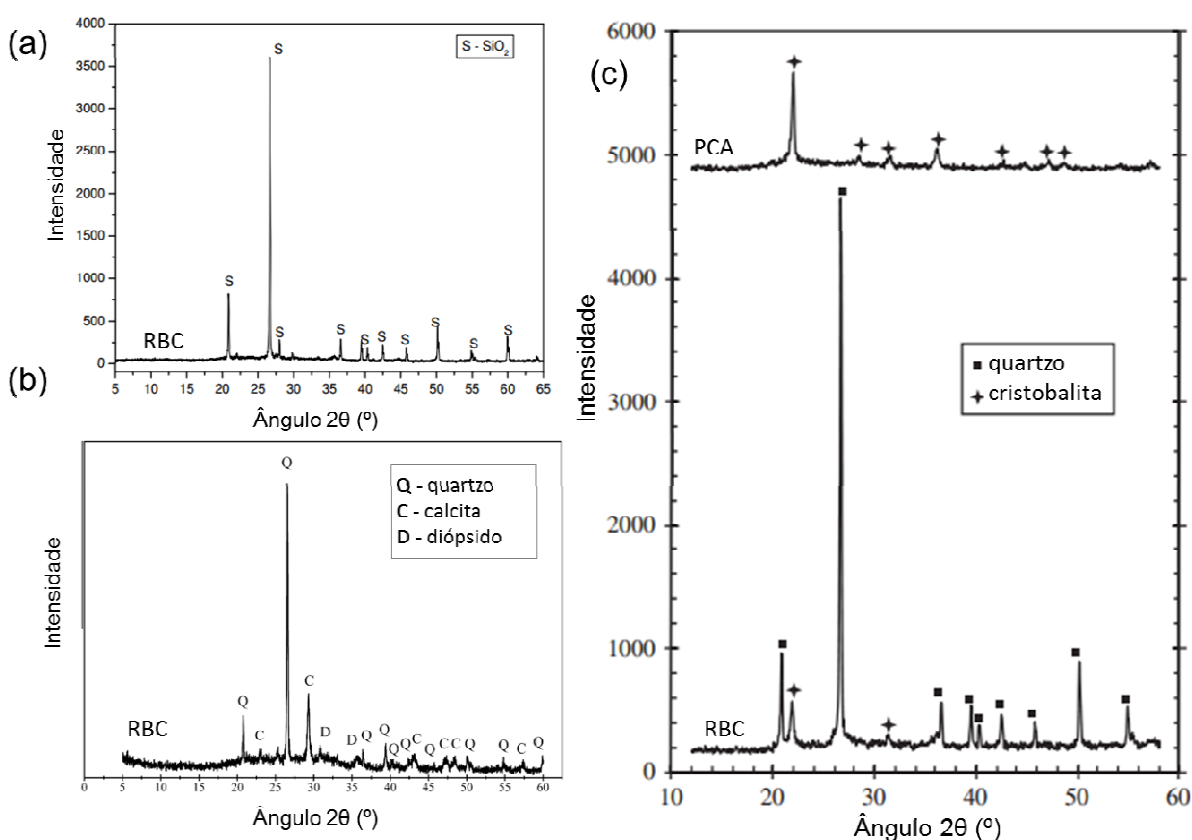
A cinza da biomassa da cana de açúcar pode manter a resistência à compressão, proporcionar refinamento dos poros através do efeito filler e aumento da resistência à penetração de íons cloreto pela presença de atividade pozolânica (Cordeiro *et al.*, 2012).

Anjos (2009) avaliou a adição do resíduo de biomassa da cana-de-açúcar em pastas para cimentação de poços petrolíferos produtores de óleos pesados. Os resultados do estudo concluíram que a cinza de biomassa da cana-de-açúcar obtida na forma residual no município de Arêz no Rio Grande do Norte, ou seja, cinza de biomassa obtida sem controle rigoroso de temperatura de queima, necessita de uma moagem adequada para ser utilizada como aditivo mineral. A moagem empregada neste trabalho fez com que a cinza de biomassa atendesse a todos os limites

químicos e físicos exigidos pela norma NBR 12653 (2014) para materiais pozolânicos, se enquadrando como pozolana classe E. No estudo, Anjos (2009) obteve área superficial do RBC de 43,04m²/g.

Foi verificada também, por difração de raios X, que a cinza de biomassa apresenta-se na forma cristalina, o que não beneficia a reação pozolânica, no entanto após a moagem a cinza apresentou diâmetros de grãos muito menores que o cimento Portland especial utilizado, o que favoreceu a atividade pozolânica da cinza de biomassa. Esta atividade pozolânica foi determinada em pastas de cal-cinza, sendo com isso possível comprovar, através de ensaios de difração de raios X, a formação de silicato de cálcio hidratado proveniente da reação da cinza com o hidróxido de cálcio presente na cal (Anjos, 2009).

Figura 2.6 Difração de raios X do RBC determinados por
(a) Anjos (2009) (b) Moraes *et al.* (2015) (c) Cordeiro *et al.* (2012).



Através do difratograma de raios-X da cinza residual da cana-de-açúcar moída (figura 2.6 (a)), realizado por Anjos (2009), é possível observar uma alta cristalinidade da cinza. Anjos (2009) verificou que a cinza, mesmo com alto teor de

sílica (SiO_2) cristalina, pode apresentar atividade pozolânica quando finamente moída.

Moraes *et al.* (2015) encontrou no RBC características de material amorfo, sendo a presença do quartzo, calcita e diópsido (figura 2.6 (b)), identificados como impurezas, provavelmente, a partir do solo retido durante a colheita da cana.

Cordeiro *et al.* (2012) detectou alto teor de sílica amorfa e cristalina no DRX do RBC (figura 2.6 (c)), atribuindo, também, a cristalinidade à areia de contaminação, observada pela presença predominante do quartzo e da cristobalita.

2.2.3 Metacaulim e seu emprego como adição mineral

É composta por argila caulinítica de alta pureza calcinada em $650\text{-}800^\circ\text{C}$ para aumentar a atividade pozolânica (Mehta & Monteiro, 2014).

Segundo Dal Molin (2011), quando a caulinita é submetida às temperaturas de calcinação, ocorre a remoção dos íons hidroxila da sua estrutura cristalina, ocasionando a destruição do seu arranjo atômico. Forma-se, então, um componente amorfo e de grande instabilidade química, denominado metacaulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), que é responsável pela atividade pozolânica, com formação predominante de C-S-H e C_4AH_x .

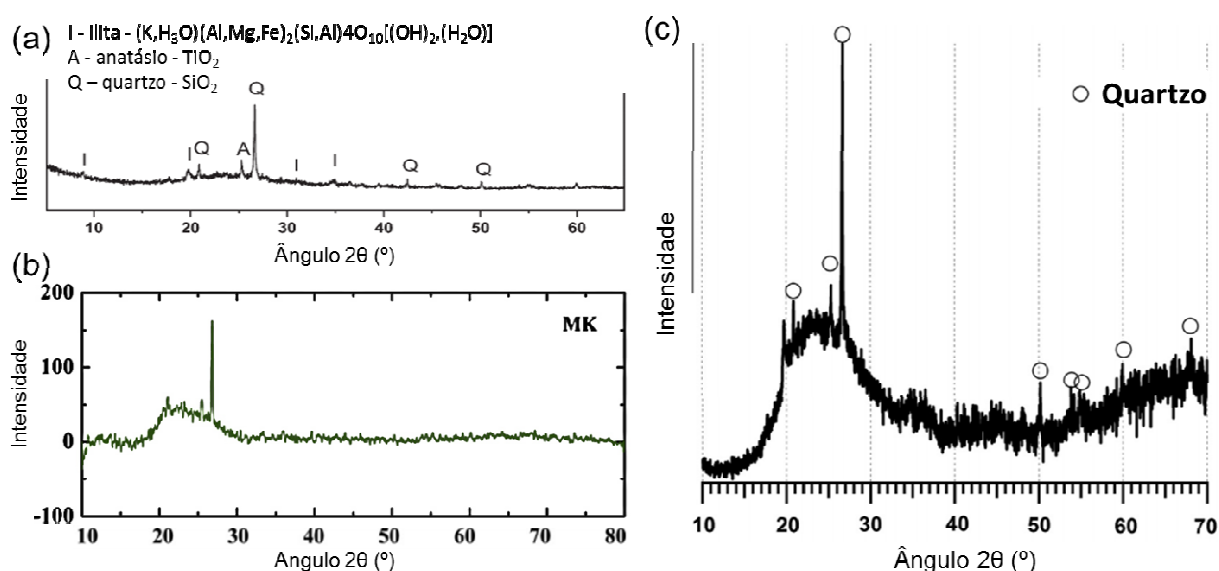
A composição química média e os resultados de difração de raios X do metacaulim, obtidos por deferentes pesquisadores, são mostrados na tabela 2.3 e na figura 2.7, respectivamente.

A utilização de argilas calcinadas, na forma de metacaulim, como adição pozolânica em argamassa e concretos, tem sido alvo de um interesse considerável nos últimos anos. Grande parte deste interesse é justificado pelo fato de o metacaulim conseguir remover o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento, o qual está associado a uma fraca durabilidade. A sílica e alumina presentes no metacaulim numa forma ativa iram, reagir com o hidróxido de cálcio na presença de água, promovendo assim a sua remoção e respectiva melhoria da durabilidade (Campos, 2012).

Tabela 2.3 Composição do metacaulim determinadas por Kannan & Ganesan (2014), por Barbhuiya *et al.* (2015), Li *et al.* (2015), Andrejkovičová *et al.* (2016) e Kavitha *et al.* (2016).

Composição	Teor (%)				
	Kannan & Ganesan (2014)	Barbhuiya <i>et al.</i> (2015)	Li <i>et al.</i> (2015)	Andrejkovičová <i>et al.</i> (2016)	Kavitha <i>et al.</i> (2016)
SiO ₂	51,8	52,1	57,37	54,39	52,24
Al ₂ O ₃	43,75	41	38,63	39,36	43,18
Fe ₂ O ₃	0,82	4,3	0,77	1,75	0,6
K ₂ O	0,02	0,62	0,49	1,03	-
CaO	0,09	0,09	0,03	0,1	1,03
MgO	0,03	1,36	-	0,14	0,61
Na ₂ O	0,07	0,01	0,39	-	-
TiO ₂	-	-	0,4	1,55	-
SO ₃	-	-	0,15	-	-
Na ₂ O	-	-	0,39	-	-
P ₂ O ₅	-	-	0,61	0,06	-

Figura 2.7 Difração de raios X do RBC determinados por (a) Andrejkovičová, *et al.* (2016) (b) Kannan & Ganesan (2014) (c) Li *et al.* (2015).



Andrejkovičová, *et al.* (2016) identificaram as fases cristalinas da amostra de metacaulim com a presença de ilita, quartzo e anatásio. Segundo os autores, o padrão de halo difuso entre $2\theta = 18$ e 30° indica a presença de material amorfo.

Os difratogramas do metacaulim utilizado por Kannan & Ganesan (2014) foram também numa forma amorfa, mas ligeiramente desviado para uma forma cristalina com um ângulo de $26,8092^\circ$. Os resultados de Li et al. (2015) também caracterizaram o metacaulim como um material basicamente amorfo, com a presença de picos de quartzo.

2.3 Concretos com Elevados Teores de Adições

Isaia & Gastaldini (2004) observam que considerados altos teores de adições valores de substituição maiores ou iguais a 50%, porém Mohammed *et al.* (2013) publicaram estudo considerando que 33% de adições podem ser consideradas como alta proporção de substituição.

No estudo desenvolvido por Cordeiro *et al.* (2012) foi procedida a investigação da influência do RBC e da PCA nas propriedades de concretos, tais como resistência à compressão aos 28, 90 e 180 dias e penetração de cloretos pelo método ASTM C 1202 (2005). Foram produzidos dois concretos de referência, sendo um convencional (25MPa) e um de alta resistência (60MPa) e os demais concretos com 20% de substituição em massa de cada adição para cada concreto de referência e dois concretos contendo 20% de cada adição. Os resultados demonstraram que com a adição de RBC e PCA juntos, a resistência à compressão era mantida constante ou aumentada, quando comparada com as misturas de referência. Quando em separado a PCA se apresentou mais eficaz do que o RBC em causar aumento da resistência à compressão devido à sua maior atividade pozolânica.

Quanto à penetração por íons cloreto, no estudo de Cordeiro *et al.* (2012) os concretos com as duas adições apresentaram maior resistência à penetração. Para as misturas binárias, ambas diminuíram a penetração, consequência da atividade pozolânica de ambas as cinzas e do refinamento dos poros em relação aos concretos de referência, sendo o melhor comportamento apresentado pelo PCA, com cerca de 90% de redução da carga elétrica.

No estudo desenvolvido por Wongkeo *et al.* (2014) investigou-se a influência de altas concentrações de cinzas volantes, sílica ativa e cal na resistência à compressão e resistência ao ataque de cloretos em concretos autoadensáveis.

Foram usadas porcentagens de 40 a 70% de cinzas volantes e de 0 a 10% de sílica ativa em substituição ao cimento do concreto. Foram estudados os comportamentos dos concretos para diferentes fatores água/finos (0,3, 0,35 e 0,4), com consumos variando de 600 kg/m³ para o concreto de referência da composição com fator água/finos de 0,3 a 135 kg/m³ para o concreto com fator água/finos de 0,4 e com 70% de substituição.

Os resultados obtidos por Wongkeo *et al.* (2014) mostraram que a resistência à compressão diminuía conforme aumentava o teor de substituição dos concretos. Os melhores resultados de resistência encontrados foram para as composições ternárias com 90 dias. O estudo indicou também que as cinzas volantes e sílica ativa pode melhorar a resistência ao íon cloreto de CAA em altos teores de substituição do cimento Portland.

Mohammed *et al.* (2013) avaliaram as características microestruturais da matriz cimentícia e da zona de transição interfacial, além das propriedades de hidratação de dois concretos autoadensáveis com diferentes níveis de substituição do cimento por pó de calcário e cinzas volantes. Nos dois tipos de adições foram apresentadas diminuições na porosidade em escala semelhante, porém os resultados das avaliações microestruturais indicaram que as cinzas volantes são mais apropriadas para a produção de concretos autoadensáveis sustentáveis, justificado pela maior densidade da matriz cimentícia e sua melhor distribuição na zona de transição em relação ao concreto com adição de pó de calcário.

O estudo de Mohammed *et al.* (2013) também evidenciou que é possível produzir concretos de 50 a 60 MPa utilizando um teor de finos de 450Kg/m³, com 300kg de cimento e 150kg (33%) de adições.

Isaia & Gastaldini (2004) apresentaram um estudo de caso demonstrando que a substituição do cimento por cinza volante e escória granulada de alto-forno, em até 90%, acarretou diminuição de 5% no custo, 58% no consumo de energia, 81% na emissão de CO₂, e aumentou em 34% o índice médio de durabilidade. Para a realização do estudo foram produzidos concretos com igualdade de resistência de 40MPa aos 91 dias.

Gonçalves (2005) desenvolveu um estudo onde foram produzidos e caracterizados concretos de baixo impacto ambiental contendo metacaolinita,

resíduo da indústria cerâmica e areia artificial. As argilas calcinadas foram utilizadas como substitutas parciais do cimento Portland em teores que variaram de 10 a 40% (em massa) enquanto que a areia natural foi totalmente substituída pela areia artificial. Os resultados demonstraram que a substituição de cimento por metacaolinita no concreto promoveu um incremento na resistência à compressão de até 21% aos 28 dias, de até 24% aos 90 dias e de até 27% aos 180 dias, em relação à mistura de referência. Este incremento foi atribuído à formação de uma maior quantidade de compostos hidratados, promovendo maior densificação da matriz e da interface pasta-agregado. O estudo evidenciou que o uso do resíduo cerâmico como substituto parcial do cimento pode promover uma significativa redução no consumo de energia e nas emissões de CO₂ observados na indústria do cimento.

2.4 Concreto Autoadensável

2.4.1 Considerações gerais

O concreto autoadensável (CAA) é definido como um concreto fluido que pode ser moldado in loco sem vibração para formar um produto livre de vazios e falhas e que apresente também, capacidade de fluxo através do seu peso próprio preenchendo completamente as fôrmas e atingindo a compactação mesmo em estruturas densamente armadas. O concreto resultante é denso, homogêneo e com as mesmas propriedades de resistência e durabilidade de concretos convencionais compactados (EFNARC, 2005).

A principal diferença entre o concreto comum e o concreto autoadensável são as características reológicas superiores do último. Além de areia, agregados graúdos e cimento Portland comum ou composto, os ingredientes necessários para produzir CAA incluem superplastificantes, aditivos modificadores de viscosidade e adições minerais finas (Mehta & Monteiro, 2014). Seus materiais constituintes são responsáveis pela sua capacidade de se autoadensar, obtida com o equilíbrio entre alta fluidez e moderada viscosidade.

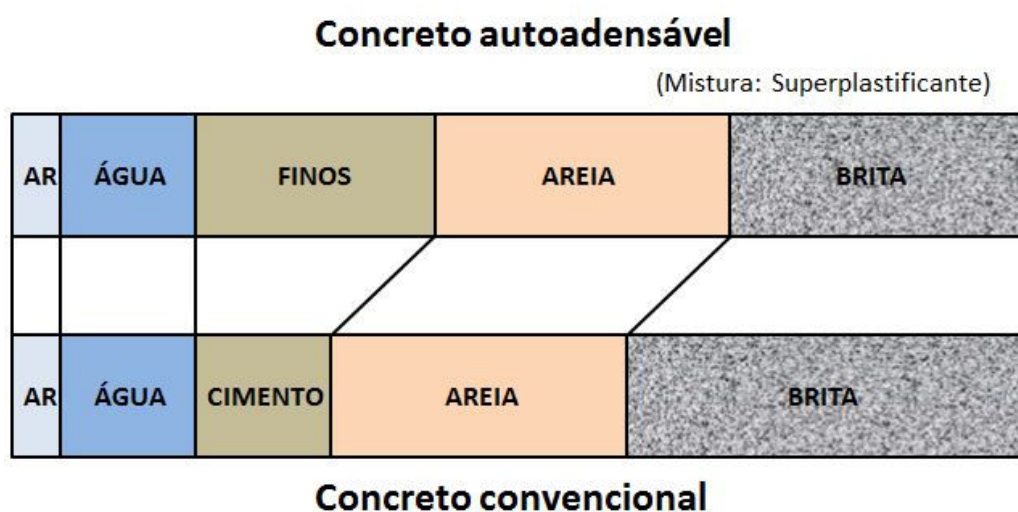
No adensamento tradicional, o concreto convencional é submetido à compactação por meio de vibração, tratando-se de um processo descontínuo que depende da distância para as fontes de vibração. O resultado da vibração é, portanto, um concreto na estrutura com compactação desigual e, por conseguinte,

com permeabilidades diferentes, o que aumenta a penetração seletiva de substâncias agressivas. O concreto autoadensável produzido de forma adequada deve estar livre de tais deficiências e resultar em um material de permeabilidade consistentemente baixa e uniforme, resultando em uma melhor durabilidade (EFNARC, 2005).

O conhecimento dos materiais constituintes, suas proporções e efeitos são muito importantes para o sucesso na obtenção das propriedades de autoadensabilidade do concreto, as quais são avaliadas através de ensaios específicos, principalmente no estado fresco. A capacidade de preenchimento, a habilidade de passagem por obstáculos e a resistência à segregação são as propriedades básicas que asseguram o autoadensamento do concreto (Gomes & Barros, 2009).

O método de dosagem de Okamura foi proposto de forma em que os agregados graúdos e miúdos são fixados e onde as características de autoadensabilidade podem ser atingidas pelo ajuste da relação água/finos e dosagem do aditivo. No método de dosagem de Okamura O agregado graúdo é fixado em 50% do volume sólido, o agregado miúdo em 40% do volume da argamassa, é utilizada uma baixa relação água/finos e realizada a dosagem de aditivo superplastificante, conforme ilustrado pela figura 2.8.

Figura 2.8 Comparação das proporções de mistura entre o concreto autoadensável e o concreto convencional. (Okamura & Ouchi, 2003).



O CAA tem que apresentar elevada fluidez e estabilidade da mistura, que são mensuráveis por meio de três propriedades básicas (RILEM, 2006 *apud* Repette, 2011):

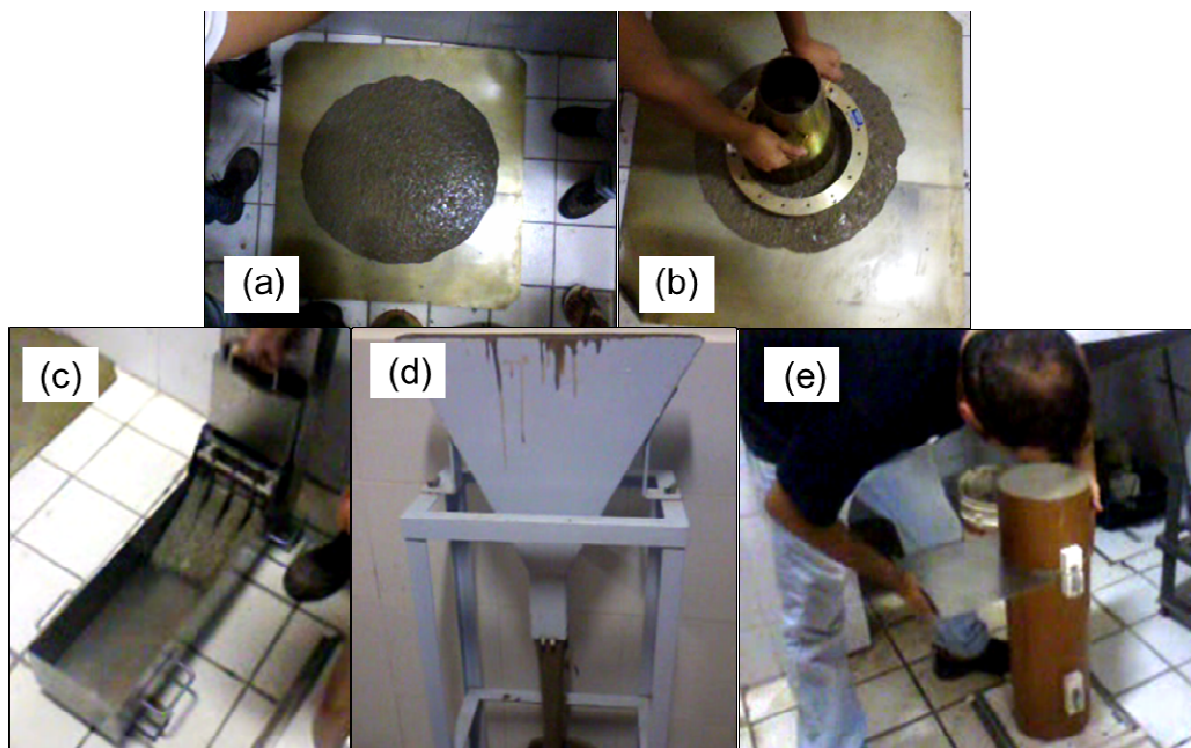
- Habilidade de preenchimento dos espaços – diz respeito à capacidade de preencher completamente as fôrmas e os espaços entre armaduras e entre as armaduras e a fôrma;
- Habilidade de passar por restrições – deve escoar por espaços restritos das fôrmas e armaduras sem ocorrência de bloqueio causado por restrição do movimento dos agregados;
- Capacidade de resistir à segregação – deve manter homogeneidade durante as etapas de mistura, transporte e lançamento, e não deve ocorrer segregação por afundamento dos agregados ou ascensão da água de mistura (exsudação) do concreto colocado nas fôrmas.

2.4.2 Ensaios e requisitos do CAA no estado fresco

Atualmente, segundo a EFNARC e em conformidade com a NBR 15823 (2010), o ensaio que garante os parâmetros para a fluidez do CAA é medido pelo Slump Flow Test, para medida indireta de viscosidade é utilizado o índice de fluxo pelo T_{500} e V-funil. A habilidade passante é atestada pela Caixa L e Anel J, enquanto a segregação pode ser evidenciada através da Coluna de Segregação, como pode ser observado na figura 2.9.

O Slump Flow Test (SF) é utilizado para medir a capacidade do CAA de fluir livremente sem segregar e de sua habilidade de preenchimento em fluxo. Este permite observar visualmente se o concreto está segregando ou não. Assim, conforme a NBR 15823 (2010) e de acordo com o espalhamento medido, o concreto pode ser classificado em 3 classes distintas (SF1, SF2 e SF3) em função de sua aplicação. Quando classificado como SF1, o concreto é indicado para aplicação em lajes, estacas e fundações profundas (espalhamento entre 550 e 650 mm). Quando classificado como SF2, o concreto passa a ser indicado para aplicação em paredes, vigas, pilares, outras (espalhamento entre 560 e 750 mm). A classificação SF3 é realizada para aplicação em pilares, paredes (espalhamento entre 760 e 850 mm).

Figura 2.9 Ensaios realizados no CAA no estado fresco (a) Slump flow t_{500} test; (b) J-ring; (c) Caixa “L”; (d) “V” funil; (e) Coluna de segregação.



Ainda de acordo com a NBR 15823 (2010), o Slump Flow T_{500} Test é uma variação do slump flow onde se avalia a viscosidade através do tempo que a pasta atinge a marca de 500 mm. O valor do tempo não mede a viscosidade do CAA, e sim está relacionada com a descrição da taxa de fluxo. Já o J-ring Test permite a verificação da habilidade do concreto passar por obstáculos. Pode-se também verificar visualmente a segregação da mistura, uma vez que ao passar pelo anel a argamassa não deve se separar do agregado graúdo.

A NBR 15823 (2010) também descreve que o Funil “V” Test apresenta indicadores de fluidez e viscosidade do concreto, simulando a capacidade de passagem do CAA através do estreitamento de uma seção, apenas pela ação do seu peso próprio e que o ensaio da Caixa “L” apresenta indicadores da fluidez do concreto simultaneamente à sua capacidade de passar por obstáculos e permanecer coeso. Além de a Coluna de Segregação indica a resistência à segregação do CAA, pela diferença das marcas de agregado graúdo existentes no topo e na base da coluna de segregação.

2.4.3 Concretos autoadesáveis com baixos teores de cimento e elevados teores de adições minerais

O conceito de SCC foi proposto pela primeira vez por Okamura, em 1986, e o protótipo foi desenvolvido pela primeira vez por Ozawa na Universidade de Tóquio em 1988.

Os concretos autoadensáveis trouxeram uma perspectiva promissora para a indústria de concreto por fornecer redução do impacto ambiental e de custos (Gesoglu *et al.*, 2009).

Um estudo experimental foi realizado por Gesoglu *et al.* (2009) para investigar as propriedades de CAA com adições minerais. Foi produzido um total de 22 misturas de concreto, projetados com uma proporção de água / ligante constante de 0,44 e um conteúdo total de ligante de 450 kg/m³. A mistura de referência incluiu apenas o cimento Portland como ligante, enquanto nas misturas restantes foram incorporadas cinzas volantes, escória granulada de alto-forno, e sílica ativa.

Gesoglu *et al.* (2009) testaram as propriedades dos CAA no estado fresco através do espalhamento, Slump flow, T₅₀₀, Caixa L e tempo de pelo funil V. Além disso, foram analisadas as propriedades dos concretos endurecidos, destacando a permeabilidade à água, permeabilidade ao cloreto, resistência à compressão e velocidade do pulso ultrassônica.

Os resultados indicaram melhora da capacidade de enchimento e passagem de CAA, através da caixa L, e do tempo de fluxo pelo T₅₀₀, quando com pequenas porcentagens de adição. No entanto, as misturas apresentaram dificuldade em passar pelo canal no funil V.

Observou-se que os concretos contendo cinzas volantes tinha geralmente menor resistência à compressão. No entanto, os concretos com as demais adições obtiveram resistências à compressão mais elevadas do que o concreto de referência.

Todas as adições utilizadas melhoraram a durabilidade do concreto quanto à penetração dos íons cloreto e apresentaram diminuição da permeabilidade à água, quando comparados com o concreto de referência.

O trabalho de Bouzoubaa e Lachemi (2001) também apresentou resultados preliminares de CAA com elevados teores de cinzas volantes. No entanto, para essa pesquisa, os CAA apresentaram resistências à compressão que variam de 26 e 48 MPa aos 28 dias, e consumo de cimento entre 247 a 161kg/m³.

2.5 Ataque químico por íons cloreto

A contaminação por íons cloreto pode se dar na própria composição do concreto, quando estes estão presentes na água ou em componentes como agregados e aditivos aceleradores de pega que contenham CaCl₂. Ou ainda, podem ser provenientes do ambiente, quando o concreto está em contato com água do mar, atmosfera marinha em geral, poluentes industriais e produtos agressivos como o ácido muriático.

Os cloretos são encontrados no concreto em diferentes formas: combinados quimicamente ao C-S-H ou como cloroaluminatos de cálcio, conhecido como sal de Friedel (C₃A.CaCl₂.10H₂O), adsorvidos fisicamente às paredes dos poros, ou livres na solução dos poros do concreto. (Crauss, 2010). O sal de Friedel se incorpora à fase sólida do cimento hidratado. Outra parte é fisicamente retida por adsorção à superfície dos poros de gel. Finalmente uma terceira parte fica dissolvida na fase aquosa dos poros, formando os cloretos livres, que penetram através do concreto, até alcançar a armadura, podendo desencadear o processo corrosivo (Fortes, 1995).

O grande interesse no conhecimento do teor de cloretos que tenham penetrado no concreto é devido ao fato de que a corrosão das armaduras em concreto inicia quando o conteúdo de cloreto em contato com o aço excede um valor de limiar. Assim, têm sido desenvolvidos vários métodos para medir o coeficiente de difusão de Cl em concreto (Andrade, 1993).

Difusão é o movimento das moléculas ou íons sob ação de um gradiente de concentração ou, mais estritamente, sob ação de um potencial químico, de uma zona de elevada concentração para uma zona de baixa concentração (LNEC, 2004).

O mecanismo de difusão é bastante lento, porém os cloretos, e geralmente os sais, penetram bem mais rápido, através do transporte por forças capilares, muito apropriadas em climas quentes, quando há névoa salina na qual os cloretos estão em suspensão, nas gotículas de umidade do ar, como é o caso de regiões

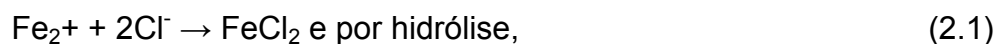
localizadas próximo às praias. A ação deste fenômeno é intensificada ou atenuada conforme a velocidade, direção de incidência dos ventos e grau de insolação (Vieira, 2003).

Quando o concreto está completamente saturado com água, os cloretos penetram por um mecanismo de difusão pura, sendo a diferença de concentração, a força motriz. No entanto, quando o concreto está parcialmente saturado, cloretos podem penetrar por absorção e forças capilares ou dissolvido nas microgotas de nevoeiros marinhos (Andrade, 1993).

O fenômeno de penetração de cloretos não é perceptível a olho nu, não reduz a resistência do concreto nem altera seu aspecto superficial. A identificação da frente ou da profundidade de penetração de certo teor crítico de cloreto requer ensaios específicos. Ao atingir a armadura pode promover séria corrosão com aparecimento de manchas, fissuras, destacamentos de pedaços de concreto e até perda da seção resistente e da aderência, promovendo o colapso da estrutura ou de suas partes (Helene, 1997).

O tipo de cimento, a percentagem de cinzas ricas em sílica eventualmente presentes, a porosidade, a relação água/cimento e até a idade do concreto são, entre outros, fatores que condicionam a velocidade de progressão dos cloretos através do concreto. Cimentos em que, por exemplo, as quantidades de aluminato tricálcico (C_3A) são elevados, a resistência à penetração de cloretos é claramente maior quando comparada com outros cimentos com menor concentração de C_3A (Yadav, *et al.* 2010; Page, *et al.* 1986).

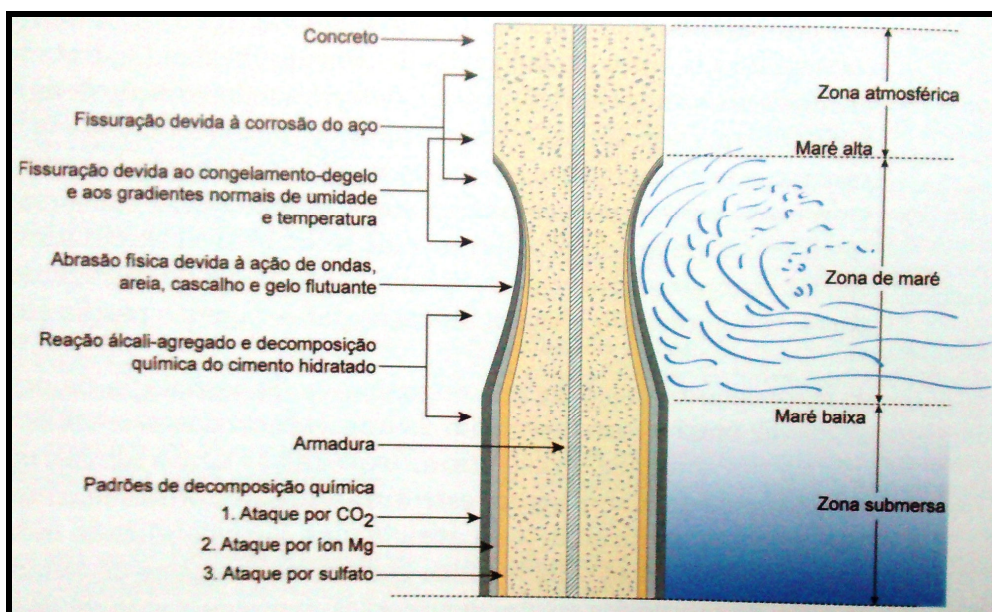
Os cloretos atuam como catalizadores da reação e não são consumidos nas reações de corrosão, permanecendo na vizinhança da armadura e contribuindo para o aumento substancial da condutividade elétrica do eletrólito, acelerando o processo de corrosão (Tessari, 2001), além de impedirem a formação ou quebrarem a película já existente de passivação. O processo de aceleração da corrosão pode ser exemplificado conforme mostrado nas equações 4.4 e 4.5 (Ribeiro, 2014).



Pode-se observar na figura 2.10 que os ataques da água do mar ocorrem principalmente na zona de ação das marés. Quando o nível do mar está alto, o

concreto encontra-se saturado de água e quando o nível do mar desce, ocorre a evaporação da água no interior dos poros do concreto, promovendo a cristalização de alguns sais que se encontravam dissolvidos no meio aquoso. Desta forma, as estruturas estão submetidas às oscilações de nível da água do mar sofrendo os fenômenos físicos e mecânicos provocados pela influência alternada de molhagem e secagem.

Figura 2.10 Representação esquemática de um cilindro de concreto armado exposto à água do mar (Mehta & Monteiro, 2014).



2.6 Determinação do Coeficiente de Difusão dos Cloretos por migração em regime não estacionário

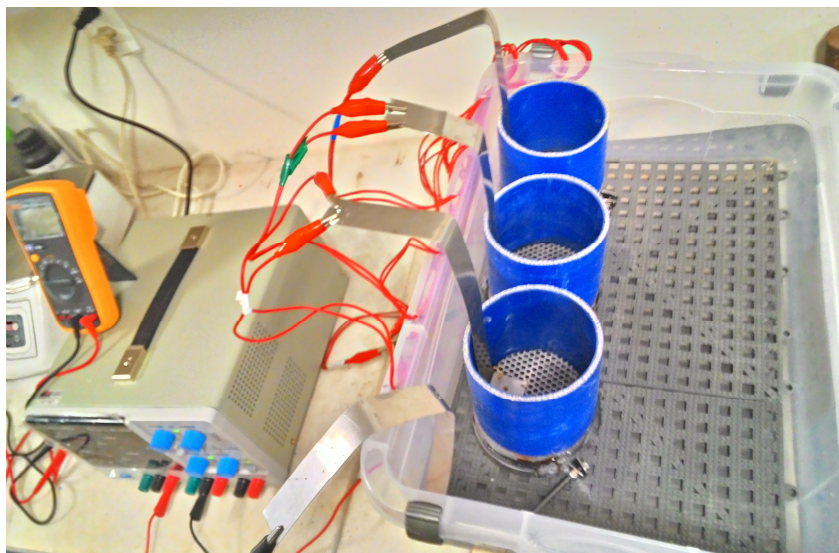
O procedimento é descrito pelo documento normativo LNEC E – 463 (2004) e permite a determinação do coeficiente de difusão dos cloretos no concreto por meio do ensaio de migração em regime não estacionário.

O coeficiente de difusão dos cloretos determinado por este método é uma medida da resistência à penetração dos cloretos do material ensaiado.

Aplica-se à fatia do corpo de prova, entre os topos circulares, um potencial elétrico externo, forçando os íons cloro externo a migrarem para o interior da fatia, conforme a figura 2.11. Após determinado período de ensaio, parte-se a fatia por tração comprimindo-a diametralmente e pulveriza-se uma das seções retangulares

obtidas com uma solução de nitrato de prata. A partir do precipitado branco visível de cloreto de prata mede-se a profundidade de penetração. Com base nesta medição, calcula-se o coeficiente de difusão dos cloretos (LNEC, 2004).

Figura 2.11 Ensaio migração de cloretos LNEC.



Com o objetivo de contribuir para a sustentabilidade da construção, através da diminuição da quantidade de cimento utilizada na produção de concreto, Campos (2012) desenvolveu um estudo substituindo elevados volumes de cimento em concretos autoadensáveis por adições de cinzas volantes, mitigando possíveis inconvenientes, como a diminuição de resistência e do pH devido ao baixo consumo de cimento e elevado teor de adição, com incorporação de pequenas porcentagens de metacaulim e cal hidratada. Aspectos de durabilidade foram analisados, entre eles, o ensaio de difusão dos cloretos foi executado, tendo este apresentado um comportamento melhor nos concretos com adições de cinzas volantes em relação ao de referência.

No que diz respeito às composições estudadas, verificou-se um decréscimo médio em torno de 70% do coeficiente de difusão de íons cloretos com o aumento da dosagem de cinzas volantes, metacaulim e cal hidratada. Este fato demonstra que o aumento do volume de pasta de ligante e a diminuição da razão água/ligante, produzem matrizes mais refinadas, logo menos susceptíveis à penetração de cloretos (Campos, 2012).

Reis (2009) estudou a utilização de misturas ternárias com cinzas volantes e metacaulim, de forma a quantificar a sua viabilidade de utilização generalizada na construção, testando sua eficiência com relação a vários parâmetros de desempenho, incluindo resistências mecânicas, durabilidade, custos, e impacto ambiental. Dentre os ensaios de durabilidade desenvolvidos, está o de migração de íons cloreto em regime não estacionário, conforme a LNEC E – 463 (2004).

Nos resultados do ensaio LNEC E – 463 (2004) para os concretos com adições, quando comparado com o concreto de referência, a maior redução foi de aproximadamente 80% do coeficiente de difusão dos cloretos por migração para o traço com 70% de substituição, sendo 50% e 20% de metacaulim, além de adição de 5% de cal. A introdução de 20% de metacaulim nas misturas, parece potenciar a redução do coeficiente de difusão, face às cinzas volantes, o que foi atribuído a maior quantidade de aluminatos presentes, uma vez que, o metacaulim utilizado possui cerca de 40% de aluminatos na sua composição.

Maia, *et al.* (2012) estudaram a adição de uma mistura com aditivo de redução de retração (SRA) durante a mistura com o objetivo de avaliar a sua influência sobre outras propriedades do concreto e a influência da composição do concreto sobre o desempenho do SRA. Para isso, foram produzidos, por empresas diferentes, dois concretos autoadensáveis com composições de mistura distintas.

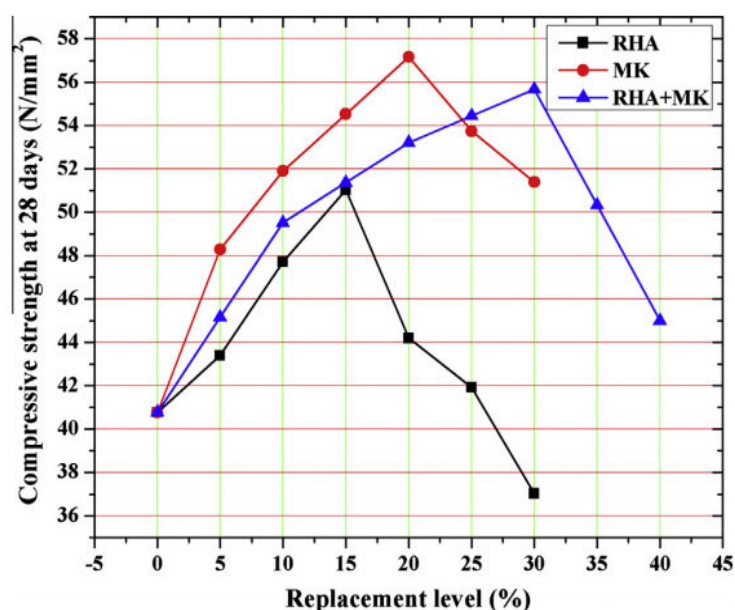
Os SRAs possibilitaram melhora no desempenho quanto à durabilidade do concreto. Observou-se que as misturas com o SRA exibem uma redução do coeficiente de difusão de cloreto em aproximadamente 60%, o que indica uma melhor resistência à penetração de íons cloreto e uma microestrutura da matriz de cimento mais fechada.

A partir dos estudos anteriores, concreto misturado com RHA e MK apresenta melhor desempenho em força e em algumas propriedades de durabilidade (Kannan & Ganesan (2014).

Kannan & Ganesan (2014) produziram dezessete misturas de CAA com cinza da casca de arroz e metacaulim, sendo 12 traços com PCA ou MK com uma gama de 0 a 30%, ao passo de 5%, quatro traços com uma combinação de PCA e MK com

um intervalo de 10%, 20%, 30% e 40% e com um CAA de referência com 400kg/m^3 . Os resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias, conforme figura 2.12, evidenciaram que as porcentagens mais eficientes de substituição do PCA, MK e de combinação dos dois, são de 15%, 20% e 30%, respectivamente. Valores de substituição abaixo ou acima dos citados diminuía a resistência aos 28 dias.

Figura 2.12 Resistência à compressão de PCA (RHA) e MK misturado concreto (Kannan & Ganesan, 2014).



Da mesma forma, a permeabilidade ao íon cloreto do CAA com adições de PCA, MK e PCA + MK diminuiu até 15%, 30% e 40%, respectivamente. Os ensaios de penetração de íons cloreto aos 28 dias, realizados por Kannan & Ganesan (2014), evidenciaram que as porcentagens mais eficientes de substituição do PCA, MK e de combinação dos dois, são de 15%, 30% e 40%, respectivamente. É possível notar então que as misturas com um teor mais elevado de MK e PCA + MK exibiram resistência à penetração de íons cloreto uma muito melhor, devido aos elevados teores de alumina do metacaulim (43,75%), que proporcionou um aumento a fixação dos cloretos no concreto, através da formação do cloroaluminato de cálcio.

Kavitha *et al.* (2016) produziram quatro misturas de CAA, uma de referência com consumo de 500 kg/m^3 e as demais substituindo parcialmente cimento por tores de 5%, 10% e 15% de MK. Para avaliar efeito da MK na durabilidade, absorção de água, testes de penetração ao ataque de cloreto foram realizados de acordo com a

ASTM C 1202 (2005). Os resultados mostraram que o aumento do conteúdo em MK resulta em redução notável na penetração de íons cloreto.

Segundo Kavitha *et al.* (2016), a redução significativa na penetração de íons cloreto pode ser atribuída à formação de C-S-H secundário formado durante a reação pozolânica do MK com os produtos de hidratação do cimento, a alta quantidade de alumina contida no MK e a melhoria da estrutura dos poros (refinamento) que reduz permeabilidade do concreto endurecido.

Cordeiro *et al.* (2009) estudaram o comportamento reológico, de resistência e de penetração de íons cloreto aos 28 dias de quatro composições de concreto, sendo um utilizado como referência, contendo 478kg/m³ de cimento, e os demais com substituição parcial de cimento Portland (10, 15 e 20% em massa). Os resultados demonstraram que o comportamento mecânico não apresentou grandes variações, mas a resistência à penetração de íons de cloreto foi aumentada em até 30% quando comparado o concreto com RBC com o sem adição.

Não foi observada mudança significativa na penetração de íons em relação à quantidade de RBC utilizada no concreto, sendo que o melhor resultado obtido correspondeu ao concreto com 15% de adição. Segundo Cordeiro *et al.* (2009), os resultados de penetração de íons cloreto sugerem refinamento poros devido à reação pozolânica do RBC, demonstrando o significativo potencial de dessa adição em concreto.

CAPÍTULO 3

3. Projeto experimental

Neste capítulo serão descritos os materiais utilizados, bem como os procedimentos adotados para avaliar as propriedades reológicas, físicas, mecânicas e de durabilidade dos concretos autoadensáveis com a incorporação de altos teores de pozolana da casca de arroz, de resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim.

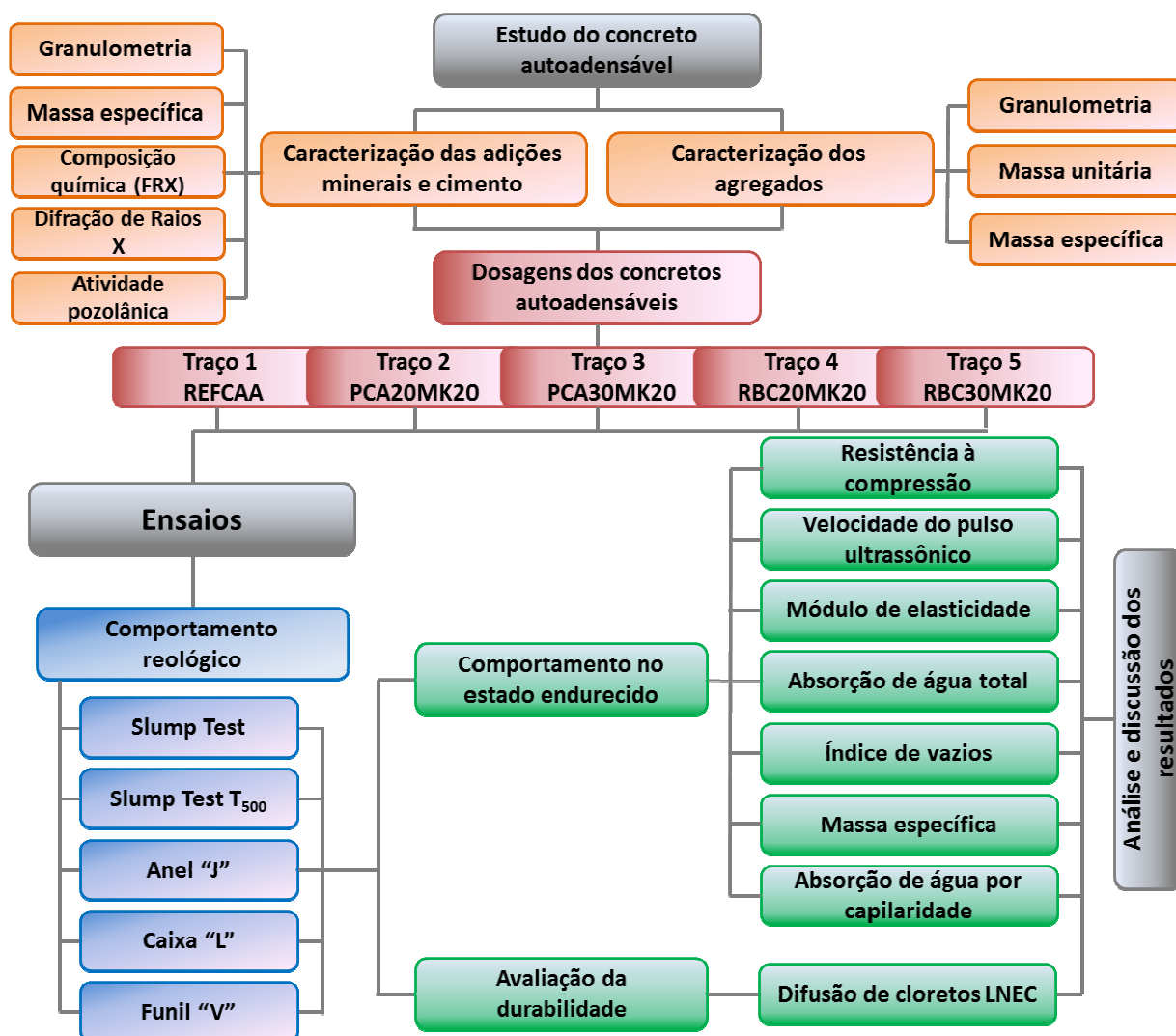
Foi produzido um traço de CAA de referência com 450 kg de cimento por m³ e quatro traços com substituição de cimento de 40% e 50% por adição de RBC ou PCA e MK. As quatro composições apresentam 20% de metacaulim, sendo diferenciadas pela adição de 20 e 30% de RBC ou PCA.

Esta fase experimental foi desenvolvida em quatro etapas, conforme fluxograma apresentado na figura 3.1. A primeira refere-se à coleta e moagem do RBC, aquisição da sílica da casca de arroz e caracterização de todos os materiais de partida.

Na segunda etapa foram realizados os estudos de dosagem dos concretos autoadensáveis com elevados teores de adição e avaliadas suas propriedades. Os traços foram definidos pelo método proposto por Safiuddin *et al.* (2011) e tomando como base as argamassas autoadensáveis estudadas anteriormente pelo grupo de pesquisa do IFRN (Araujo *et al.*, 2014; Farias *et al.*, 2014) com os mesmos percentuais de adições dos concretos que foram utilizados na presente pesquisa.

Na terceira etapa foi analisado o comportamento do concreto no estado fresco e na quarta etapa foi realizada a avaliação das propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos produzidos.

Figura 3.1 Fluxograma do programa experimental.



3.1 Caracterização dos materiais utilizados

3.1.1 Cimento

Para realização deste trabalho foi utilizado cimento Portland de alta resistência inicial e resistente a sulfatos (CP-V ARI RS). Este tipo de cimento foi escolhido com a finalidade de que os concretos produzidos não obtivessem influência de outros tipos de adições pozolânicas além das pesquisadas.

Todo o cimento empregado (160 kg) foi proveniente de um único lote de produção. A tabela 3.1 apresenta as propriedades físicas, mecânicas e características químicas do CP-V ARI RS, fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.1 Ensaios químicos e físicos do cimento CP V ARI RS - ABNT NBR 5733 (1991) E ABNT NBR 5737 (1992).

Características e Propriedades		Valores	Unidades	Desvio Padrão	ABNT
Composição Química	Perda ao fogo	4,27	%	0,2	≤ 4,5
	Resíduo Insolúvel	0,74	%	0,24	≤ 1,0
	SO ₃	3,16	%	0,14	≤ 3,5
	CaO Livre	2,01	%	0,33	
Resistência à Compressão	1 Dia	19,26	MPa	0,82	≥ 11,0
	3 Dias	29,69	MPa	0,92	≥ 24,0
	7 Dias	37,95	MPa	0,9	≥ 34,0
	28 Dias	46,38	MPa	0,91	
Finura	Massa Específica	3,06	g/cm ³	0,01	
	Blaine	4350,96	cm ² /g	86,87	≥ 3000
	# 325	3,42	%	0,47	
	# 200	0,61	%	0,17	≤ 6,0
Expansibilidade	Quente	1,92	mm	0,2	≤ 5
Pega	Início	103,96	min	2,94	≥ 1h
	Fim	157,08	min	7,21	≤ 10h
Consist.	Normal	28,11	%	0,13	

Fonte: Informações do fabricante conforme relatório referente ao lote do cimento (maio/2015).

Durante o estudo, foi realizado o cálculo dos compostos potenciais pela equação de Bogue para obter os teores de cada composto do cimento. A partir das composições percentuais dos vários óxidos, obtém-se uma aproximação para a composição de cada mineral. Segundo Mehta & Monteiro (2014), as equações de Bogue para relação óxido de alumínio e óxido de ferro menor do que 0,64, para estimar a composição teórica do potencial dos compostos do cimento Portland são as seguintes:

$$C_3S = 4,071 (CaO) - 7,6024 (SiO_2) - 6,7187 (Al_2O_3) - 1,4297 (Fe_2O_3) - 2,852 (SO_3) \quad (3.1)$$

$$C_2S = 2,867 (SiO_2) - 0,7544 (C_3S) \quad (3.2)$$

$$C_3A = 2,650 (Al_2O_3) - 1,692 (Fe_2O_3) \quad (3.3)$$

$$C_4AF = 3,043 (Fe_2O_3) \quad (3.4)$$

3.1.2 Resíduo da biomassa da cana-de-açúcar

A adição do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar nas misturas tem como objetivo substituir parte do cimento, visando maior coesão no estado fresco, maior empacotamento das partículas finas e, conseqüentemente, aumento ou manutenção da resistência e durabilidade do concreto.

A cinza utilizada na pesquisa foi coletada em uma usina localizada na cidade de Arêz-RN, a coleta foi realizada após o processo de captação do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (figura 3.2).

Figura 3.2 Processo de captação do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar.



Atualmente o processo de captação do resíduo é automatizado, a queima do bagaço acontece nas caldeiras a vapor (figura 3.2 (a)), sendo o resíduo coletado por lavagem, despejado em esteira (figura 3.2 (b)), coletado (figura 3.2 (c)) e despejado diretamente sobre a caçamba do caminhão (figura 3.2 (d), (e)). Parte do material coletado nos caminhões é depositada no campo novamente e misturado com o solo para posterior plantio da cana-de-açúcar.

Após a coleta o RBC foi submetido ao processo de peneiramento e moagem a seco. Para obtenção da finura adequada, foi utilizado o moinho rotativo de esferas metálicas do Laboratório LABEME – UFPB com moagem de 3 horas e 30 minutos para uma carga de 2000 g de material foi utilizado 21 kg de corpos moedores, constituídos de esferas de aço, com distribuição apresentada na tabela 3.2.

Tabela 3.2 Quantidade de corpos moedores utilizados na moagem.

Diâmetro (mm)	Massa (g)	Quantidade
20	33,75	160
25	62,10	100
30	125,00	40
40	275,00	16

3.1.3 Metacaulim

Para composição dos traços com adições, foi utilizado o Metacaulim BZ, produzido em Ipojuca/PE, gentilmente cedido pela empresa Sibelco e já utilizado em concreteiras da região metropolitana de Natal/RN.

3.1.4 Agregado graúdo

Para a confecção dos concretos, foi selecionada uma brita granulítica, utilizada em uma grande produtora de concreto de Natal/RN, oriunda da zona rural do município de São Gonçalo do Amarante/RN.

Figura 3.3 Coleta do agregado graúdo.

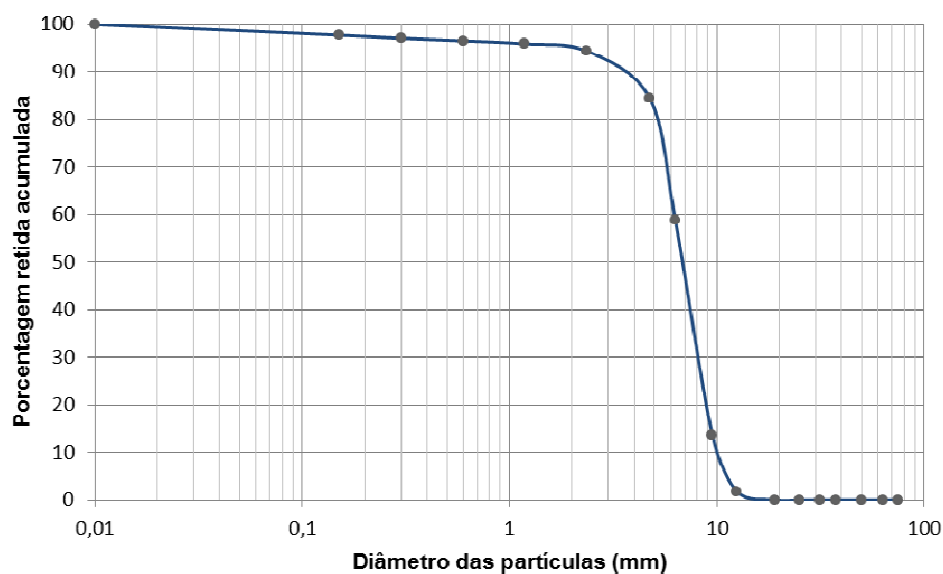


Para caracterização do agregado graúdo foi determinada sua distribuição granulométrica (figura 3.4), módulo de finura, massa unitária do agregado solto e massa específica, de acordo com as Normas vigentes (tabela 3.3).

Tabela 3.3 Caracterização do agregado graúdo.

Característica	Valores	Unidade	Norma
Dimensão máxima característica	12,5	mm	NBR NM 248 (2003)
Módulo de finura	5,79	-	NBR NM 248 (2003)
Massa unitária do agregado solto	1490	kg/m ³	NBR NM 52 (2009)
Massa específica	2,625	kg/cm ³	NBR NM 52 (2009)

Figura 3.4 Curva granulométrica do agregado graúdo de acordo com a NBR NM 248 (2003).



3.1.5 Agregado miúdo

Para a confecção dos concretos, foi selecionada uma areia natural quartzosa, utilizada em uma grande produtora de concreto de Natal/RN, oriunda da zona rural do município de São Gonçalo do Amarante/RN. A areia, aqui denominada de agregado miúdo, foi caracterizada, quanto à granulometria, em conformidade com o prescrito pela NBR NM 248 (2003) e NBR 7211 (2009).

Figura 3.5 Coleta do agregado miúdo.

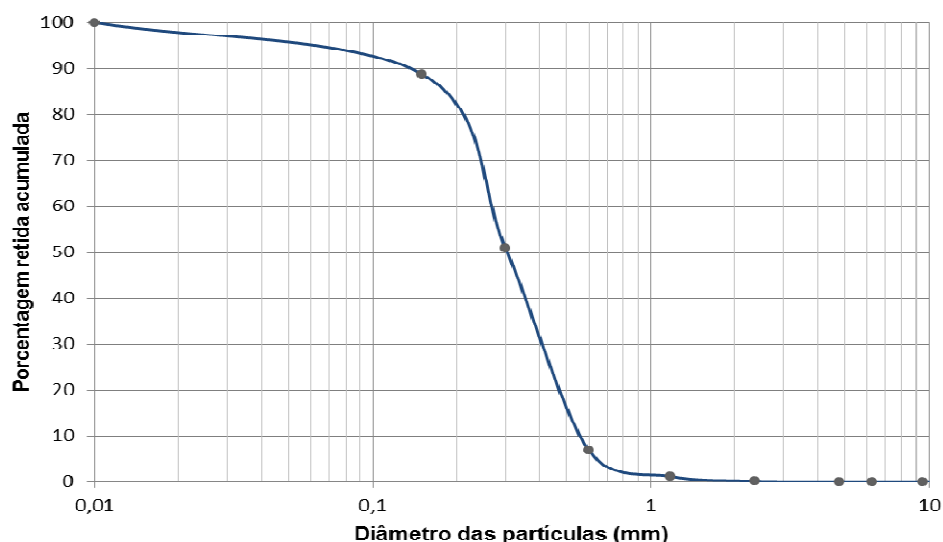


Para caracterização do agregado miúdo foi determinada sua distribuição granulométrica (figura 3.6), módulo de finura, massa unitária do agregado solto e massa específica, de acordo com as Normas vigentes (tabela 3.4).

Tabela 3.4 Caracterização do agregado miúdo.

Característica	Valores	Unidade	Norma
Dimensão máxima característica	1,18	mm	NBR NM 248 (2003)
Módulo de finura	1,48	-	NBR NM 248 (2003)
Massa unitária do agregado solto	1640	kg/m ³	NBR NM 52 (2009)
Massa específica	2,62	kg/cm ³	NBR NM 52 (2009)

Figura 3.6 Curva granulométrica do agregado miúdo de acordo com a NBR NM 248 (2003).



3.1.6 Água

A água utilizada na produção das misturas foi proveniente da rede pública de abastecimento de Natal/RN.

3.1.7 Aditivo

Para as misturas foi utilizado o aditivo hiperplastificante GLENIUM®160 SCC (SCC 160). O mesmo é baseado em uma cadeia de éter policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, propiciando superplastificação e alta redução de água, tornando o concreto com melhores características de trabalhabilidade sem alteração do tempo de pega (ficha técnica de produto). Na tabela 3.5 estão descritos os dados técnicos do SCC 160 conforme informações do fabricante.

Tabela 3.5 Dados técnicos do GLENIUM®160 SCC.

Teste	Método BASF	Especificação	Unidade
Aparência	TM 761 B	Líquido branco turvo	Visual
pH	TM 112 B	5 – 7	-
Densidade	TM 103 B	1,087 – 1,127	g/cm ³
Sólidos	TM 613 B	38,5 – 41,5	%
Viscosidade	TM 117	< 150	cps

Fonte: Informações do fabricante em ficha técnica de produto

3.1.8 Sílica da casca de arroz

A sílica da casca de arroz adicionada nas misturas estudadas foi disponibilizada pelo Grupo Pilecco Nobre, localizado no município de Alegrete/RS.

Essa sílica foi empregada no trabalho, pois apesar de não ser um material regional, tem composição química semelhante ao RBC, sendo também um subproduto de origem natural proveniente de atividade agroindustrial, assim como o RBC. Portanto, servirá de ótima fonte para comparação com o RBC, uma vez que foi utilizada nas mesmas proporções e também por ser um material já disponível no mercado, diferente do RBC que é ainda um subproduto se destinação adequada.

A composição química e propriedades físico-químicas da sílica da casca de arroz, disponibilizadas pelo fabricante, são apresentadas na tabela 3.6.

Tabela 3.6 Composição Química e Propriedades Físico-Químicas da Sílica da Casca de arroz.

Características e Propriedades		Valores	Unidades
Composição Química	Sílica Amorfa (SiO ₂)	≥ 90,0	%
	Sílica Cristalina (SiO ₂)	≤ 2	%
	Óxido de sódio (Na ₂ O)	≤ 1,5	%
	Carbono total (C)	≤ 6,0	%
	Umidade (H ₂ O)	≤ 3,0	%
Propriedades Físico-Químicas	Estado físico (CNTF)	Sólido	
	Diâmetro médio	< 8,0	µm
	Resíduo na peneira 45 µm	≤ 10	%
	pH	≤ 10	
	Ponto de fusão	1550-1570	°C
	Perda ao fogo	≤ 3,5	%
	Densidade aparente	550-600	kg/m ³
	Solubilidade	Insolúvel em água	
		Solúvel em HF e KOH ou NaOH	
	Área específica	20.000	m ² /kg
	Massa específica	2,16	g/cm ³

Fonte: Informações do fabricante

Trata-se de uma sílica amorfa de qualidade produzida através de um sistema inovador de combustão com leito fluidizado para queima da casca do arroz, usado também para produção de energia elétrica renovável.

3.2 Definição dos traços e produção dos concretos

A definição dos traços partiu da dosagem de argamassas autoadensáveis (ARAUJO *et al*, 2014), onde foi utilizada a premissa de utilização de um traço de CAA de referencia com 450 kg/m^3 e, a partir deste, realizar a substituição do cimento em massa em percentuais de 40% e 50%, conforme apresentado na tabela 3.7.

Em seguida foi calculado o novo traço em relação ao consumo de cimento para as composições com redução e utilizando as massas específicas dos materiais. As composições (traços) que foram utilizadas são mostradas na tabela 3.8. A relação água materiais/finos das composições foi mantida constante, com o intuito de avaliar a influência das adições nas propriedades dos CAA no estado fresco e endurecido.

Tabela 3.7 Traços de partida.

Composição	Cimento (%)	PCA (%)	RBC (%)	MK (%)
REFCAA	100	0	0	0
PCA20MK20	60	20	0	20
PCA30MK20	50	30	0	20
RBC20MK20	60	0	20	20
RBC30MK20	50	0	30	20

Para cada composição, as quantidades de aditivo eram testadas previamente em traços de 7,5 litros, visando garantir o espalhamento (slump flow) requerido.

Tabela 3.8 Consumo de materiais, em kg/m^3 , para as composições indicadas.

Composição	Cimento	PCA	RBC	MK	Areia	Brita	Água	Aditivo	Pasta (l/m^3)	Água/ligantes
REFCAA	451,1	0,0	0,0	0,0	739,8	974,4	198,5	1,91	346,4	0,44
PCA30MK20	220,4	132,2	0,0	88,1	722,8	951,9	191,7	6,61	358,7	0,44
PCA20MK20	265,6	88,5	0,0	88,5	725,9	956,1	194,8	4,56	361,5	0,44
RBC30MK20	219,7	0,0	131,8	87,9	720,7	949,3	191,2	5,27	359,9	0,44
RBC20MK20	265,1	0,0	88,4	88,4	724,6	954,3	194,4	4,86	363,3	0,44

A ordem de colocação dos materiais e tempo de homogeneização da mistura encontra-se especificado na tabela 3.9. O procedimento de mistura foi adotado de forma a produzir concretos homogêneos, sem segregação e capazes de garantir um bom envolvimento dos agregados pela pasta ligante.

Os materiais foram misturados em uma betoneira marca CSM, com capacidade de 150 litros, do laboratório de Materiais de Construção do IFRN em temperatura ambiente de aproximadamente $28 \pm 5^\circ \text{C}$.

Para cada traço foram produzidos aproximadamente 120 Litros de concretos, divididos em duas betonadas, para garantir a execução adequada dos ensaios no estado fresco e as moldagens.

Os ensaios no estado fresco foram executados, imediatamente após a mistura, para que não houvesse perda de fluidez.

Tabela 3.9 Procedimento para mistura dos materiais para produção dos concretos pesquisados.

Ordem de colocação dos materiais na betoneira	Materiais e tempo de mistura
1º	Agregado graúdo + 20% da água (1 min.)
2º	50% da areia + 20% da água (1 min.)
3º	Cimento + metacaulim + 50% da água (3min)
4º	50% da areia + 10% da água (2 min.)
5º	Aditivo (2 min.)
6º	PCA + RBC (3min)

Antes da moldagem, todos os moldes cilíndricos metálicos e suas bases foram revestidos internamente com uma fina camada de óleo mineral. A moldagem de cada corpo de prova foi realizada sem adensamento. Foram moldados, para cada mistura, 45 corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

3.3 Metodologia dos ensaios

O programa de ensaios foi desenvolvido com o objetivo de analisar se a incorporação de elevados volumes de adições minerais no concreto, em especial o RBC, é capaz de manter ou melhorar seu desempenho mecânico e durabilidade quando comparado a um concreto autoadensável produzido com materiais convencionais.

Com os ensaios realizados pretendeu-se caracterizar as várias composições estudadas, quer no seu estado fresco, avaliando suas propriedades de autoadensabilidade, quer no estado endurecido, onde se pretendeu avaliar a durabilidade dos concretos produzidos e o seu desempenho mecânico. Nos subcapítulos seguintes serão descritos os procedimentos de cada ensaio efetuado para a realização deste estudo.

3.3.1. Ensaio no Estado Fresco

O ensaio slump flow test foi realizado de acordo com a NBR 15823-2 (2010), em que a medida do diâmetro final do concreto espalhado através do cone de Abrams, obtida pela média aritmética de duas medidas perpendiculares entre si, é utilizada para determinação da fluidez do concreto autoadensável (tabela 3.10), em fluxo livre, sob a ação do seu próprio peso.

Tabela 3.10 Classes de espalhamento (NBR 15823-1, 2010).

Classe	Espalhamento (mm)	Método de ensaio
SF1	550 a 650	NBR 15832-2
SF2	660 a 750	
SF3	760 a 850	

O slump flow t_{500} test, sendo uma variação do slump flow test, onde as únicas alterações são a marcação de um círculo de 500 mm de diâmetro centrado na base, é realizado simultaneamente com o slump flow test. É anotado o tempo em que o concreto se espalha até o diâmetro de 500 mm (t_{500}), avaliando se o concreto está muito fluido ou coeso, a partir do tempo marcado (tabela 3.11). Durante o ensaio é possível verificar se o concreto apresenta segregação visível através da análise se o

agregado graúdo está acompanhando a argamassa até as extremidades sem ficar agrupado no centro e não ocorre o desprendimento de pasta.

Tabela 3.11 Classes de viscosidade plástica aparente t_{500} (NBR 15823-1, 2010).

Classe	t_{500} (s)	Método de ensaio
VS1	≤ 2	NBR 15832-2
VS2	> 2	

Com a finalidade de medir a fluidez e habilidade passante do concreto diante de obstáculos como armações densas, o ensaio anel “J” foi realizado de acordo com prescrições da NBR 15823-3 (2010). O resultado é obtido pela diferença entre o diâmetro médio de espalhamento obtido no ensaio slump flow test e o deste ensaio, classificando o concreto autoadensável, de acordo com a classe de viscosidade plástica aparente (tabela 3.12).

Tabela 3.12 Classes de habilidade passante pelo anel J (NBR 15823-1, 2010).

Classe	Anel J (mm)	Método de ensaio
PJ1	0 a 25 com 16 barras de aço	NBR 15832-3
PJ2	25 a 50 com 16 barras de aço	

Para verificar a capacidade dos concretos autoadensáveis de passar por obstáculos, como em uma concretagem de peças com densa armadura, foi executado o ensaio da caixa “L”, obedecendo às prescrições da NBR 15823-4 (2010). A caixa para realização do ensaio deve ter seção retangular com perfil em forma de L, constituída por um compartimento vertical e outro horizontal e ser provida de dispositivos em forma de grade para determinação da habilidade passante (tabela 3.13) através da razão entre as alturas da superfície do concreto nas extremidades da câmara horizontal.

Tabela 3.13 Classes de habilidade passante pela caixa L (sob fluxo confinado) (NBR 15823-1, 2010)

Classe	Caixa L (H1/H2)	Método de ensaio
PL1	$\geq 0,80$, com duas barras de aço	NBR 15832-4
PL2	$\geq 0,80$, com três barras de aço	

A viscosidade do concreto autoadensável foi analisada com os resultados do ensaio utilizando o método do funil “V”, obedecendo às prescrições da NBR 15823-5 (2010), em que há uma simulação de uma situação em que o concreto precisa escoar em ambientes confinados, sendo a viscosidade aparente classificada de acordo com a tabela 3.14.

Tabela 3.14 Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V (sob fluxo confinado) (NBR 15823-1, 2010).

Classe	Funil V (s)	Método de ensaio
VF1	< 9	NBR 15832-5
VF2	9 a 25	

Não foi efetuado nenhum ensaio para avaliação da segregação, contudo todas as misturas apresentavam-se homogêneas e sem sinais de segregação no momento da realização dos ensaios anteriormente descritos.

3.4 Ensaios no estado endurecido

3.4.1 Velocidade do pulso ultrassônico

As medições da velocidade do pulso ultrassônico nos concretos foram realizadas com os corpos de prova do ensaio de resistência à compressão, sendo avaliados, portanto três corpos de prova para cada traço nas idades de 3, 7, 14, 21, 28 e 91 dias. Foi utilizado o aparelho Pundit Lab⁺, da Proceq SA (figura 3.7), com dois transdutores de 54 kHz e resolução de 0,1 μ s.

O equipamento foi posicionado no modo de transmissão direta, sendo calibrado a cada 9 exemplares.

Para cada corpo de prova, foram calculadas as médias de três leituras, de forma a obter resultados mais confiáveis.

Considerando que a umidade do concreto também influencia na velocidade das ondas, para maior uniformidade dos dados e comparação mais fidedigna, as amostras estavam saturadas com a superfície seca e a uma temperatura de 22 ± 2 °C. Para cada amostra ensaiada, foram calculadas as médias de três leituras.

Figura 3.7 Pundit Lab+.



O método da velocidade do pulso ultrassônico consiste em introduzir pulsos de ondas ultrassônicas no interior do concreto e obter as medições de tempo de propagação e de velocidade de cada pulso. Além do tempo, a velocidade também é informada pelo aparelho de ultrassom que a calcula com base na equação 3.5. Para tanto, o usuário do aparelho deve fornecer o valor da distância de percurso (ΔS).

$$V = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (3.5)$$

Onde,

V = velocidade do pulso de ondas ultrassônicas.

ΔS = distância percorrida pelo pulso de ondas ultrassônicas.

Δt = tempo de percurso do pulso de ondas ultrassônicas.

O módulo de elasticidade dinâmico foi calculado por meio da equação 3.6.

$$Ed = \rho V^2 \frac{(1 + \mu).(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad (3.6)$$

Onde:

Ed = módulo de elasticidade dinâmico (GPa)

ρ = massa específica (g/m^3)

V = velocidade (km/s)

μ = coeficiente de Poisson

A massa específica real (ME_{REAL}) foi determinada em conformidade com a NBR 9778 (2009) e o coeficiente de Poisson considerado igual a 0,2, conforme recomendações da NBR 6118 (2014).

3.4.2 Resistência à compressão axial (f_c)

Os ensaios de resistência à compressão axial foram executados de acordo com a NBR 5739 (2007), para as idades de 3, 7, 14, 21, 28 e 91 dias, sendo ensaiados três corpos de prova (10 x 20 cm), para cada idade. Após a desmoldagem, os corpos de prova foram colocados em cura por imersão em água a temperatura de 22 ± 2 °C, onde ficaram até as idades estabelecidas. Antes dos ensaios os corpos de prova foram retificados para regularização das faces inferior (caso necessário) e superior. Para realização do ensaio, utilizou-se a prensa hidráulica do Laboratório de Materiais e Produtos Cimentícios do IFRN, marca Pavitest, com capacidade de 100 ton e precisão de 10 kgf.

Foram moldados corpos de prova para realização de ensaios de velocidade do pulso ultrassônico e resistência à compressão aos 360 dias, com o objetivo de averiguar a reatividade das adições em idades mais avançadas.

3.4.2.1 Módulo estático de elasticidade à compressão

Os ensaios de módulo estático de elasticidade à compressão (figura 3.8) foram realizados aos 28 e 91 dias. Para estes ensaios foram moldados e retificados três corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para cada traço. Foram utilizados os dados do ensaio da resistência à compressão, conforme NBR 5739 (2007), para previsão da tensão de ruptura à compressão, de acordo com a recomendação da NBR 8522 (2008). Com os dados de tensão de ruptura à compressão, foi possível calcular o percentual de carga última adequado à determinação do módulo estático de elasticidade.

Para atender a recomendação da NBR 8522 (2008), foi aplicado um plano de carga variando de 0,5 MPa à 30% da carga última, sendo utilizados dois corpos de prova irmãos para determinação.

Figura 3.8 Ensaio de módulo estático de elasticidade à compressão.



Para realização do ensaio, utilizou-se um compressômetro digital para medição do módulo de elasticidade de corpos de prova de concreto, com dois LVDT's com resolução de 0,001 mm e prensa hidráulica do Laboratório de Materiais e Produtos Cimentícios do IFRN, marca Pavitest, com capacidade de 100 ton e precisão de 10 kgf.

3.4.2.2 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Estes ensaios foram realizados aos 28 e 91 dias, sendo utilizadas três amostras de concreto cilíndricas de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para cada mistura em cada idade. Os ensaios foram realizados após período de cura de 28 e 91 dias, e em conformidade com a NBR 9778 (2009).

Os procedimentos para realização dos ensaios foram executados no Laboratório de Construção Civil do IFRN, de acordo com as etapas relacionadas abaixo:

- Imersão das amostras em águas a 22 ± 2 °C durante o período de cura (28 e 91 dias). As massas das amostras submersas (m_i) eram medidas em uma balança hidrostática;

- As amostras eram removidas da água e tinham suas superfícies eram secas com um pano úmido para remover a umidade superficial. As massas saturadas com superfície seca eram, então, determinadas (m_{sat});
- Secagem das amostras em estufa a 105° C até que a determinação sucessiva das amostras em intervalo de 24 horas mostrasse uma redução de massa inferior a 0,5%. Após a remoção da estufa, as amostras eram resfriadas em temperatura ambiente (23° C) para posterior determinação da massa seca em estufa (m_s).

Após obter as massas mencionadas acima, obtendo sempre os valores médios entre as três amostras, foram calculados os índices de vazios (I_V), a porosidade total (P_{TOTAL}), a absorção por imersão ($Ab_{IMERSÃO}$), a massa específica da amostra seca (ME_{SECA}), a massa específica da amostra saturada (ME_{SAT}) e a massa específica real (ME_{REAL}). As mesmas amostras utilizadas nesses ensaios serviram também para determinação da absorção por capilaridade.

Os valores das características físicas foram determinados através das seguintes expressões:

$$Ab_{IMERSÃO} = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \quad (3.7)$$

$$I_V = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (3.8)$$

$$ME_{SECA} = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (3.9)$$

$$ME_{SAT} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (3.10)$$

$$ME_{REAL} = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (3.11)$$

3.4.3 Ensaios de durabilidade

3.4.3.1 Absorção por capilaridade

Para cada mistura, nas idades de 28 e 91 dias, foram ensaiados três amostras cilíndricas de concreto com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Os

ensaios foram realizados no Laboratório de Construção Civil do IFRN, conforme procedimentos indicados na NBR 9779 (2012). As seguintes etapas foram utilizadas:

- Secagem das amostras em estufa a 105° C até que a determinação sucessiva das amostras em intervalo de 24 horas mostrasse uma redução de massa inferior a 0,5%. Após a remoção da estufa, as amostras eram resfriadas em temperatura ambiente (23° C) para posterior determinação da massa seca em estufa (m_s);
- Instalação do recipiente em sala com temperatura constante de 23° C;
- Posicionamento das amostras sobre suportes, preenchendo com água o recipiente do ensaio, de modo que o nível de água permanecesse constante a 5 ± 1 mm acima de sua face inferior;
- Determinação da massa das amostras com 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 24h 48h e 72h. As amostras eram removidas da água e dispostas sobre um pano úmido durante um minuto para remoção da umidade superficial de forma padronizada em todas as amostras. As massas eram, então, determinadas ($m_{contato}$) e retornadas imediatamente ao recipiente;

O cálculo da absorção de água por capilaridade (Ab_{CAP}), em g/cm², foi realizado de acordo com a seguinte expressão:

$$Ab_{CAP} = \frac{m_{contato} - m_s}{A} \times 100 \quad (3.12)$$

Onde:

$m_{contato}$ é a massa da amostra que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado (g);

m_s é a massa da amostra da amostra seca em estufa, assim que atingiu a temperatura ambiente (g) e,

A é a área da seção transversal (cm²).

Após determinada, para cada instante, a absorção capilar, a cinética de absorção capilar foi expressa graficamente como a variação da absorção capilar, Ac , ao longo da raiz quadrada do tempo, t_i .

3.4.3.2 Migração de cloretos em regime não estacionário

O para a determinação do coeficiente de difusão dos cloretos no concreto por meio do ensaio de migração em regime não estacionário foi realizado de acordo com descrito pelo documento normativo LNEC E - 463 (2004).

Para execução do ensaio aplica-se à fatia do corpo de prova de diâmetro 100x50mm, entre os topos circulares, um potencial elétrico externo, forçando os íons cloro externo a migrarem para o interior da fatia. Após determinado período de ensaio, parte-se a fatia por tração comprimindo-a diametralmente e pulveriza-se uma das seções retangulares obtidas com uma solução de nitrato de prata. A partir do precipitado branco visível de cloreto de prata mede-se a profundidade de penetração. Com base nesta medição, calcula-se o coeficiente de difusão dos cloretos (LNEC, 2004).

Os concretos foram analisados aos 28 e 90 dias com dois corpos de prova para cada idade, ensaiando duas fatias de uma amostra e uma de outra, totalizando três fatias para cada traço em cada idade.

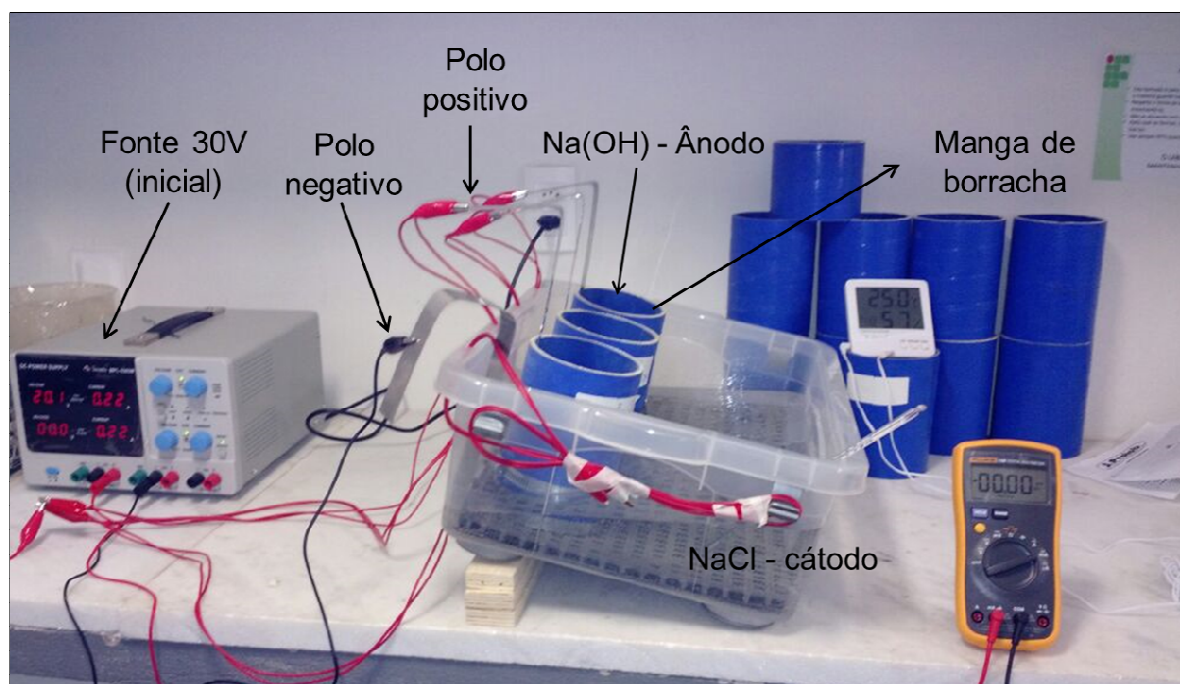
De acordo com LNEC (2004), o ensaio deve ser realizado conforme descrito a seguir.

Antes do ensaio, são preparadas uma solução catódica a 10% em massa de NaCl em água da e uma solução anódica de NaOH 0,3 N em água destilada ou desionizada. 12 litros da primeira solução serão utilizados para o reservatório catódico.

Uma manga de borracha é colocada na fatia do corpo de prova e apertada com duas braçadeiras de aço inox. A amostra deve ser posicionada no suporte de plástico do reservatório catódico, enchendo a manga sobre o provete com 300ml da solução anódica (NaOH 0.3M). Logo após, o ânodo é imerso na solução catódica (figura 3.9).

O cátodo deve ser ligado ao polo negativo de uma fonte de alimentação e o ânodo ao polo positivo. A fonte de alimentação é ligada, com uma voltagem preestabelecida de 30 V, registrando a intensidade da corrente inicial que passa em cada amostra e a temperatura inicial em cada solução anódica.

Figura 3.9 Ensaio migração de cloretos LNEC. Fonte: Próprio Autor.



Pode ser necessário ajustar a voltagem (como apresentado na tabela 3.15). Após o ajuste, anota-se novamente o valor da intensidade da corrente inicial.

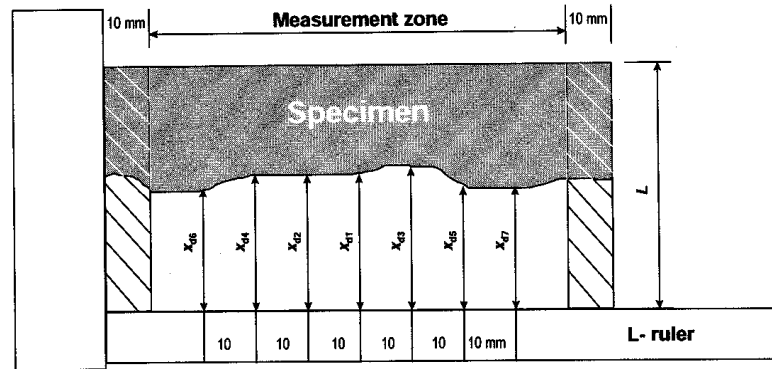
Tabela 3.15 Diferença de potencial e duração do ensaio de migração de uma amostra de concreto.

Corrente inicial I_{30V} (com 30 V) (mA)	Diferença de potencial aplicada U (após o ajuste) (V)	Nova corrente inicial admissível (mA)	Duração do ensaio t (horas)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 > 360$	10	$I_0 > 120$	6

Fonte: LNEC (2004)

Depois de passado o tempo de ensaio determinado, a intensidade da corrente e a temperatura final precisam ser registradas. Em seguida, retiram-se as amostras das mangas e, após lavagem, a fatia é partida por tração comprimindo-a diametralmente. Pulveriza-se uma das seções retangulares recentemente separadas com uma solução de nitrato de prata 0,1 M. Quando o precipitado branco do cloreto de prata for claramente visível na superfície, mede-se a profundidade de penetração em sete pontos, conforme figura 3.10.

Figura 3.10 Ilustração da medição das profundidades de penetração dos cloretos.
(LNEC, 2004).



O coeficiente de difusão em regime não estacionário é calculado a partir da equação (3.13):

$$D = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (3.13)$$

onde:

$$E = \frac{U - 2}{L} \quad (3.14)$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_o} \right) \quad (3.15)$$

D , o coeficiente de difusão em regime não estacionário, m^2/s ;

z , o valor absoluto da valência do íon, para os cloretos, $z = 1$;

F constante de Faraday: $F = 9.648 \times 10^4 \text{ J}/(\text{V} \cdot \text{mol})$;

U : valor absoluto da voltagem aplicada, V;

R : constante dos gases perfeitos; $R=8,314\text{J}/(\text{K.mol})$

T : valor médio das temperaturas inicial e final no anólito (graus Kelvin);

L : espessura do provete, m

x_d : valor médio da profundidade de penetração, m;

t : duração do ensaio, segundos;

erf^{-1} : inverso da função erro;

c_d : concentração de cloretos para a qual ocorre mudança de cor, $c_d \approx 0.07N$ para concreto com cimento CEM I;

c_o : concentração de cloretos no católito, $c_o \approx 2N$

O valor da difusão dos cloretos, para cada composição, foi obtido pela média aritmética dos valores individuais das três amostras ensaiadas em cada idade.

3.4.4 Atividade Pozolânica

A análise da atividade pozolânica do RBC e do PCA utilizados no estudo é um importante parâmetro para o entendimento do comportamento dos concretos no estado endurecido.

A seguir são apresentadas de forma sucinta as metodologias empregadas na avaliação da atividade pozolânica neste estudo. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em prensa hidráulica, marca Pavitest, com capacidade de 100 ton e precisão de 10 kgf, com velocidade de carregamento de 0,3 mm/min e de acordo com as recomendações da NBR 7215 (1997).

3.4.4.1 Índice de Atividade Pozolânica com Cimento Portland

O índice de desempenho com cimento Portland é um importante parâmetro para a avaliação da reatividade de um material a ser empregado como adição mineral por simular uma situação real de aplicação.

Para execução do ensaio, segundo a NBR 5752 (2014), devem ser preparadas argamassas com duas dosagens diferentes, sendo a primeira contendo

cimento CP II F 32, areia norma e água e a segunda com 25% em massa de material pozolânico, em substituição à igual porcentagem de cimento.

O índice de desempenho com cimento Portland é, então, calculado através da relação entre as resistências à compressão de argamassa com pozolana e argamassa composta apenas por cimento, areia e água, conforme equação (3.16).

$$IAP = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \cdot 100(\%) \quad (3.16)$$

Onde:

IAP: índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias;

fcB: resistência média à compressão, aos 28 dias, dos corpos de prova moldados com cimento CP II F 32 e 25% de material pozolânico;

fcA: resistência média à compressão, aos 28 dias, dos corpos de prova moldados somente com cimento CP II F 32 como material cimentício.

No ensaio foram confeccionadas argamassas com relação cimento-areia de 1:3 (em massa), contendo areia normalizada (ABNT NBR 7214, 2015) e relação água-material cimentício de 0,48. A consistência da argamassa de referência foi 180mm e, seguindo as recomendações da NBR 5752 (2014), foram adicionados pequenos teores de aditivo (0,33%) para manter o índice de consistência (± 10 mm) e manutenção da relação água-material cimentício.

Após mistura e moldagem, os corpos de prova foram mantidos protegidos da perda de umidade nas primeiras 24 horas (temperatura de $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$). Em seguida, os corpos de prova foram desmoldados e mantidos imersos em tanque de água.

3.4.4.2 Índice de Atividade Pozolânica com Cal

No ensaio acelerado de índice de atividade pozolânica com cal são eliminadas as variações decorrentes dos desempenhos diferenciados dos cimentos Portland, o que permite a comparação mais fidedigna com resultados de outros estudos (Cordeiro, 2006).

O índice de atividade pozolânica com cal (IAP), prescrito na NBR 5751 (2015), é obtido a partir do valor médio de resistência à compressão aos 7 dias de uma argamassa composta de uma parte, em massa, de hidróxido de cálcio, nove

partes de areia normalizada (ABNT NBR 7214, 2015) e mais uma quantidade de material pozolânico, que corresponde ao dobro do volume de hidróxido de cálcio.

O material pozolânico e o hidróxido de cálcio foram misturados e bem homogeneizados previamente e o procedimento de mistura seguiu as recomendações da NBR 7215 (1996). A quantidade de água da mistura foi suficiente para obtenção de índice de consistência de 225 ± 5 mm, medido pelo ensaio de espalhamento em mesa (ABNT NBR 7215, 1997). A cura durante as primeiras 24 horas foi realizada a temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$; durante os 6 dias posteriores os corpos de prova foram mantidos à temperatura de $55^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ dentro dos próprios moldes protegidos da perda de umidade.

Neste trabalho foi realizado o índice de atividade pozolânica para o RBC e o PCA e a relação de água/sólidos utilizada para ambas as adições foi de 0,175.

3.4.4.3 FRX

A determinação da composição química do cimento e das adições foi realizada através de fluorescência de raios X (FRX) por energia dispersiva em um equipamento Shimadzu modelo EDX-820. Os espectros de fluorescência de raios X foram obtidos utilizando-se cerca de 300mg de amostra em pó fino depositado em uma porta-amostra formado por um filme de polietileno, que apresenta baixa absorção de raios X na faixa de energia de interesse.

3.4.4.4 DRX

Foram produzidas pastas com as mesmas proporções de água/finos das argamassas para IAP para proceder às análises de DRX, de modo que as pastas foram submetidas às mesmas condições de cura que as argamassas nos primeiros 7 dias. Após a retirada das amostras da estufa, as pastas ficaram em temperatura ambiente $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ até estabilização da temperatura. Após 3 horas as amostras foram destorroadas e passadas na peneira 0,150mm e armazenadas protegidas do ar durante 4 horas para início da análise de DRX.

Todas as amostras das adições e das pastas foram caracterizadas por difração de raios X em um equipamento da Shimadzu modelo XRD-7000 utilizando-se uma fonte de radiação de $\text{CuK}\alpha$ com voltagem de 30kV, corrente de 30 mA. Os

dados foram coletados na velocidade do goniômetro de $0,02^\circ 2\theta$ por passo com tempo de contagem de 1,0 segundo por passo e coletado de 3 a $70^\circ 2\theta$, utilizando o spin em 60 rpm para diminuir erros causados pela orientação preferencial. A interpretação qualitativa do espectro foi efetuada por comparação com padrões contidos no banco de dados JCPDS (ICDD-2002).

A análise de DRX foi realizada com o objetivo de verificar a formação de silicato de cálcio hidratado.

CAPÍTULO 4

4. Resultados e discussões

4.1 Caracterização dos materiais utilizados

A partir da seleção e aquisição dos materiais em quantidades suficientes e necessárias para a realização de todo o estudo, os mesmos foram, então, caracterizados. Dessa forma, para caracterização do cimento, metacaulim, PCA e RBC utilizados na pesquisa, os ensaios de fluorescência de raios X foram realizados no Laboratório de Engenharia de Materiais (Demat) da UFRN, granulometria a laser realizada no Laboratório de Cimentos (Labcim) da UFRN e determinadas suas massas específicas no Laboratório de Materiais de Construção do IFRN.

4.1.1 Cimento

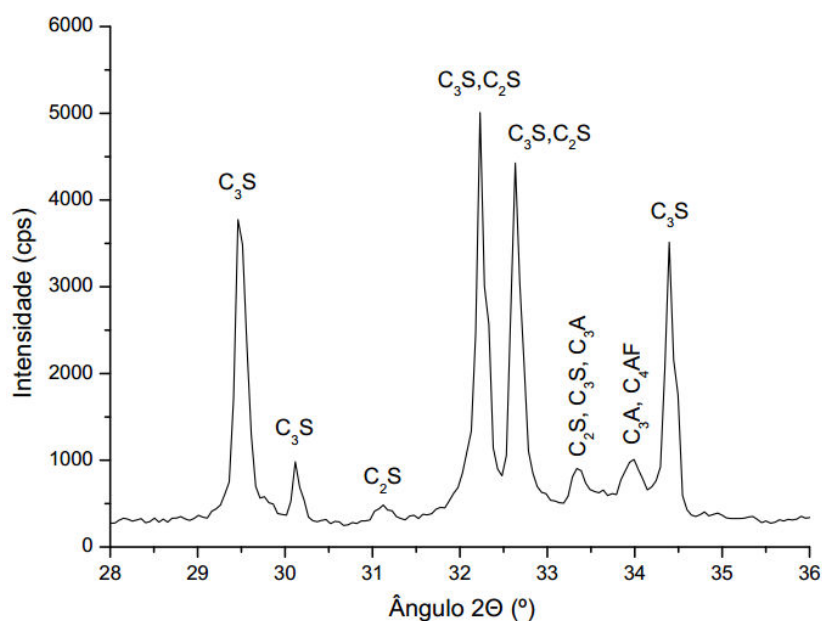
Na tabela 4.1 são apresentados, como resultados obtidos na análise química do cimento CP-V ARI RS utilizado na confecção das misturas estudadas, os teores de óxidos obtidos por estequiometria.

Tabela 4.1 Composição química do cimento CP-V ARI RS.

Elementos químicos	Teor (%)
CaO	61,39%
SiO ₂	19,13%
Fe ₂ O ₃	3,65%
Al ₂ O ₃	3,99%
SO ₃	3,26%
K ₂ O	0,52%
Na ₂ O	0,02%
MgO	3,15%

A figura 4.1 apresenta o resultado do ensaio de difração de raios X do cimento utilizado na produção dos CAA analisados.

Figura 4.1 Difração de raios X do cimento CP-V ARI RS.



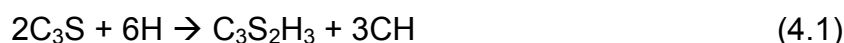
Os cálculos potenciais (equações 3.1, 3.2, 3.3, 3.4), realizados pelo método proposto por R. H. Bogue (Gobbo, 2003), para obtenção de valores previsionais da composição potencial dos compostos do cimento estão evidenciados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 Composição potencial de Bogue do cimento CP-V ARI RS.

Composição Potencial	Teor (% em massa)
C ₃ S	63,16
C ₂ S	7,20
C ₃ A	4,40
C ₄ AF	11,11

A partir da análise de DRX, juntamente com a FRX, observou-se que os produtos principais do cimento utilizado são C₃S e C₂S, acompanhados de C₄AF e C₃A em menor quantidade.

A hidratação desse cimento ocorre mediante a hidratação dos seus quatro componentes principais: C₃S, C₂S, C₃A e C₄AF. Segundo Mehta & Monteiro (2014), as reações estequiométricas para as pastas de C₃S e C₂S completamente hidratadas podem ser expressas pelas equações 4.1 e 4.2.

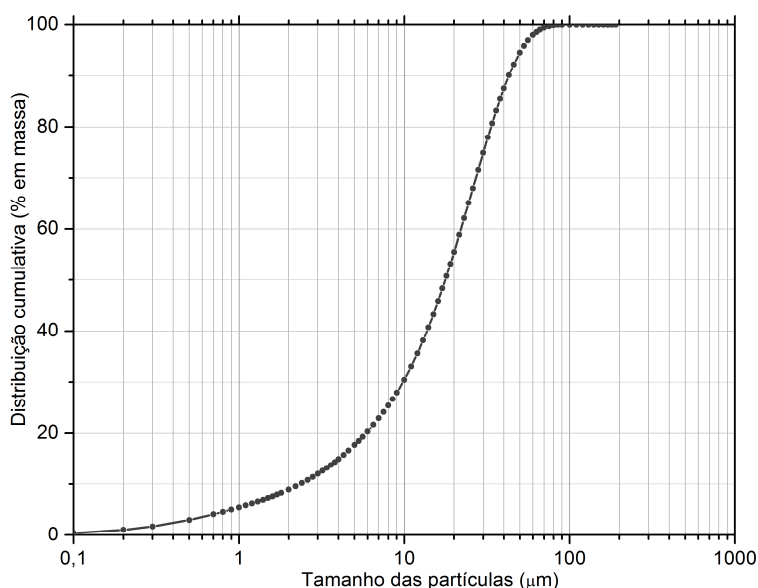


Os cálculos estequiométricos das equações 4.1 e 4.2 mostram que a hidratação do C_3S e C_2S produzem 39% e 18% de hidróxido de cálcio, respectivamente, comprovando que quanto maior a quantidade de C_3S , maior será a disponibilidade de hidróxido de cálcio.

A massa específica do cimento utilizado, determinada de acordo NBR NM 23 (2001), apresentou valor de 3,05 g/cm³. Na figura 4.2 é apresentada a curva granulométrica do cimento.

Verifica-se que o cimento apresentou granulometria com partículas inferiores a 0,10 μm e de até 90 μm . Esta apresentou um valor de 8,91% em volume, abaixo de 2 μm , 65,98% entre 2 μm e 30 μm e 25,11% acima de 30 μm . O cimento apresentou um diâmetro médio percentual de 20,31 μm .

Figura 4.2 Curva granulométrica do cimento.



4.1.2 Sílica da Casca de Arroz

Na tabela 4.3 são apresentados como resultados obtidos na análise química do PCA utilizado na confecção das misturas estudadas, os teores de óxidos obtidos por fluorescência de raios x (FRX).

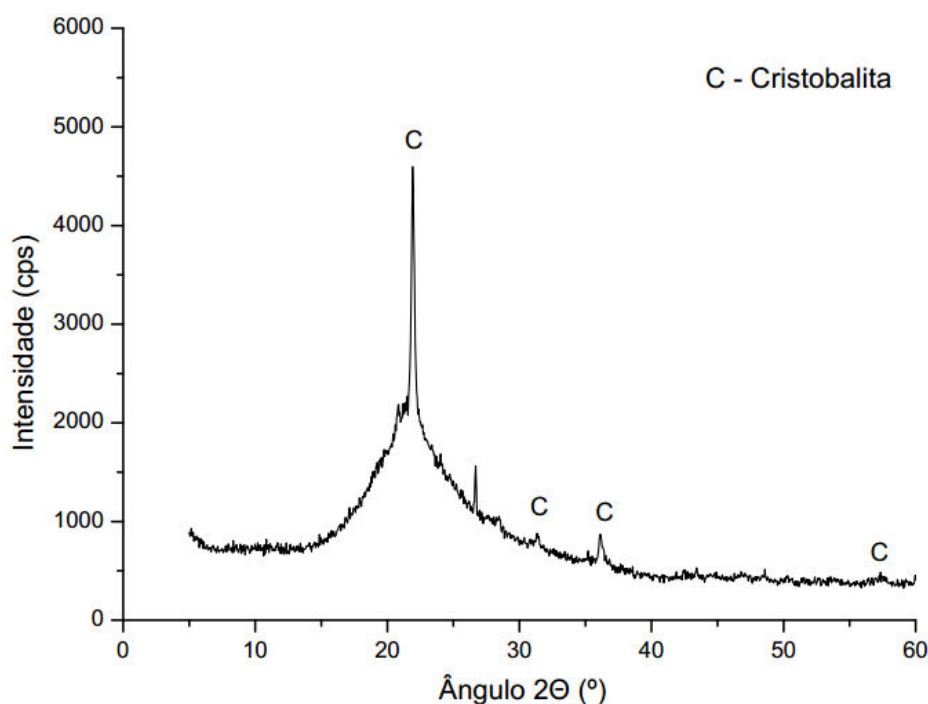
A figura 4.3 apresenta o resultado do ensaio de difração de raios X do PCA utilizado na produção dos CAA analisados.

A massa específica do PCA utilizado, determinada de acordo NBR NM 23 (2001), apresentou valor de 2,10 g/cm³. Na figura 4.4 é apresentada a curva granulométrica do PCA.

Tabela 4.3 Composições química do PCA.

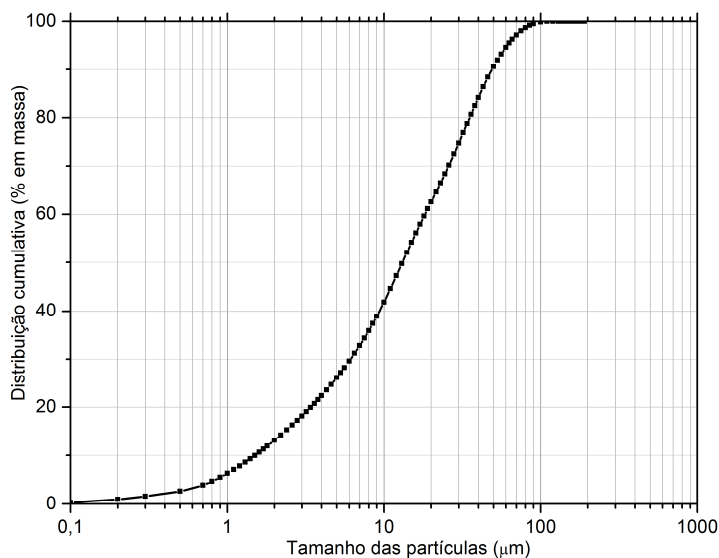
Elementos químicos	Teor (%)
SiO ₂	92,03%
K ₂ O	2,65%
Al ₂ O ₃	2,38%
MnO	1,41%
CaO	0,76%
P ₂ O ₅	0,46%
Fe ₂ O ₃	0,27%
ZnO	0,04%

Figura 4.3 Difração de raios X do PCA



O difratograma da cinza da casca de arroz, juntamente com o resultado da FRX, evidencia, através do halo difuso, que a PCA é composta principalmente por sílica amorfa, com uma menor parcela de sílica cristalina, observada na forma de cristobalita. Assim como a análise realizada por Cordeiro *et al.* (2012), a presença de cristobalita pode ser explicada pela existência de contaminação do material por areia.

Figura 4.4 Curva granulométrica da sílica da casca de arroz.

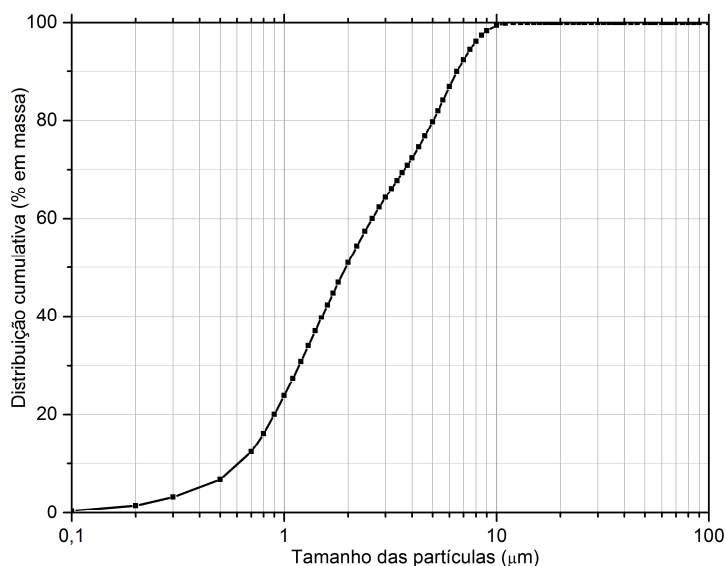


Verifica-se que a cinza apresentou granulometria com partículas inferiores a 0,10 μm e de até 110 μm . Esta apresentou um valor de 13,08% em volume, abaixo de 2 μm , 61,57% entre 2 μm e 30 μm e 24,35% acima de 30 μm . A cinza apresentou um diâmetro médio percentual de 20,05 μm .

4.1.3 Cinza da Biomassa da Cana-de-Açúcar

A massa específica do RBC utilizado, determinada de acordo NBR NM 23 (2001), apresentou valor de 2,01 g/cm^3 . Na figura 4.5 é apresentada sua curva granulométrica após moagem, conforme utilizado na produção dos concretos.

Figura 4.5 Curva granulométrica da cinza de biomassa de cana-de-açúcar com 3 horas de moagem.



Verifica-se que a cinza apresentou granulometria, depois de moída, com partículas inferiores a 0,10 μm e de até 12 μm . Esta apresentou um valor de 50,96% em volume, abaixo de 2 μm , 48,51% entre 2 μm e 10 μm e somente 0,12% acima de 10 μm . A cinza apresentou um diâmetro médio percentual de 2,86 μm .

Na tabela 4.4 são apresentados como resultados obtidos na análise química do RBC utilizado na confecção das misturas estudadas, os teores de óxidos obtidos por FRX.

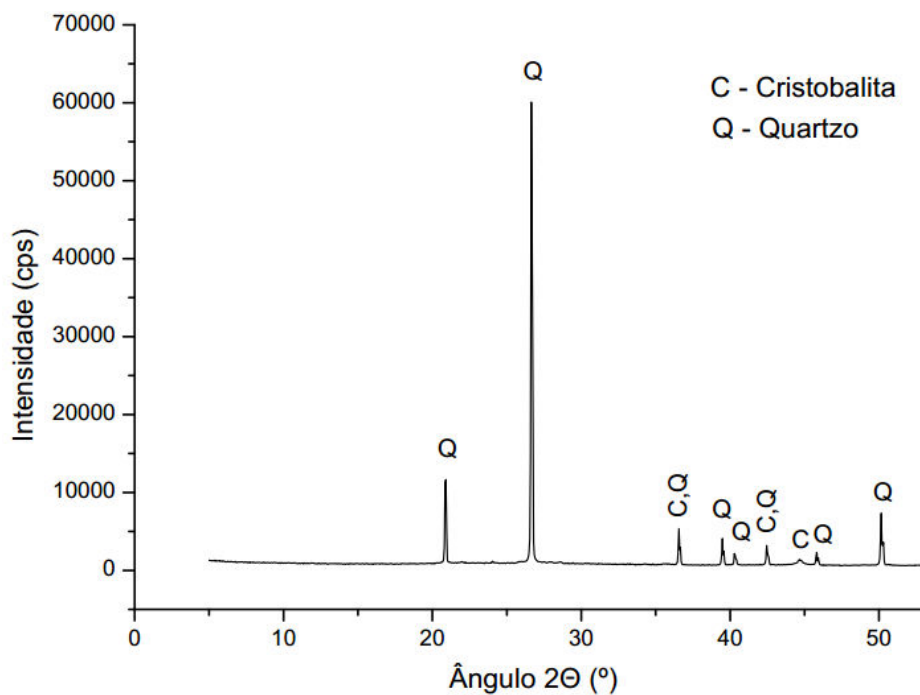
Tabela 4.4 Composições química do RBC.

Elementos químicos	Teor (%)
SiO_2	60,04%
Fe_2O_3	25,78%
K_2O	3,39%
Al_2O_3	3,08%
CaO	2,47%
P_2O_5	1,42%
Cr_2O_3	1,35%
MgO	1,02%
TiO_2	0,53%
SO_3	0,34%
MnO	0,20%
SrO	0,16%
MoO_3	0,14%
ZnO	0,11%

A alta quantidade de óxido de ferro (Fe_2O_3) pode ser atribuída ao contato do resíduo com as esferas de aço dos corpos moedores e ao desgaste entre os corpos moedores e a parede de aço do equipamento, ambos oxidados, no processo de moagem, o que desencadeou um desprendimento desse óxido das esferas e das paredes moinho e mistura com o resíduo.

A análise de DRX feita no resíduo da biomassa da cana-de-açúcar utilizado na produção dos CAA é apresentada na figura 4.6. Com essas análises verificou-se que o resíduo é um material predominantemente cristalino. Verifica-se ainda que o RBC apresenta picos elevados de sílica (SiO_2) nas formas de cristobalita e quartzo.

Figura 4.6 Difração de raios X do RBC



4.1.4 Metacaulim

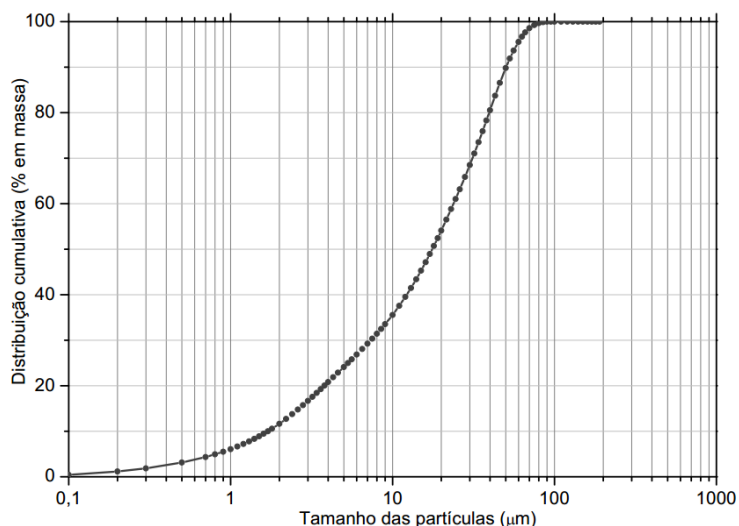
Na tabela 4.5 são apresentados como resultados obtidos na análise química do Metacaulim BZ utilizado na confecção das misturas estudadas, os teores de óxidos obtidos por FRX. Na figura 4.7 é apresentada a curva granulométrica do metacaulim.

Tabela 4.5 Composições química do Metacaulim.

Elementos químicos	Teor (%)
Al_2O_3	51,10%
SiO_2	44,33%
Fe_2O_3	1,70%
TiO_2	1,06%
SO_3	0,59%
K_2O	0,53%
P_2O_5	0,33%
BaO	0,19%
CaO	0,12%
Cr_2O_3	0,02%
ZrO_2	0,01%
MnO	0,01%

Verifica-se que o metacaulim apresentou granulometria com partículas inferiores a 0,10 μm e de até e 90 μm . Esta apresentou um valor de 11,65% em volume, abaixo de 2 μm , 56,85% entre 2 μm e 30 μm e 43,15% acima de 30 μm . O metacaulim apresentou um diâmetro médio percentual de 22,21 μm .

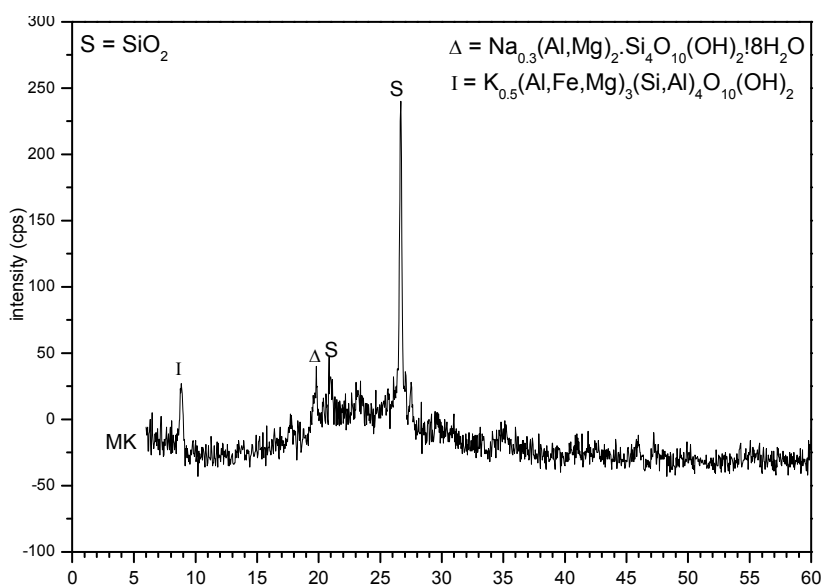
Figura 4.7 Curva granulométrica do metacaulim.



A massa específica do metacaulim utilizado, determinada de acordo NBR NM 23 (2001), apresentou valor de 2,55 g/cm³.

A figura 4.8 apresenta o resultado do ensaio de difração de raios X do metacaulim utilizado na produção dos CAA analisados. O difratograma do metacaulim evidencia que o material é amorfo, mas com fases cristalinas evidenciadas pelos picos de dióxido de silício e ilita.

Figura 4.8 Difração de raios X do metacaulim.

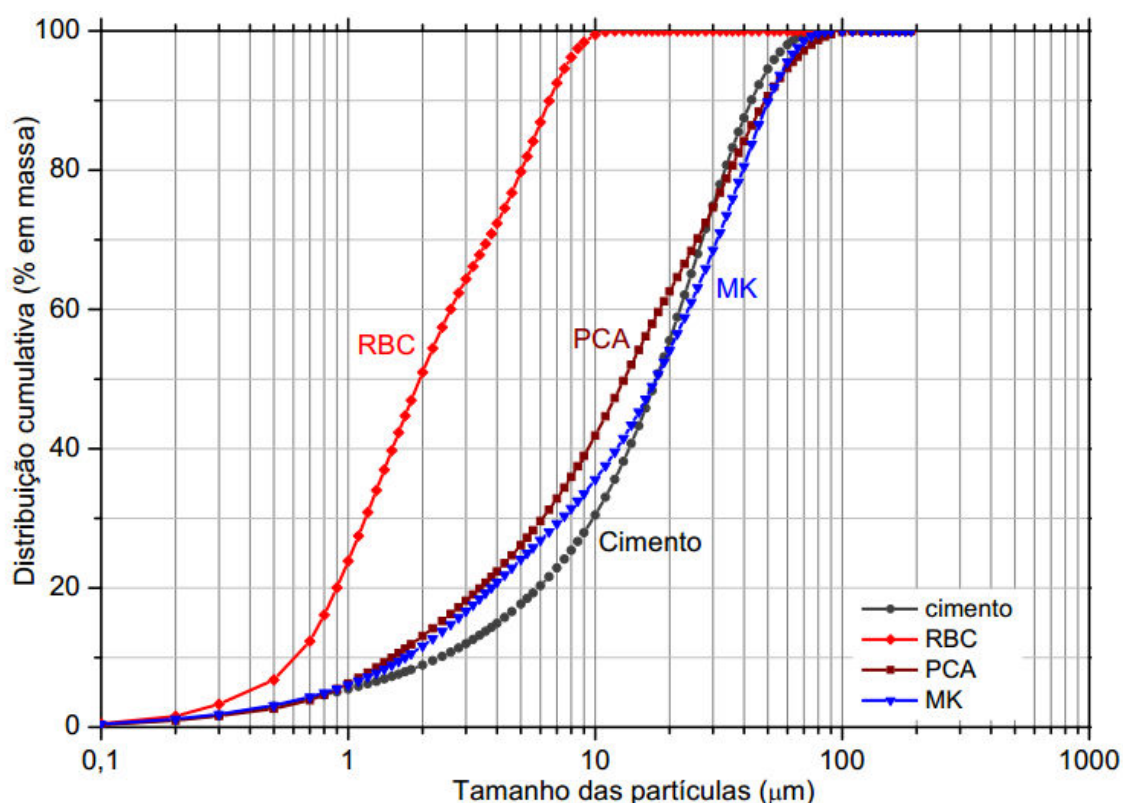


4.1.5 Avaliação da pozolanicidade

A figura 4.9 apresenta uma comparação entre a granulometria do cimento e das adições RBC, MK e PCA. Verifica-se que o RBC é o material mais fino utilizado, o que pode proporcionar grande influência na eficiência do empacotamento das partículas, influenciando positivamente na resistência à compressão e na diminuição da porosidade/absorção capilar das argamassas, mesmo que a atividade pozolânica apresente valores mais baixos. A maior finura do RBC pode influenciar também no comportamento dos CAA no estado fresco, por requerer maiores teores de aditivos para manutenção da fluidez.

Os demais finos utilizados apresentaram granulometria parecida, como é possível verificar na figura 4.9.

Figura 4.9 Curvas granulométricas do cimento e adições utilizadas.



Como apresentado na tabela 4.6, as características granulométricas conferem aos materiais índice de desempenho com cimento Portland com valores de resistência à compressão de argamassas acima de 90%, o que caracteriza as amostras de RBC e PCA como materiais pozolânicos. Os resultados do IAP com cal

foram inferiores a 6MPa para ambas as adições, com resultados aos 7 dias de 2,1 MPa para o RBC e 4,1 para o PCA.

Dessa forma, as argamassas desenvolvidas se apresentaram em conformidade com os requisitos estabelecidos na NBR 12653 (2014) para o IDC e não atendendo o requisito mínimo da referida norma sobre IAP.

Tabela 4.6 Resultados das argamassas para determinação do IDC e das pastas para determinação do IAP.

Amostra	Resistência média*(Mpa)	IDC aos 28 dias (%)	Índice de consistência (mm)	IAP aos 7 dias (MPa)
Referência	30,01	-	180	6,0**
RBC	29,03	97	185	2,1
PCA	33,69	112	175	4,1

* média de 6 determinações

** Valor mínimo, de acordo com a NBR 12653 (2014)

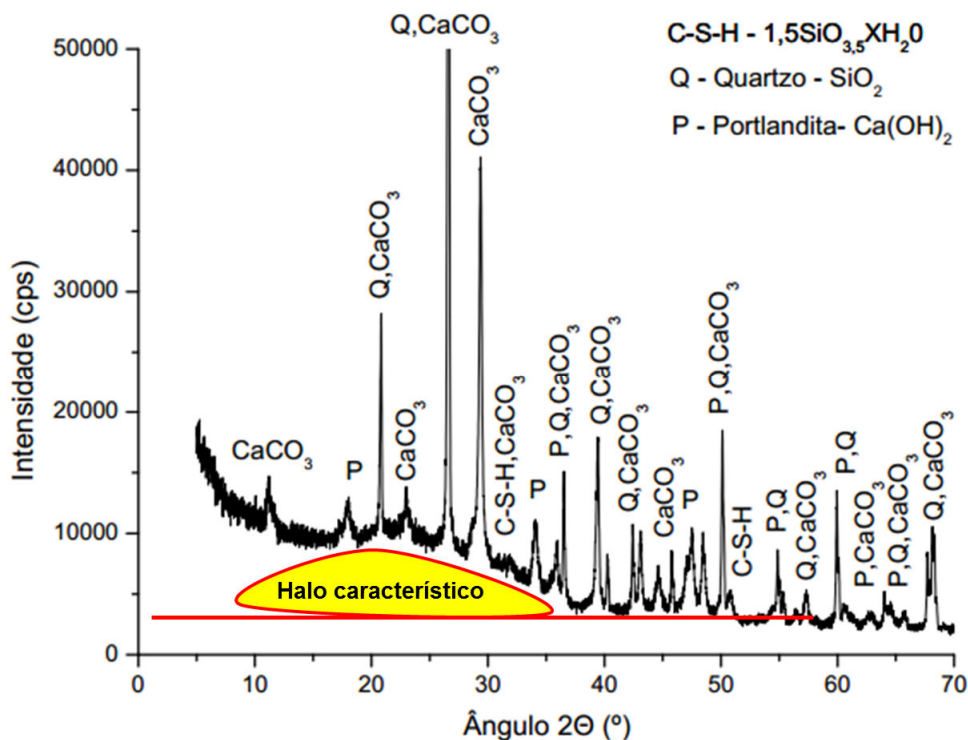
Conforme recomendações da NBR 5752 (2014) foi utilizado aditivo superplastificante no teor de 0,32% para manter o índice de consistência normal das argamassas com adições de RBC e PCA em ± 10 mm da argamassa de referência.

A maior finura do RBC certamente influenciou positivamente nos ganhos de resistência em relação às outras adições, dado que, segundo Anjos (2009), a granulometria e área específica de uma adição mineral são os principais fatores de controle de qualidade destes, pois estas propriedades controlam a eficiência da adição em cimento quanto à facilidade para a reação pozolânica ou mobilidade das partículas que penetram nos poros da pasta hidratada realizando o efeito *filler*.

Os resultados do índice de desempenho com cimento Portland são os primeiros indicativos do bom comportamento do RBC e da sua possível utilização como adição em concretos. Apesar de apresentar valores ligeiramente abaixo da PCA, o RBC pode ser, para a região Nordeste, uma opção mais viável e sustentável.

Nas pastas do IAP produzidas para DRX foram identificados compostos hidratados e halo amorfo característico de estrutura vítrea, além do consumo de portlandita por atividade pozolânica. As figuras 4.10 e 4.11 apresentam os difratogramas das pastas com RBC e com PCA respectivamente, com a identificação das fases cristalinas presentes nas adições minerais e os compostos hidratados formados.

Figura 4.10 Difração de raios X da pasta produzida para IAP com RBC.

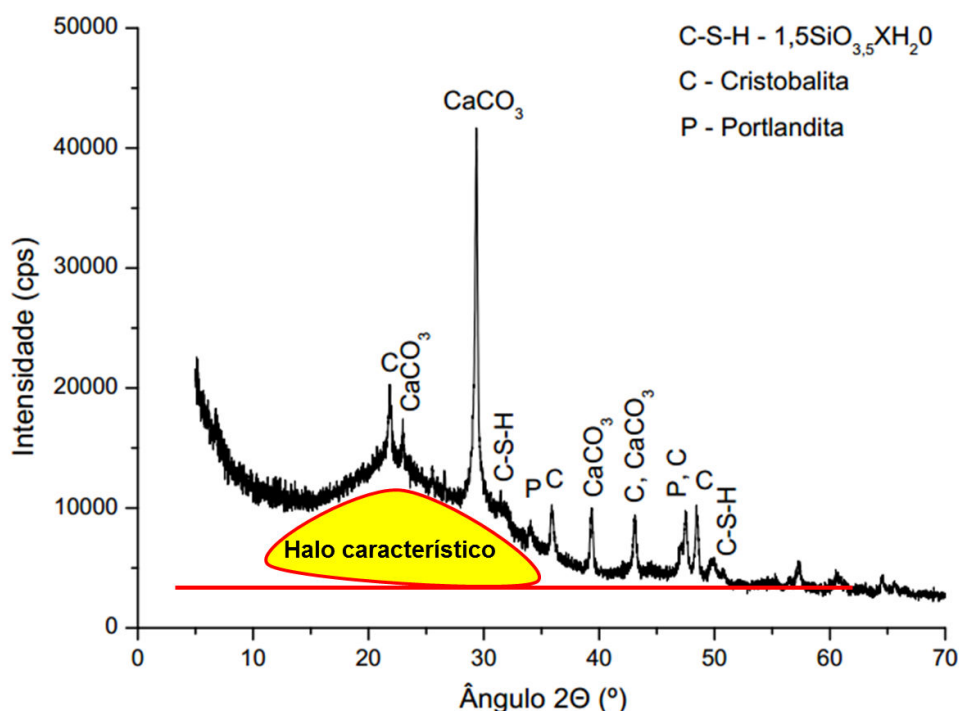


Na pasta com cinza de casca de arroz foram identificados picos referentes ao quartzo (SiO_2), uma das formas polimórficas do dióxido de silício, indicando haver, além da estrutura vítrea da pozolana, uma estrutura cristalina. O halo amorfo destacado no difratograma indica que na idade de 7 dias a atividade pozolânica não consumiu totalmente a sílica amorfa e que, portanto, há potencial para que a reação tenha prosseguimento, desde que haja disponibilidade de cal e maior tempo de cura. A identificação de portlandita possibilita haver continuidade da reação química, interrompida pelo término do ensaio. A identificação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) evidencia a formação de matriz hidratada, resultado da atividade pozolânica.

O difratograma da pasta de IAP da PCA apresentou picos de cristobalita (SiO_2) e, assim como para o RBC, halo amorfo. Também foi identificada a presença de portlandita e formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), formado a partir da reação do hidróxido de cálcio, presentes na cal, e do dióxido de silício, presentes na PCA.

Embora nem o RBC nem o PCA tenham atingido o IAP, os ganhos de resistência e o DRX das pastas mostraram a formação de C-S-H, comprovando a atividade pozolânica das referidas adições.

Figura 4.11 Difração de raios X da pasta produzida para IAP com PCA.



4.2 Ensaios no estado fresco

4.2.1 Análise das composições

A EFNARC (2005) orienta o projeto de mistura e dá uma indicação da gama típica de constituintes do CAA em peso e em volume, embora deixe claro que estas proporções não limitam as misturas de CAA, podendo muitas vezes estar fora desta faixa para um ou mais componentes.

Com base nisso, foram calculados os parâmetros descritos pela EFNARC (2005) para cada mistura desenvolvida, comparando com as faixas indicadas no documento (tabela 4.7).

Percebeu-se, conforme os resultados apresentado na tabela 4.7, que a relação água/finos para os CAA estudados excedeu os valores determinados pela EFNARC (2005) de 0,85 a 1,10, com o objetivo de manutenção da relação água/finos e comportamentos de autoadensabilidade das composições com altos teores de adições, considerando a maior demanda de água ocasionada também pelo clima quente da região Nordeste do Brasil. Para os CAA com adições, a relação água/finos apresentou valores bem próximos ao limite especificado pela EFNARC (2005) e por Coppola (2001), que vai até 1,20. Para o concreto de referência, a

relação volumétrica de água/finos fornece número mais elevado motivado pelo maior valor da massa específica do cimento em relação às adições utilizadas, que influenciou no incremento da quantidade de agregados e consequentemente uma maior demanda de água para o atendimento das composições em massa.

Tabela 4.7 Índices de composição da mistura de CAA conforme EFNARC (2005).

	EFNARC (2005)	REFCAA	PCA20MK20	PCA30MK20	RBC20MK20	RBC30MK20
Cimento	-	451,1	265,6	220,4	265,1	219,7
PCA	-	0	88,5	132,2	0	0
RBC	-	0	0	0	88,4	131,8
MK	-	0	88,5	88,1	88,4	87,9
Areia	-	739,8	725,9	722,8	724,6	720,7
AG (kg/m³)	750-1000	974	956	952	954	949
água (l/m³)	150-200	198,5	194,8	191,7	194,4	191,2
Aditivo	-	1,91	4,56	6,61	4,86	5,27
Aditivo (%)	-	0,423	1,03	1,50	1,10	1,20
Finos (kg/m³)	380-600	451,1	442,6	440,7	441,8	439,5
Pasta (l/m³)	300-380	346,4	358,7	361,5	359,9	363,3
Argamassa (%)	-	55	55	55	55	55
AM (% em peso do total de agregados)	48-55	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2
Razão água/finos (l/m³)	0,85-1,1	1,34	1,19	1,13	1,17	1,11

As quantidades de finos, pasta, água e agregado graúdo dos CAA desenvolvidos foram mantidos dentro dos valores determinados pela EFNARC (2005). A porcentagem de agregado miúdo em relação ao peso total de agregados foi mantida constante, embora abaixo das recomendações da EFNARC (2005).

4.2.2 Ensaios de caracterização no estado fresco

Os concretos apresentaram boa coesão, sem presença de exsudação e segregação, comportamento provocado principalmente pela presença de altos teores de adições com partículas pequenas, que agem como bloqueadores de poros, aumentando o contato sólido-sólido.

As propriedades de fluidez, capacidade de enchimento, viscosidade e habilidade passante dos concretos autoadensáveis foram determinadas pelos ensaios de Espalhamento, T₅₀₀, Funil V, Anel J e Caixa L. Na tabela 4.8 estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios no estado fresco e suas classificações segundo a NBR 15823 (2010).

Tabela 4.8 Propriedades dos concretos no estado fresco.

Traço	Espalhamento		Anel J		Funil V		Caixa L	Classificação segundo NBR 15823 (2010)		
	T500 (s)	Slump -flow (mm)	T500 (s)	Slump -flow (mm)	Tempo (s) (após 30s)	Tempo (s) (após 5min)	H2/H1	Classe de fluidez	Classe de viscosidade	HP**
REFCAA	2	730	3,1	612,5	2,35	3,26	0,8	SF2	VS1/VF1	PL2
PCA20MK20	3,9	645	obstruiu		Obstruiu		obstruiu	SF1	VS2/*	*
PCA30MK20	3,18	788	*	775	16	19,73	0,96	SF3	VS2/VF2	PL2
RBC20MK20	3,31	630	obstruiu		15,98	22,97	0,73	SF1	VS2/VF2	*
RBC30MK20	2,5	790	4,37	605	19,39	obstruiu	0,46	SF3	VS2/VF2	*

* Não Realizado

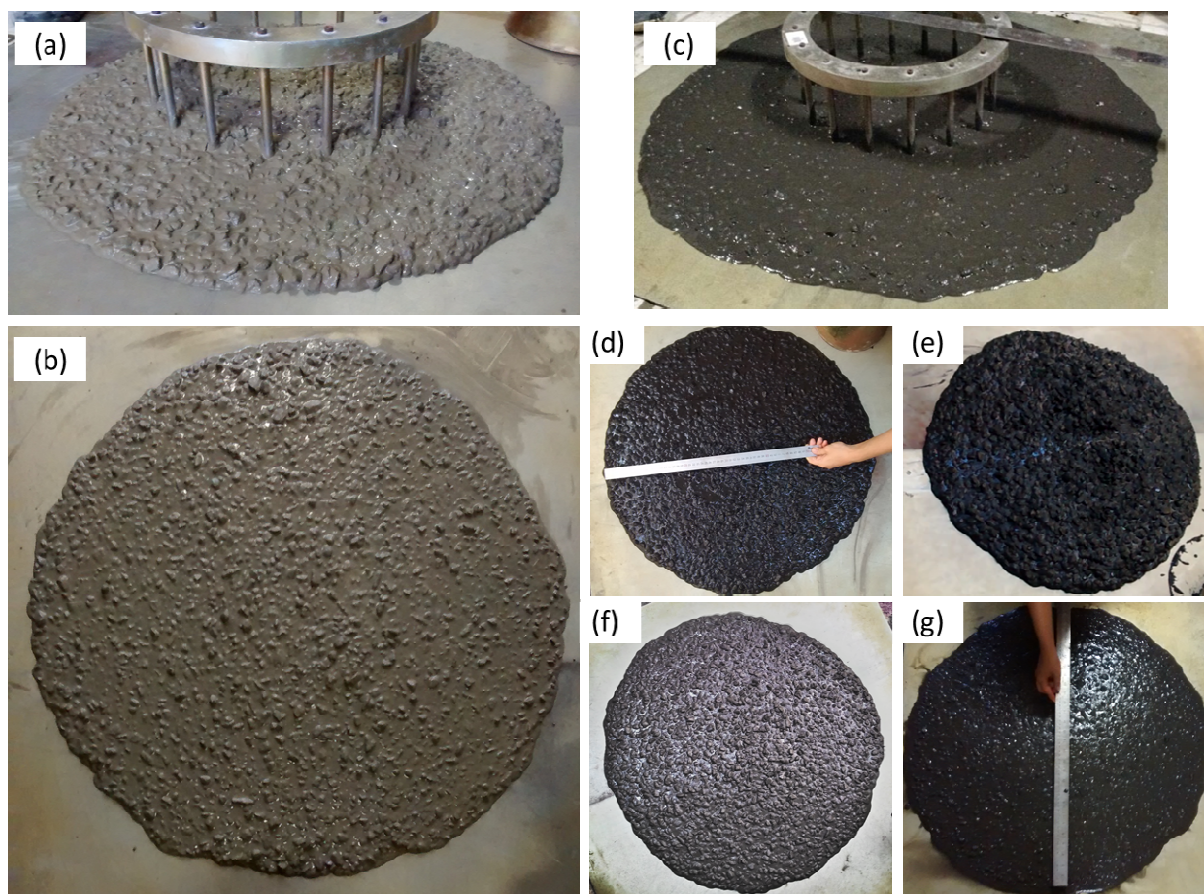
**Habilidade Passante

Verificou-se a necessidade de aumento de superplastificante nos traços com 40% de substituição, para se atingir os parâmetros da Norma, principalmente para o PCA20MK20. O aumento do teor de adição provavelmente resolve os problemas inesperados de obstrução nos ensaios Anel J, Funil V, e Caixa L, tendo em vista que, mesmo com teores de substituição maiores, as composições com 50% de substituição, apresentaram resultados melhores.

Como era esperado, as composições com maior quantidade de adições, necessitaram de maiores teores de aditivo para manter a fluidez esperada. Para as composições com 40% de substituição, os teores de aditivo utilizados sobre a massa dos finos foram de 1,03% e 1,1%, para os concretos com PCA e RBC, respectivamente. Já para as composições com 50% de adição, teores de aditivo utilizados foram de 1,03% e 1,1%, para os concretos com PCA e RBC, respectivamente. Enquanto que o concreto de referência necessitou de apenas 0,423% de aditivo, chegando-se a conclusão que a incorporação das adições influenciou na plasticidade dos concretos. Devido à elevada superfície específica das adições, em especial o RBC, as misturas também acabam requerendo maiores quantidades de aditivos químicos para alcançarem os espalhamentos semelhantes.

A figura 4.2 apresenta imagens dos ensaios de espalhamento e anel J dos referidos concretos.

Figura 4.12 Espalhamentos e anel J dos CAA (a) REFCAA, (b) REFCAA, (c) 30PCA20MK, (d) 20RBC20MK, (e) 30RBC20MK, (f) 20PCA20MK e (g) 30PCA20MK.



Os concretos apresentaram dificuldade de manter tempos em aberto maiores que 30 minutos, o que, devido a não simultaneidade na execução dos ensaios, influenciou nos resultados de alguns ensaios no estado fresco, principalmente Anel J e Caixa L, que eram executados após os demais e acabaram apresentando obstruções. A temperatura do ambiente (29 ± 2 °C) também pode ter influenciado no tempo de manutenção da fluidez dos concretos.

Os concretos REFCAA E PCA30MK20 foram classificados como PA2, estando, dessa forma, adequados para a maioria das aplicações correntes (NBR 15823-1, 2010). Porém, nas demais composições não apresentaram resultados satisfatórios de viscosidade pelo ensaio Caixa L, justificado pela alta finura e grande área superficial das adições, que aumentam a necessidade de água ou aditivo superplastificante para manutenção da fluidez. Foi possível perceber, através de

análise visual, durante a produção dos concretos, que a presença das adições no concreto, em especial do RBC, aumentava significativamente a viscosidade, comprovado pelos altos valores de passagem do CAA pelo Funil V.

Para contornar o problema, optou-se por aumentar o teor de aditivo testado anteriormente, que funcionava por alguns minutos, porém o concreto apresentou perda de fluidez muito rápida, provavelmente explicada pelo calor do ambiente no momento dos ensaios, que contribuiu para perda de parte da água de amassamento; somado à possível baixa interação entre as adições o aditivo SCC 160.

Apesar das dificuldades encontradas durante a execução dos ensaios, foi possível chegar a conclusão de que é possível obter concretos autoadensáveis com boas propriedades no estado fresco utilizando altos teores de adições de MK, PCA e RBC.

4.2.2.1 Fluidez e viscosidade

Segundo Okamura & Ouchi (2003), os ensaios propostos para concreto são também indicados para obtenção de parâmetros como a sua fluidez e viscosidade, definidos pelos índices Γ_c e R_c respectivamente, conforme equações 4.3 e 4.4.

$$\Gamma = \frac{(Sfl_1 * Sfl_2 - Sfl_0^2)}{Sfl_0^2} \quad (4.3)$$

$$R_c = \frac{10}{t} \quad (4.4)$$

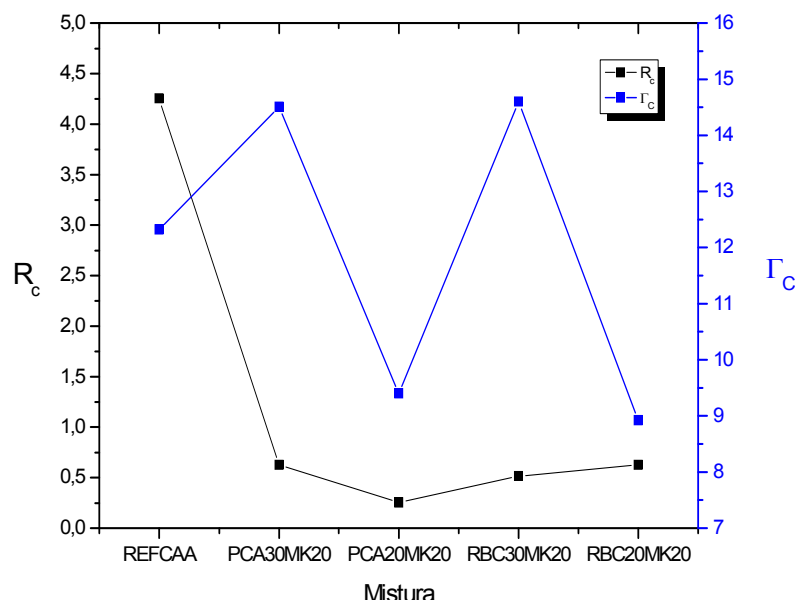
Onde: Sfl_1 e Sfl_2 = medidas de slump flow (mm), Sfl_0 = medida do diâmetro da parte inferior do tronco de cone (mm) e t = tempo de escoamento no Funil V (s).

Estes parâmetros foram calculados para todas as misturas e são apresentados na figura 4.13.

Ainda de acordo com a tabela 4.8, os concretos com adições foram classificados, quanto à viscosidade, como VS2/VF2. No entanto, verifica-se, de acordo com a figura 4.13, que os concretos com 50% de substituição apresentam viscosidades muito próximas de acordo com o parâmetro viscosidade (R_c). Já os concretos com 40% de substituição apresentam viscosidades próximas, para

concretos PCA20MK20 e RBC20MK20, o que demonstra que o parâmetro R_c é mais sensível a mudanças de viscosidades.

Figura 4.13 Parâmetros de deformabilidade (Γ_c) e a viscosidade (R_c).



Quanto ao parâmetro fluidez (Γ_c), que denota a deformabilidade do concreto no estado fluido verifica-se que os concretos com 40% de substituição apresentaram-se menos deformável, ou seja, com maior coesão, fato constatado na avaliação visual. É possível observar que os concretos que obtiveram a mesma classificação segundo a NBR 15823 (2010), apresentaram valores próximos de fluidez.

Nenhum dos concretos estudados apresentou segregação após os ensaios ou durante a parada da mistura, no entanto durante os testes para determinação do teor de aditivo a ser adicionado, foi possível constatar que o uso de aditivos superplastificante além do necessário pode causar o fenômeno de exsudação, mesmo com a presença de altos teores de adições.

4.3 Ensaios no estado endurecido

4.3.1 Ultrassom

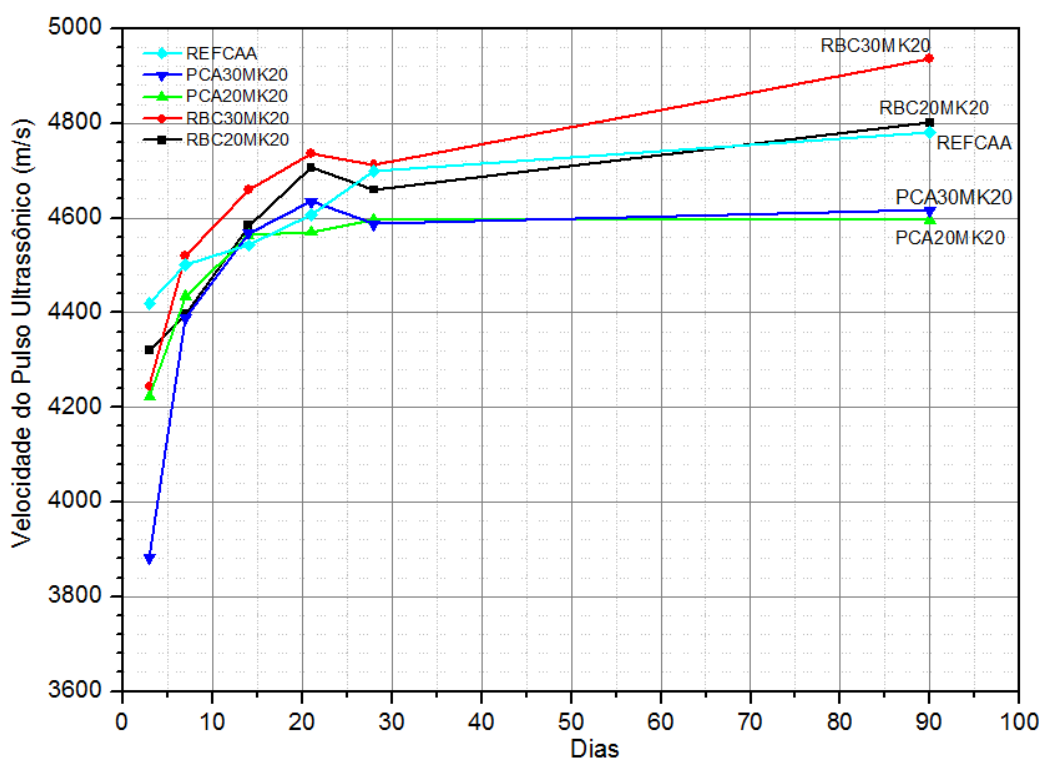
Os resultados das médias de velocidade do pulso ultrassônico dos corpos-de-prova aos 3, 7, 14, 21, 28 e 91 dias de idade de cada composição estão apresentados na figura 4.14.

Da figura 4.14, é possível constatar que, com o aumento da resistência à compressão dos corpos de prova de concreto, esses tendem a se tornar mais compactos em razão das reações de hidratação do cimento. Consequentemente, verificou-se, conforme era esperado, um aumento gradativo na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas com o aumento da idade e das resistências à compressão dos concretos.

A velocidade de pulso ultrassônico aumentou com o aumento da resistência à compressão para todas as misturas. A velocidade de pulso da mistura de CAA de referência foi 4698,4 m/s aos 28 dias, que aumentou para 4781,4 m/s após 91 dias. As variações correspondem ao grau de densificação dentro da estrutura interna, e velocidades mais elevadas geralmente indicam uma melhor qualidade da mistura de CAA.

É possível, através da figura 4.14, verificar que os concretos das composições com RBC apresentaram maior patamar de crescimento de velocidade de pulso entre os 28 e 91 dias, quando comparadas com os demais concretos.

Figura 4.14 Evolução das velocidades do pulso ultrassônico com a idade.



A adição de RBC aumentou a velocidade do pulso através da diminuição da porosidade total. Tal fato pode ser explicado pela elevada finura do material que

preenche melhor os vazios entre os grãos, aumentando o empacotamento das partículas na mistura, com consequente melhora na matriz e, principalmente, na zona de transição; bem como um efeito químico da reação da sílica (SiO_2) com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), dando origem a silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), responsáveis pela resistência mecânica do concreto.

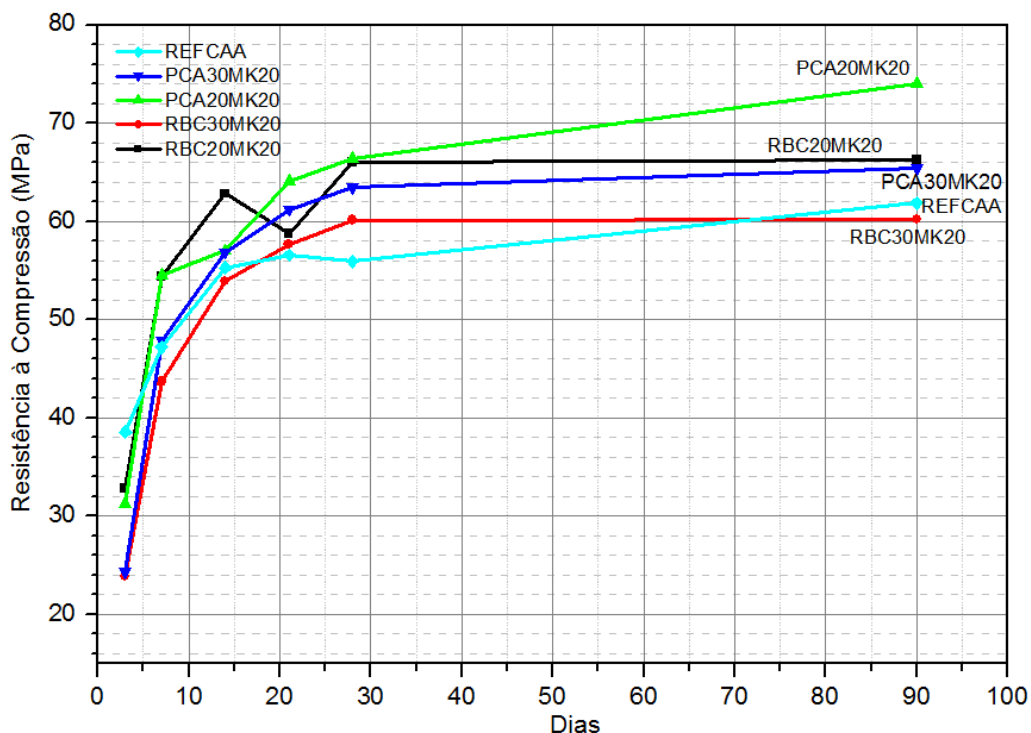
Aos 91 dias o RBC apresentou velocidade de pulso 3,2% maior que o concreto de referência nessa mesma idade. Já a adição da PCA apresentou menores valores de velocidade de pulso em todas as idades

4.3.2 Resistência à compressão axial

Segundo Neville (1997), a resistência à compressão dá uma ideia geral da qualidade do concreto, pois ela está diretamente relacionada com a estrutura da pasta de cimento hidratada.

Os resultados das médias das resistências à compressão dos corpos de prova rompidos aos 3, 7, 14, 21, 28 e 91 dias de idade dos concretos estão expressos graficamente na figura 4.15.

Figura 4.15 Evolução das resistências à compressão com a idade.



De maneira geral, os concretos com adições apresentaram maiores resultados de resistência à compressão, comparados ao concreto de referência, com exceção da idade aos 3 dias. Essa superioridade do concreto de referência em relação aos concretos com adições aos 3 dias pode ser atribuída ao cimento de alta resistência inicial utilizado no estudo e à menor velocidade das reações pozolânicas das adições, bem como a incapacidade do efeito microfíler das adições em compensar a retirada de cimento dos concretos.

Os acréscimos de resistência das composições com adições já nas idades iniciais podem ser justificados pela elevada reatividade do metacaulim e da PCA. O acréscimo ocasionado pelo RBC pode ser explicado pelo efeito microfíler, que aumenta o empacotamento do concreto.

As melhorias de resistência dos concretos com o emprego de adições pozolânicas é promovida pela densificação da matriz da pasta, devido às reações com o hidróxido de cálcio e formação de C-S-H adicional, e maior compacidade à zona de transição. Na zona de transição há também a redução da porosidade capilar e redução do teor de hidróxido de cálcio, aumentando então a quantidade de silicato de cálcio hidratado secundário próximo ao agregado.

As composições com PCA, apresentaram resultados de resistência superiores ao REFCAA para todas as idades igual e acima de 7 dias. A composição com PCA30MK20 apresentou elevação da resistência à compressão de 13,4 % aos 28 dias em relação ao concreto de referência, validando o maior incremento de resistência obtido no ensaio de IDC para o PCA.

Cordeiro *et al.* (2009), ao avaliar a substituição do cimento por PCA em concreto convencional, verificou incrementos de mais significativos e melhores resultados para teores de substituição de 20%.

As composições com RBC apresentaram melhores valores de velocidade de pulso ultrassônico quando comparadas com as com PCA, porém os concretos com PCA apresentaram maiores resistências. A superioridade da velocidade de pulso das composições com RBC pode ser explicado pelo efeito filler das adições ter sobressaído o químico ocasionado pelas reações pozolânicas. É possível então chegar à conclusão que a velocidade do pulso não é sempre correlacionada diretamente com a resistência.

As composições com RBC apresentaram patamares de resistência muito próximos das composições com PCA. Aos 28 dias, a resistência à compressão do RBC20MK20 foi 6,6% maior que o REFCAA, enquanto que o concreto com 50% de substituição apresentou resultado muito próximo ao de referência, evidenciando a boa contribuição do RBC para a manutenção e melhora das características mecânicas do CAA, mesmo com menores consumos de cimento.

A partir dos resultados de resistência à compressão, é possível comprovar também o aumento de resistência ainda para idades maiores, como 91 dias. A essa idade, os concretos permanecerem apresentando ganhos significativos de resistência, em especial o PCA20MK20 que apresentou incremento de quase 20% de resistência em relação ao concreto de referência.

A utilização de materiais cimentícios como substituição de parte do cimento Portland conduz a modificações na interface (Isaia, 2011), segmentando os canais de percolação de água na pasta de cimento, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre que, normalmente, fica retido sob os agregados e fortalecendo a zona de transição.

Na figura 4.16 é possível visualizar a presença de um eixo de simetria no plano de rompimento do corpo de prova, o que comprova o rompimento do agregado após o ensaio de resistência à compressão do concreto da composição PCA30MK20, fundamentando as boas características da pasta e especialmente da zona de transição, mesmo com o concreto aos 14 dias de idade. As adições absorveram água de amassamento suficiente para diminuir o acúmulo de água livre próxima à superfície do agregado, reduzindo e fortalecendo, dessa forma, a zona de transição e tornando-a tão ou mais resistente que o agregado.

Os valores de resistência à compressão podem confirmar a real aplicabilidade dos concretos estudados, com valores de resistência de até 74,1 MPa, mesmo com um baixo consumo de cimento, variando de 220 a 265 kg/m³.

A tabela 4.9 mostra a relação de eficiência de cada formulação, considerando eficiência como a relação entre MPa/kg de cimento. Su & Miauo (2003) consideram valores entre 0,11 a 0,14 MPa/kg para desenvolver concretos de média resistência com baixo teor de cimento.

Figura 4.16 Eixo de simetria no plano de rompimento do corpo de prova durante o ensaio de resistência à compressão da composição PCA30MK20 aos 14 dias.



Tabela 4.9 Relação entre a resistência e o consumo de cimento dos concretos produzidos.

Composição	Consumo de cimento (kg/m ³)	28 dias (MPa/kg)	90 dias (MPa/kg)
REFCAA	451,1	0,12	0,14
PCA30MK20	220,4	0,29	0,30
PCA20MK20	265,6	0,25	0,28
RBC30MK20	219,7	0,27	0,27
RBC20MK20	265,1	0,25	0,25

Verifica-se que os valores encontrados para os CAA com baixo teor de cimento e elevados teores de adições encontrados nesta pesquisa são mais que o dobro dos determinados por Su & Miao (2003) e também mais que o dobro dos valores encontrados para a composição de CAA de referência evidenciando a eficiência dos concretos produzidos.

4.3.3 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico foi calculado utilizando massa específica real (ME_{REAL}), determinada para cada corpo de prova em conformidade com a NBR 9778 (2009), a velocidade de pulso ultrassônico obtida e o coeficiente de Poisson considerado igual a 0,2, conforme recomendações da NBR 6118 (2014)

Os resultados de módulo de elasticidade dinâmico são mostrados na tabela 4.10 e indicam, como era esperado, aumento do módulo entre as idades de 28 e 91 dias, em geral com menores valores para os concretos com a presença das adições.

Tabela 4.10 Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico.

Composição	Idade	Média Ed (GPa)
REFCAA	28	49,22
	91	51,20
PCA20MK20	28	46,50
	91	47,88
PCA30MK20	28	52,50
	91	46,26
RBC20MK20	28	46,74
	91	50,52
RBC30MK20	28	48,99
	91	53,86

A diminuição do módulo com a presença das adições é atribuída à maior quantidade de agregado graúdo e menor quantidade de pasta do concreto de referência, pois o agregado apresenta módulo de elasticidade superior ao da pasta (Uysal & Yilmaz, 2011).

Os resultados também evidenciaram módulos de elasticidade dinâmicos maiores que o módulo de elasticidade estático, corroborando a afirmação de Mehta & Monteiro (2014) de que o módulo de elasticidade dinâmico é 20% mais alto do que o módulo de elasticidade estático para concretos de alta resistência.

Os resultados para os concretos da composição PCA30MK20 se apresentaram inconsistentes, pois houve um aumento do módulo de elasticidade dinâmico entre as idades de 28 e 91 dias, divergência atribuída ao resultado de massa específica utilizado para obtenção do módulo.

4.3.4 Módulo de elasticidade estático à compressão

Por ter um menor teor de agregado graúdo, o módulo de elasticidade do CAA tende a ser menor que o do concreto convencional de mesma resistência à compressão. Contudo, essa diferença depende no nível de resistência do concreto e da sua composição. (Isaia, 2011).

O módulo de deformação estático referiu-se a tangente inicial (E_{ci}), obtido seguindo os procedimentos para o plano de carga da NBR 8522 (2003), em uma prensa hidráulica, cujos resultados médios obtidos aos 28 dias estão demonstrados na tabela 4.11.

Tabela 4.11 Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade estático.

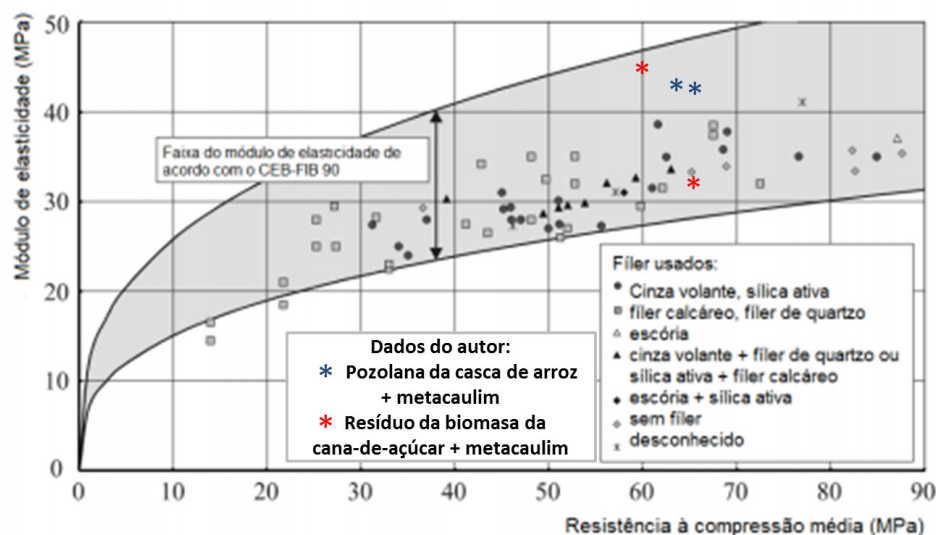
Composição	Idade	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade estático (GPa)
REFCAA	28	55,9	51,35
PCA20MK20	28	66,4	42,25
PCA30MK20	28	63,5	42,45
RBC20MK20	28	66,0	32,55
RBC30MK20	28	60,2	44,55

Com base nos resultados obtidos, constatou-se existir uma diminuição do módulo de elasticidade para as misturas de CAA com a presença das adições nas misturas.

O valor do módulo de elasticidade estático do concreto da composição RBC20MK20 apresentou valor inconsistente, quando comparado com os demais.

Os E_{ci} dos concretos com adições encontram-se dentro da faixa estabelecida (figura 4.17) para os valores de módulo de elasticidade de CAA com adições por Holschemacher & Klog (2002).

Figura 4.17 Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade de diferentes CAA em comparação com a faixa de previsão referente ao *Model Code* 90. Fonte: Adaptado de Holschemacher e Klog, 2002 *apud* Marques 2011.



4.3.5 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Os resultados das propriedades físicas dos concretos estudados estão apresentados na tabela 4.12 e destacados os comportamentos da absorção de água por imersão e do índice de vazios na figura 4.18.

Tabela 4.12 Resultados das propriedades físicas dos concretos produzidos.

Composição	Idade	Propriedades Físicas				
		Ab _{IMERSÃO}	Iv	ME _{SECA}	ME _{SAT}	ME _{REAL}
REFCAA	28	2,55%	5,94%	2,330	2,390	2,477
	91	3,05%	7,06%	2,313	2,383	2,489
PCA20MK20	28	3,07%	6,98%	2,274	2,344	2,445
	91	1,50%	3,48%	2,322	2,357	2,405
PCA30MK20	28	2,39%	6,21%	2,599	2,661	2,771
	91	2,50%	5,69%	2,274	2,331	2,412
RBC20MK20	28	0,53%	1,25%	2,362	2,374	2,392
	91	2,55%	5,85%	2,292	2,351	2,435
RBC30MK20	28	3,31%	7,50%	2,268	2,343	2,452
	91	3,13%	7,13%	2,281	2,353	2,456

Segundo Mehta & Monteiro (2014), a reação pozolânica envolvendo adições minerais causa um refinamento dos poros que reduz a permeabilidade do concreto.

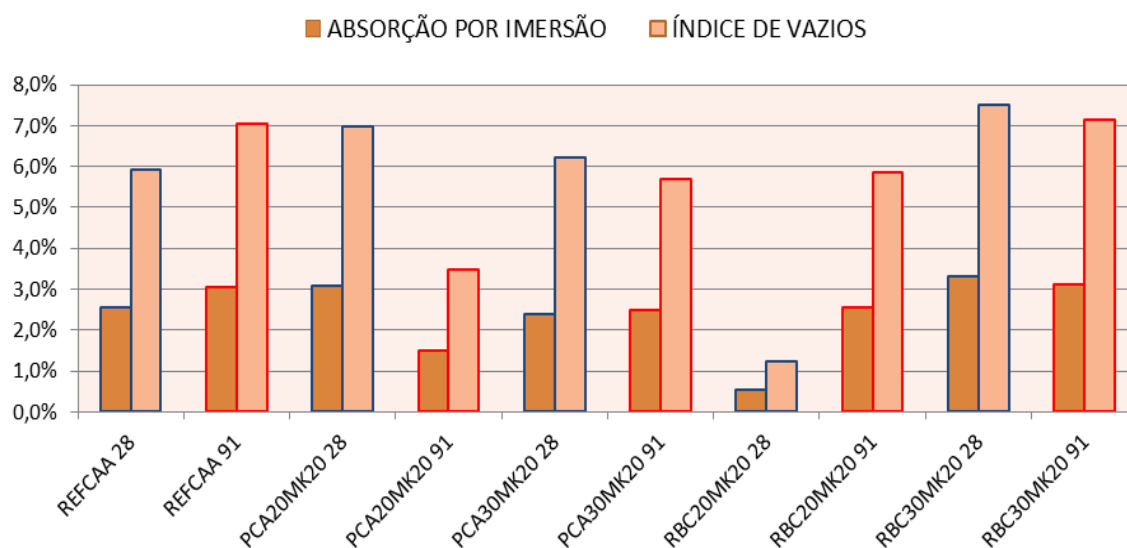
Os resultados mostraram que o RBC e a PCA, juntamente com o MK, propiciam aumentos da porosidade nas idades iniciais, decorrentes de uma quantidade mais baixa de compostos hidratados produzidos em relação ao concreto de referência.

Os resultados mostraram também uma redução no índice de vazios, na absorção e na porosidade total de todos os concretos com adições em relação ao REFCAA aos 91 dias de idade. Para essa mesma idade, o concreto com 30% de PCA apresentou uma diminuição de 18,0% no índice de vazios em relação ao concreto padrão. Enquanto o concreto com 20% de PCA apresentou uma diminuição, ainda maior, de 50,8%.

A composição RBC30MK20 apresentou, aos 91 dias, ligeiro aumento da absorção e do índice de vazios em relação ao concreto de referência, enquanto que, para a mesma idade, a composição com 20% de RBC apresentou uma diminuição significativa em ambas as propriedades (16,4% e 17,1% de redução).

Aos 28 dias, o concreto de referência apresentou menor índice de vazios do que as demais composições, embora o PCA30MK20 tenha apresentado valores bem próximos. Já aos 91 dias, com o avanço das reações pozolânicas das adições, o concreto de referência passou a apresentar maior índice de vazios do que as demais composições, embora nessa idade o RBC30MK20 tenha apresentado valores bem próximos.

Figura 4.18 Absorção por imersão e índice de vazios dos concretos produzidos.



De maneira geral, as propriedades físicas das composições com PCA apresentaram comportamento melhor que as composições com RBC, embora ambas tenham apresentado bons resultados em relação ao concreto de referência, mesmo com uma diminuição de até 50% de cimento nas composições.

Observa-se, então, que o concreto PCA20MK20 apresentou melhores resultados que os demais e que, para a adição de RBC, a composição que apresentou melhores resultados foi RBC20MK20. Os resultados encontrados para os índices de vazios estão em consonância com os resultados de resistência à compressão encontrados aos 91 dias, considerando que menores índices de vazios estão ligados a maiores resistências à compressão.

A grande redução da absorção e índice de vazios é resultando do aumento de compacidade para os concretos contendo PCA e RBC pode ser explicada pela morfologia e tamanho das partículas de adição e pela maior densificação da matriz cimentícia causada pelas reações pozolânicas e pelo efeito *filler*.

Apesar da substituição de 40 e 50% do cimento por adições, os concretos apresentaram resultados de índices de vazios semelhantes para o concreto RBC30MK20 e os concretos das demais composições apresentaram significativa melhora em relação ao concreto de referência. Tal fato reafirma a eficácia do uso das adições em estudo em substituição parcial ao cimento para CAA, promovendo aos concretos maior compacidade, menor porosidade, e maior resistência à penetração dos agentes agressivos.

Os resultados para a composição com 20% de RBC aos 28 dias apresentaram incoerência e serão então repetidos. Os resultados do REFCAA aos 28 dias também parecem inconsistentes, pois se apresentaram menores que os valores para 91 dias.

4.4 Ensaios de durabilidade

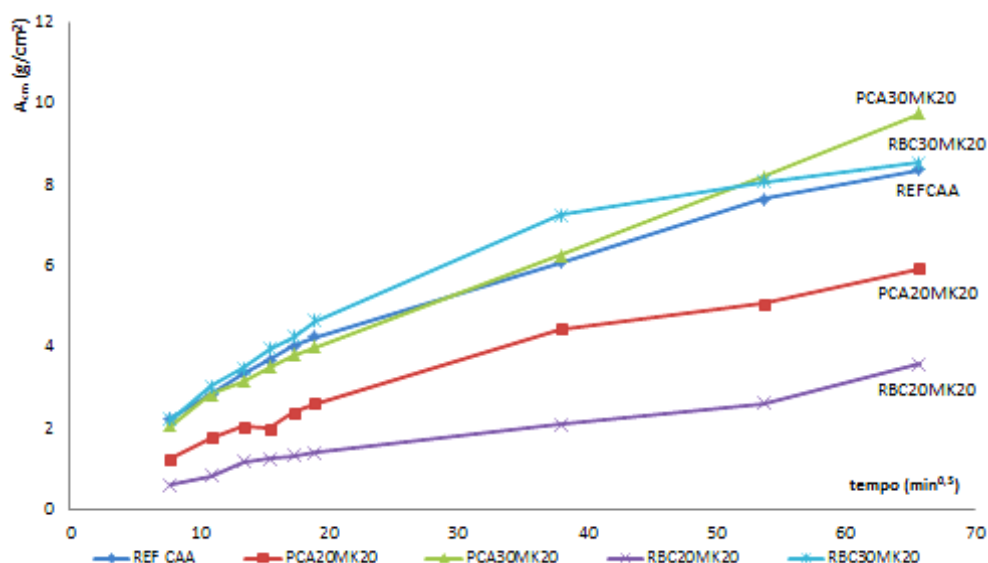
4.4.1 Absorção por capilaridade

Nas figuras 4.19 e 4.20 são apresentadas as curvas de absorção capilar para os 28 e 91 dias de idade respectivamente, as quais correspondem aos valores médios, A_{cm} , para as diferentes composições, obtidos através do ensaio de três corpos de prova para cada composição.

A realização deste ensaio permite avaliar de forma eficaz a durabilidade de uma determinada composição, isto porque, quanto mais baixos forem os valores de absorção, maior será a dificuldade de penetração de agentes agressivos (Campos, 2012).

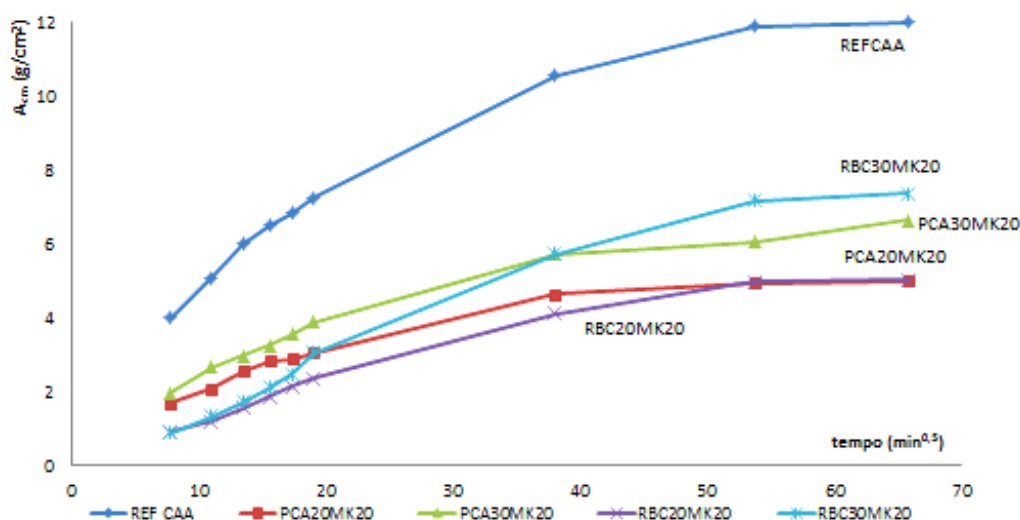
Aos 28 dias as composições com 50% de substituição apresentaram valores de absorção capilar próximos aos do concreto de referência. Nessa idade, as composições com 40% de substituição apresentaram melhores resultados de absorção capilar em todo o tempo analisado, em especial a composição RBC20MK20, que, quando comparada ao REFCAA, apresentou uma diminuição de 35% da absorção às 24h.

Figura 4.19 Absorção de água por capilaridade dos CAA estudados aos 28 dias.



Como é possível observar na figura 4.20, aos 91 dias, todos os concretos com adições apresentaram absorção de água por capilaridade consideravelmente menor que o REFCAA. Os concretos com 40% de substituição apresentaram redução de quase 60% de A_{cm} em relação ao CAA de referência, comprovando os benefícios das adições utilizadas ao concreto.

Figura 4.20 Absorção de água por capilaridade dos CAA estudados aos 91 dias.



Os concretos com 50% de substituição também apresentaram valores de A_{cm} consideravelmente menores que para o REFCAA, evidenciando a diminuição dos poros capilares e origem de misturas mais compactas proporcionadas pela finura adequada e reatividade das adições.

Os coeficientes de absorção de água por capilaridade foram calculados para as idades de 60 min e 360 min e apresentam seus valores na tabela 4.13.

Tabela 4.13 Coeficiente de absorção de água por capilaridade nas idades de 60 min e 360 min.

Composição	Tempo (min)	Coeficiente de capilaridade (g/cm ² .min ^{1/2})	
		28 dias	91 dias
REFCAA	60	0,29	0,51
REFCAA	360	0,22	0,38
PCA20MK20	60	0,52	0,68
PCA20MK20	360	0,14	0,16
PCA30MK20	60	0,84	0,80
PCA30MK20	360	0,21	0,20
RBC20MK20	60	0,26	0,37
RBC20MK20	360	0,07	0,12
RBC30MK20	60	0,91	0,36
RBC30MK20	360	0,25	0,16

4.4.2 Migração em regime não estacionário

Conforme descrito no Capítulo 3, a percepção das composições estudadas à penetração de íons de cloro foi avaliada pelo ensaio de migração em regime não estacionário, através do coeficiente de difusão em regime não estacionário, de acordo com os procedimentos descritos no documento normativo LNEC E-463 (2004).

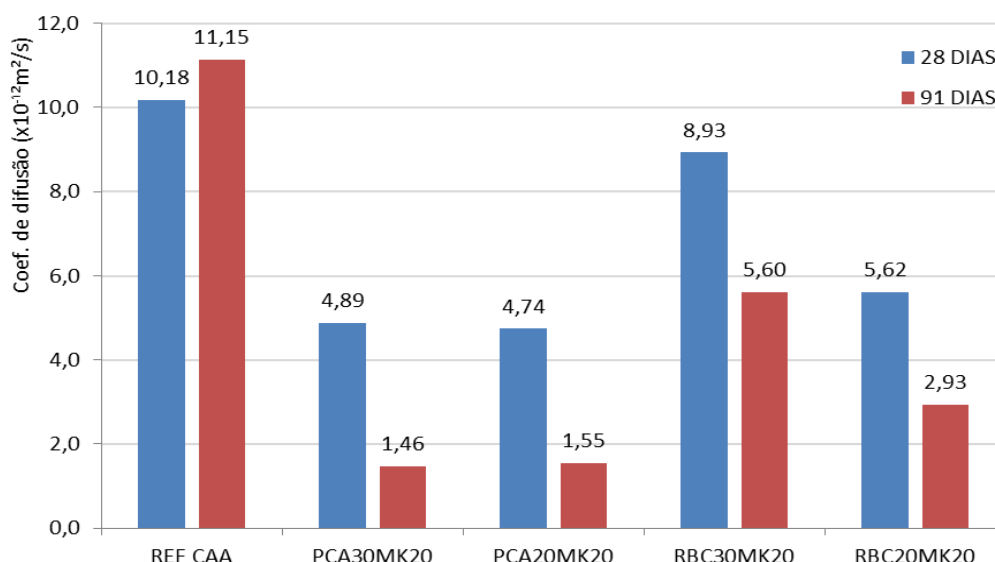
Os resultados dos ensaios para determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por regime não estacionário (figura 4.21) mostram o aumento da resistência à penetração dos cloretos nos concretos com adições, em especial aos 91 dias de idade.

Da análise dos resultados é possível verificar que todas as composições apresentam um comportamento significativamente melhor que o da composição de referência, o que permite evidenciar que a inclusão de grandes volumes de adições traz claros benefícios à durabilidade dos concretos.

A adição de 20% de metacaulim, pelo alto teor de alumina (Al₂O₃) presente no em sua composição, aumenta a fixação dos cloretos no concreto, através da

formação do cloroaluminato de cálcio, conhecido como sal de Friedel. Dessa forma, o metacaulim possibilitou a diminuição da quantidade de cloretos livres que penetraram através do concreto.

Figura 4.21 Coeficiente de difusão dos cloretos dos concretos estudados aos 28 e 91 dias.



Além da ação química de fixação de cloretos na forma de sal de Friedel, o metacaulim, assim como a PCA e o RBC, também produz um mecanismo físico de proteção, uma vez que contribui para um refinamento de poros da pasta de cimento endurecida do concreto, diminuindo sua absorção capilar.

Da figura 4.21 é possível perceber que a resistência à migração dos cloretos aumentou com o aumento da idade dos concretos através da diminuição do coeficiente de difusão de íons cloreto aos 91 dias, em relação aos valores encontrados aos 28 dias para os concretos com adições. Isso evidencia relevância da contribuição das adições, sobretudo para idades mais avançadas.

Para as composições com PCA, os concretos apresentaram resultados próximos quando comparados em cada idade analisada. O melhor resultado foi encontrado para os concretos da composição PCA30MK20 aos 91 dias, com redução de aproximadamente 87% do coeficiente de difusão dos cloretos, quando comparado com o concreto de referência. Essa significativa redução pode ser explicada pela atividade pozolânica da PCA e pelo efeito *filler*, que proporcionam refinamento dos poros e contribuem significativamente para a melhoria da matriz da

pasta e da zona de transição e resultam em maior dificuldade da passagem dos íons cloreto por difusão.

As composições com RBC também apresentaram diminuição da difusão de cloretos em ambas as idades. Para o concreto RBC30MK20, aos 91 dias, quando comparado o com REFCAA, a redução foi de quase 50%.

O melhor resultado encontrado com a adição do RBC foi para o RBC20MK20, com redução de 73,7% do coeficiente de difusão de íons cloreto aos 91 dias de idade. Os benefícios proporcionados pelas adições relativos à absorção capilar e à penetração de íons cloreto podem ser atribuídos à atividade pozolânica da cinza e, sobretudo, ao refinamento da estrutura de poros. Com o refinamento dos poros e a menor absorção capilar, os poros tornam-se menos interconectados e mais tortuosos, o que dificulta a penetração de cloretos nos concreto.

O resultado do ensaio de migração em regime não estacionário do CAA de referência apresentou uma pequena divergência, quando comparados os valores encontrados aos 28 e 91 dias, pois houve uma diminuição da resistência à migração de cloretos com o aumento da idade. Foi considerado, então, que não houve ganho de durabilidade entre as idades citadas.

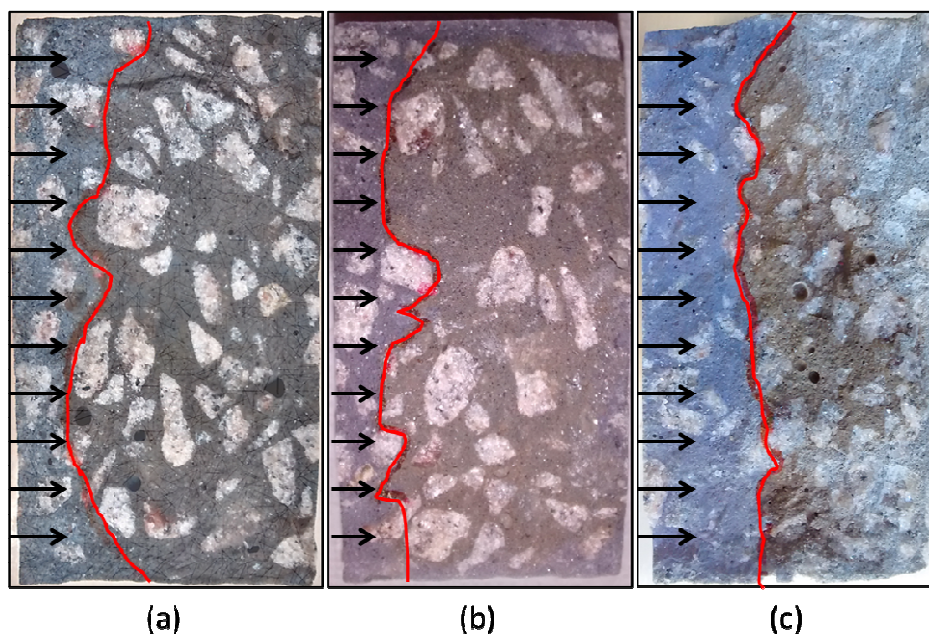
A figura 4.22 apresenta as profundidades de penetração dos cloretos após o ensaio de migração em regime não estacionário dos concretos RBC20MK20, PCA30MK20 e REFCAA, todos aos 91 dias. As setas indicam o sentido da penetração dos íons cloreto e a linha vermelha a profundidade dos mesmos ao término do ensaio.

Os três resultados destacados na figura 4.22 podem ser mais facilmente comparados de forma visual, pois foram submetidos à mesma voltagem, durante o mesmo tempo de ensaio. É possível perceber então a menor penetração dos íons cloreto nos concretos com adições em relação ao concreto de referência.

Pelos resultados expostos, o metacaulim, a pozolana da casca de arroz e o resíduo da biomassa da cana-de-açúcar proporcionam redução na absorção capilar e na penetração acelerada de íons cloreto, com manutenção das propriedades mecânicas, para teores de substituição de 40% e 50%. Assim, a possibilidade de produção de concretos estruturais e de alto desempenho com menor consumo de

cimento Portland, melhorando nas propriedades reológicas no estado fresco, tornam o metacaulim, o RBC e a PCA adições apropriadas ao CAA.

Figura 4.22 Profundidades de penetração dos cloretos (a) RBC20MK20 91 (b) PCA30MK20 91 (c) REFCAA 91.



O melhor comportamento nos índices de durabilidade (absorção por capilaridade e difusão de íons cloreto) do RBC em conjunto com o metacaulim, em relação ao concreto de referência, fundamenta a possibilidade de utilização de baixos teores de cimento e altos teores de adições minerais regionais em CAA.

4.5 Avaliação da contribuição do estudo para diminuição do impacto ambiental gerado na produção do CAA

Para avaliar a contribuição dos concretos estudados para a diminuição do impacto gerado pelo alto consumo de cimento e produção de CAA foram calculados índices que combinam os impactos ambientais incorporados nos materiais e na produção do CAA com a resistência dos concretos, conforme estudo de Long *et al.* (2015). Foi possível, então, avaliar como as proporções de mistura de CAA podem influenciar nas suas propriedades ecológicas e comparar os impactos ambientais das composições estudadas.

Foi também proposto um novo índice que propõe indicar a eficiência energética em termos de durabilidade para os concretos com baixos teores de cimento e elevados teores de adições minerais.

Tendo em vista a crescente preocupação com o impacto do aquecimento global do ambiente construído, a metodologia proposta por Long *et al.* (2015) é concentrada no dióxido de carbono emitido na extração, processamento e transporte do material utilizado e na produção do concreto.

O impacto do CAA (por m³) é analisado a partir de três aspectos: as emissões de CO₂, o consumo de energia e o dispêndio de recursos naturais primários em relação à resistência. Assim, os três índices, incluindo índice de CO₂ incorporado (índice e-CO₂, CI), índice de energia incorporada (índice e-Energia, EI) e índice de recurso natural primário incorporado (índice e-Recursos, RI), propostos por de Long *et al.* (2015), foram utilizados para avaliar a sustentabilidade das composições de CAA. Os três índices foram obtidos considerando-se uma combinação da eficiência ambiental e as resistências aos 28 e 91 dias dos concretos, conforme equações 4.5, 4.6 e 4.7:

$$CI = \frac{CO_2 \text{ incorporado}(kg / m^3)}{f_{ci}(MPa)} \quad (4.5)$$

$$EI = \frac{\text{energia incorporada}(MJ / m^3)}{f_{ci}(MPa)} \quad (4.6)$$

$$RI = \frac{\text{recursos naturais incorporados}(kg / m^3)}{f_{ci}(MPa)} \quad (4.7)$$

Os valores utilizados como o impacto ambiental de cada material utilizado na produção dos concretos estão apresentados na tabela 4.14.

Para o PCA e o RBC, os índices foram considerados iguais à zero, pois são resíduos de indústrias, que seriam inicialmente descartados ou destinados para outras funções.

Tabela 4.14 Dióxido de carbono incorporado (e-CO₂), consumo de energia incorporado (e-Energia) e consumo de recursos primários das matérias primas do concreto (e-Recursos). Fonte: Long *et al.* (2015).

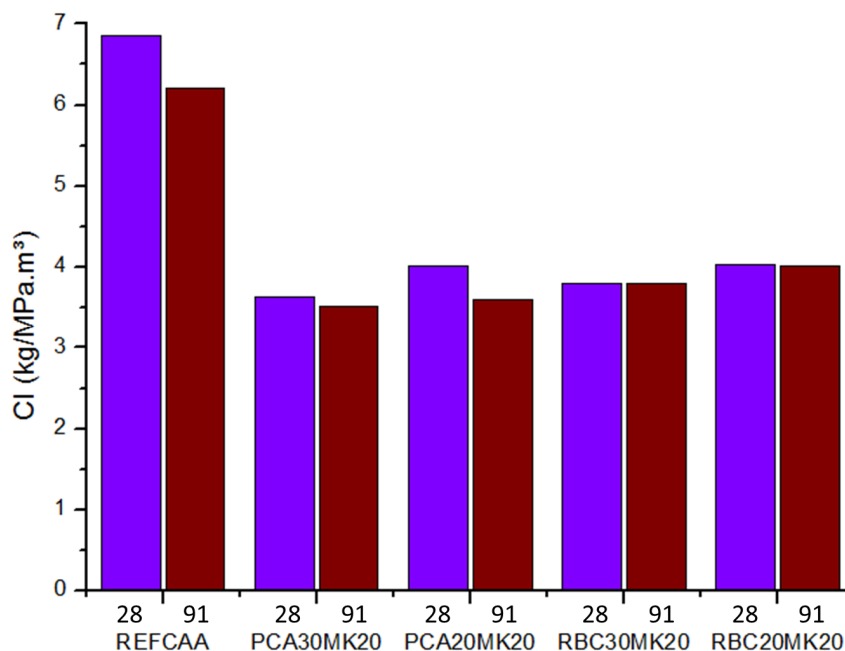
Ítem	e-CO ₂	e-Energia	e-Recursos
Cimento	0,83	4,727	1,73
Metacaulim	0,4	3,48	1
Areia de rio	0,001	0,022	1
Pedra britada	0,007	0,113	1
Água	0,0003	0,006	0
Superplastificante	0,72	18,3	0

Os índices de eficiência energética em termos de durabilidade, EI (difusão), propostos, foram calculados conforme a equação 4.8. Foi relacionado o índice de energia incorporada proposto por Long *et al.* (2015) e o coeficiente de difusão dos cloretos por regime não estacionário para cada concreto.

$$EI(difusão) = \frac{1}{\frac{\text{energia incorporada}(MJ/m^3)}{D (\times 10^{-12} m^2/s)}} \quad (4.8)$$

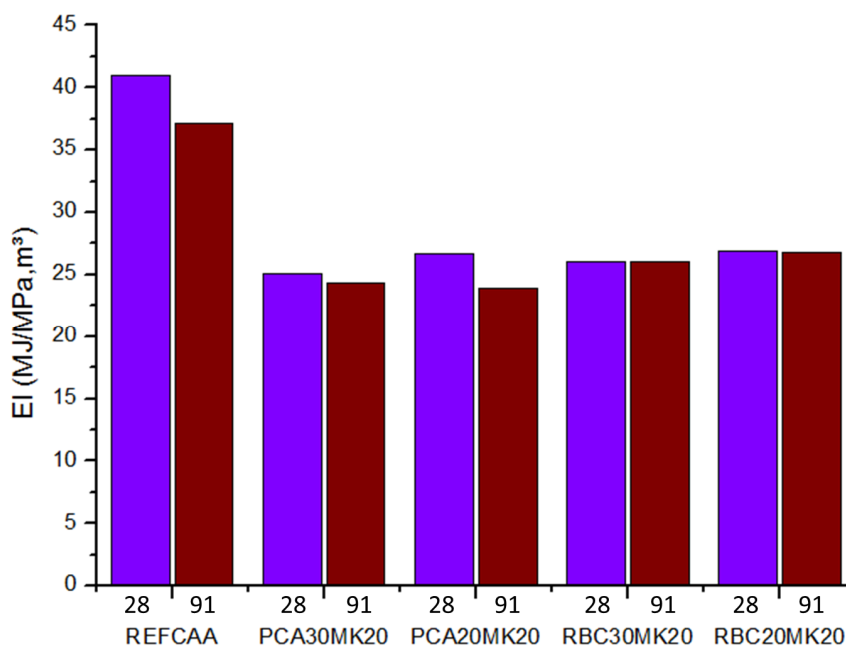
A figura 4.23 mostra os índices e-CO₂ dos CAA produzidos no estudo. A partir dos resultados mostrados, o índice e-CO₂ do CAA preparado apenas com cimento Portland comum é mais alto que para as demais composições, o que pode ser explicado principalmente pela maior quantidade de cimento na mistura e, com menos relevância, pela maior quantidade dos demais materiais como areia, brita e água. Dessa forma, o índice e-CO₂ diminui com o aumento da proporção de substituição pelas adições minerais, pois as composições com 50% de substituição apresentaram resultados menores do que as composições com 40% de substituição.

Como os concretos com adição de PCA obtiveram valores de resistência aos 28 dias ligeiramente maiores que o RBC, o PCA se mostrou levemente mais eficaz na redução das emissões de gases do efeito estufa do CAA por unidade de força (MPa). A redução do índice e-CO₂ chegou a pouco mais que 47% para a composição PCA30MK20 em relação ao REFCAA

Figura 4.23 Índice e-CO₂ aos 28 e 91 dias.

A figura 4.24 exibe os resultados dos índices e-Energia das composições estudadas. Como é possível observar, o valor mais alto para o índice e-Energia é do CAA preparado apenas com cimento Portland normal, corroborando o estudo de Long *et al.* (2015), onde as adições minerais podem reduzir significativamente os valores do índice estudado.

Figura 4.24 Índice e-Energia aos 28 e 91 dias.

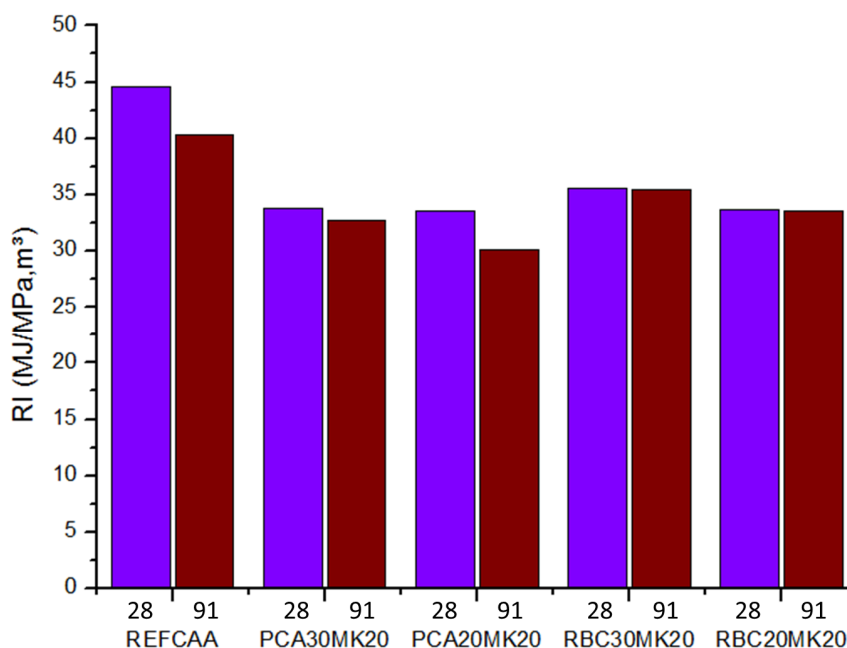


Novamente a composição PCA30MK20 apresentou melhores resultados do que as demais, exibindo uma redução de aproximadamente 39% para o índice e-Energia, explicado pelo melhor índice de desempenho do PCA com o cimento aos 28 dias de idade, que aumentou a resistência à compressão do concreto nessa idade.

O índice de recurso natural primário incorporado para as diferentes composições analisadas é exibido na figura 4.25. Assim como para os demais índices analisados, os índices e-Recursos apresentaram valores menores para as composições com adições, em especial com 50% de substituição, chegando a uma redução de 24% para a composição PCA20MK20.

Como, com exceção do cimento e das adições, os demais materiais incorporados na composição são adicionados em quantidades muito próximas, os valores de resistência à compressão foram decisivos para o melhor desempenho do PCA20MK20 e do índice e-Recursos ligeiramente maior do RBC30MK20.

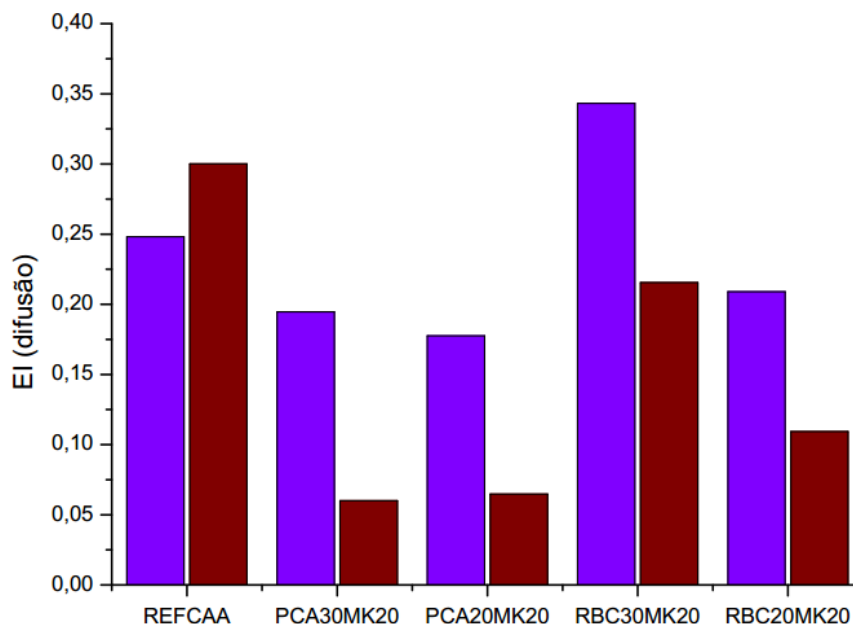
Figura 4.25 Índice e-Recursos aos 28 e 91 dias.



A figura 4.26 exibe os resultados dos índices e-Energia em termos de durabilidade. Como é possível observar, o valor mais alto para o índice e-Energia (difusão) aos 91 dias é do CAA de referência. O concreto PCA30MK20 apresentou redução de 80% do índice e-Energia (difusão), enquanto que o melhor resultado

para o RBC foi com o concreto RBC20MK20, com queda de 63,6% em relação ao concreto de referência, ambos aos 91 dias.

Figura 4.26 Índice e-Energia (difusão) aos 28 e 91 dias.



Os resultados expostos do índice e-Energia (difusão) comprovam que o ganho da eficiência energética em relação à durabilidade foi mais significativo do que o ganho somente em termos de resistência.

Os resultados de todos os índices evidenciaram que a incorporação de altos volumes de adições minerais no CAA não só pode efetivamente reduzir os índices de e-CO₂ e e-Energia, mas também diminuir o índice de e-Recursos. Dessa forma, é possível afirmar que os concretos com adições minerais produzidos no estudo, quando comparados com o concreto de referência, apresentam uma diminuição do impacto ambiental gerado pela emissão de CO₂, pela energia consumida e pelo consumo de materiais naturais, confirmando assim a importância do estudo.

CAPÍTULO 5

5. Considerações finais

5.1 Conclusões

Após a análise crítica dos resultados no capítulo anterior, destacam-se as conclusões mais relevantes do estudo realizado:

Há evidências da real possibilidade da produção de misturas com até 50% de substituição por MK, PCA e RBC, com comportamentos no estado fresco adequados a maioria das construções correntes, cumprindo os requisitos necessários à sua classificação como concreto autoadensável.

É possível produzir CAA com baixos teores de cimento e elevados teores de adições regionais com desempenhos mecânicos e de durabilidade adequados, reduzindo os impactos ambientais ao seu consumo e efetuando o reaproveitamento de subprodutos industriais.

A incorporação de adições minerais ao CAA, em especial o RBC tem significativa interferência nas propriedades do concreto no estado fresco, aumentando a coesão e a plasticidade e diminuindo a fluidez do concreto, o que pode ser contornado pela adequada dosagem dos finos e dos aditivos.

As adições proporcionaram ao CAA maior compacidade e menores módulos de elasticidade. Os resultados de resistência à compressão aos 28 dias dos referidos CAA variaram entre 56 e 66 MPa e, aos 91 dias entre 60 e 74 MPa, mostrando a possibilidade de produzir concreto de excelente compacidade, alta resistência à compressão, apresentando valores maiores do que o concreto de referência com consumo de 450kg/m³, e com níveis de cimento entre 220 e 265 kg/m³.

A introdução de adições minerais contribui para a diminuição da porosidade capilar, uma vez que a absorção capilar nas composições com adições atingiu níveis

inferiores aos da composição de referência, mesmo o REFCAA apresentando consumo de cimento próximo a 450 kg/m^3 . Os valores de índices de vazios e absorção por imersão também caíram com a introdução das adições no CAA. A redução na absorção capilar, índice de vazios e absorção por imersão pode ser atribuída ao avanço das reações pozolânicas e ao efeito *filler* provocado pela elevada finura das adições.

O melhor resultado quanto à penetração de cloretos foi encontrado para os concretos da composição PCA30MK20, com redução de aproximadamente 87% do coeficiente de difusão dos cloretos, quando comparado com o concreto de referência. O melhor resultado encontrado com a adição do RBC foi para o RBC20MK20, com redução de 73,7% do coeficiente de difusão de cloreto aos 91 dias de idade. Tais efeitos podem ser atribuídos à atividade pozolânica da PCA e pelo efeito *filler*, que proporcionam refinamento dos poros e contribuem significativamente para a melhoria da matriz da pasta e da zona de transição e resultam em maior dificuldade da passagem dos íons cloreto por difusão.

Pelos resultados expostos, o metacaulim, a pozolana da casca de arroz e o resíduo da biomassa da cana-de-açúcar proporcionam redução na absorção capilar e na penetração acelerada de íons cloreto, com manutenção das propriedades mecânicas, para teores de substituição de 40% e 50%.

Os resultados obtidos no estudo também evidenciaram que a incorporação de altos volumes de adições minerais no CAA apresentam uma diminuição do impacto ambiental gerado pelas emissões antropogênicas de CO_2 , pela energia consumida e pelo consumo de materiais naturais, confirmando assim a relevância da pesquisa.

Verifica-se, então, que é possível desenvolver concretos autoadensáveis com reduzidos teores de cimento, apresentando propriedades adequadas, contribuindo assim para a sustentabilidade destes através da minimização da energia de lançamento e compactação, e principalmente em virtude da drástica redução do consumo de cimento para níveis de 220 kg/m^3 .

Assim, a possibilidade de produção de concretos estruturais e de alto desempenho com menor consumo de cimento Portland com melhoria nas propriedades reológicas no estado fresco, tornam o metacaulim, o RBC e a PCA adições apropriadas ao CAA.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Proceder à diminuição do consumo de cimento para níveis entre 150 e 200 kg/m³, avaliando seu comportamento no estado fresco, assim como seu desempenho mecânico e de durabilidade, acrescentando ao estudo o ensaio proposto pela ASTM C 1202 (2005), para avaliação da penetração acelerada de cloretos e possível comparação dos resultados com documento normativo LNEC E – 463 (2004).

Avaliar os concretos com diminuição do consumo de cimento quanto à carbonatação, considerando a elevada redução do consumo de cimento.

Avaliar a eficiência da incorporação de pequenos teores de cal hidratada nas misturas, com a finalidade de compensar o hidróxido de cálcio consumido nas reações pozolânicas, analisando possíveis ganhos de resistência e melhoras no comportamento dos concretos quanto ao ataque por carbonatação.

Realizar ensaios adicionais, como de reações álcali-agregado e porosimetria por intrusão de mercúrio, objetivando conhecer mais profundamente as contribuições e os impactos causados por altos teores de adições em CAA.

Referências Bibliográficas

Adekunle S., Ahmad S., Maslehuddin M., Al-Gahtani H. J. (2015): Properties of SCC prepared using natural pozzolana and industrial wastes as mineral fillers. *Cement and Concrete Composites*, v. 62, p. 125-133.

Andrade, C. (1993) Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. *Cement and Concrete research*, v. 23, p. 724-742.

Andrejkovičová, S., Sudagar, A., Rocha, J., Patinha, C., Hajjaji, W., da Silva, E. F., & Rocha, F. (2016): The effect of natural zeolite on microstructure, mechanical and heavy metals adsorption properties of metakaolin based geopolymers. *Applied Clay Science*, v. 126, p. 141-152.

Anjos M. A. S. (2009) 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. , Ferreira D. F., Borja E. V. (2012): Influência da finura do resíduo de biomassa da cana-de-açúcar na atividade pozolânica com a cal. *HOLOS*. v. 2, p. 44-57.

Anjos, M. A., Camões, A., Jesus, C. (2014): Eco-efficient self-compacting concrete with reduced Portland cement content and high volume of fly ash and metakaolin. *Engineering Materials*, v. 634, p. 172-181.

Araújo, T. F.; Siqueira, A. S. F.; Moura, K. A.; Pantoja, R. G. B.; Farias, E. C.; Anjos, M. A. S. (2014): Argamassas autonivelantes com substituição parcial do cimento por altos teores de resíduos e adições minerais para concreto auto adensável. 56º Congresso Brasileiro do Concreto, v. único, p. 186-186.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2009) Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água - NBR NM 53. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2014) Materiais pozolânicos – Requisitos - NBR 12653. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1991) Cimento Portland de alta resistência inicial - NBR 5733. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1992) Cimentos Portland resistentes a sulfatos - NBR 5737. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2009) Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente - NBR NM 52. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2003) Agregados – Determinação da composição granulométrica - NBR NM 248. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2009) Agregados para concreto – Especificação - NBR 7211. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2010) Peneiras de ensaio – requisitos técnicos e verificação – NBR NM ISO 3310-1. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2007) Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos – NBR 5739. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2008) Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão – NBR 8522. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2009) Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índices de vazios e massa específica – NBR 9778. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2012) Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade – NBR 9779. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015) Areia normal para ensaio de cimento - Especificação – NBR 7214. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2014) Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias - NBR 5752. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997) Cimento portland – Determinação da resistência à compressão - NBR 7215. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015) Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias - NBR 5751. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2001) Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica – NBR MN 23. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2010) Concreto auto-adensável - NBR 15823. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2010) Concreto auto-adensável - Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco - NBR 15823-1. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2010) Concreto auto-adensável - Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams - NBR 15823-2. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2010) Concreto auto-adensável - Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J - NBR 15823-3. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2010) Concreto auto-adensável - Parte 4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L - NBR 15823-4. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2010) Concreto auto-adensável - Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil V - NBR 15823-5. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2014) Projeto de estruturas de concreto – Procedimento – NBR 6118. Rio de Janeiro.

ASTM C 1202. (2005) Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration – C 1202. American Society for Testing and Materials, USA.

Barros, P. G. S. (2008): Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável obtido com resíduo de corte de mármore e granito. Dissertação (Mestrado), – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 121 p.

Barbhuiya, S., Chow, P., & Memon, S. (2015): Microstructure, hydration and nanomechanical properties of concrete containing metakaolin. *Construction and Building Materials*, v. 95, p. 696-702.

Bacarji E., Toledo Filho R.D., Koenders E.A.B., Figueiredo E.P., Lopes J.L.M.P. (2013): Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. *Construction and Building Materials*, v., p. 1-10.

Behera M., Bhattacharyya S.K., Minocha A.K., Deoliya 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.

Bogue, R. H. (1947): *The chemistry of Portland cement*. New York: Reinhold publishing, 572 p.

Borja, E. V. (2011) efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis. Tese (Doutorado), - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Natal, 230 p.

Bouzoubaa N, Lachemi M. (2001): Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash: Preliminary results. *Cement and Concrete Research*. V. 31(3), p. 413-20.

Campos, P. G. da S. (2012) Betões eco-eficientes com elevados teores de adições minerais. Dissertação (mestrado), Universidade do Minho, 94p.

Celik k., Meral C., Gursel A. P., Mehta P. K., Horvath A., Monteiro P. J.M. (2015): Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder. *Cement and Concrete Composites*, v. 56, p. 59-72.

Chopra, D., & Siddique, R. (2015): Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash. *Biosystems Engineering*, v. 130, p. 72-80.

Conab (2015): Acompanhamento safra brasileira cana-de-açúcar, v. 1 – Safra 2014/15, n.4 – Quarto Levantamento, Brasília, p. 1-29, abr. 2015.

Conab (2015)¹: Acompanhamento safra brasileira grãos, v. 2 - Safra 2014/15, n. 12 – Décimo segundo levantamento, Brasília, p. 1-134, set. 2015

Coppola, I. Rheology and mix proportioning of self-compacting concretes. *Industria Italiana del Cemento*, v. 71, n. 2, p. 152-163, fev. 2001.

Cordeiro, L. de N. P.(2009) Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozzolânica. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 98p.

Cordeiro, G. C. (2006) Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 445p.

Cordeiro G. C., Fairbairn E. de M. R., Rego E. de M. (2009): Influência da substituição parcial de cimento por cinza ultrafina da casca de arroz com elevado teor de carbono nas propriedades do concreto. *Ambiente Construído*, v. 9, n. 4, p. 99-107.

Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., & Fairbairn, E. D. M. R. (2009): Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 39(2), p. 110-115.

Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., & Fairbairn, E. M. R. (2008): Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cement and Concrete Composites*, v. 30(5), p. 410-418.

Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., & Fairbairn, E. M. R. (2012): Experimental characterization of binary and ternary blended-cement concretes containing ultrafine residual rice husk and sugar cane bagasse ashes. *Construction and Building Materials*, v. 29, p. 641-646.

Corinaldesi V., Moriconi G. (2009): Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 23, p. 2869-2876.

Crauss, C. (2010) Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 97 p.

Dal Molin, D. C. C. Adições Minerais. In: Isaia, G. C. *Concreto: ciência e tecnologia*. São Paulo: IBRACON, v. 1, 2011. Cap. 08, p. 261–310.

Della, V. P., Kühn, I., & Hotza, D. (2002): Rice husk ash as an alternate source for active silica production. *Materials Letters*, v. 57(4), p. 818-821.

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (2005). Specification and guidelines for self-compacting concrete. EFNARC.

Farias, E. C.; Souza, N. S. L.; Anjos, M. A. S. ; Borja, E. V. (2014): Avaliação de Concretos autoadensáveis eco-eficientes com adição de resíduos da biomassa da cana-de-açúcar. Congresso Luso Brasileiro de materiais de construção sustentável, v. 3. p. 61-72.

Frías, M., Villar-Cociña, E., & Valencia-Morales, E. (2007): Characterisation of sugar cane straw waste as pozzolanic material for construction: calcining temperature and kinetic parameters. *Waste management*, v. 27(4), p. 533-538.

FIESP/CIESP (2001) Ampliação da oferta de energia através da biomassa (bagaço da cana-de-açúcar), São Paulo: FIESP/CIESP, 90 p.

Fortes, L. R. (1995) Corrosão da armadura do concreto armado e sua avaliação pela técnica do potencial de eletrodo. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 228p.

Gastaldini, A. L. G., Da Silva, M. P., Zamberlan, F. B., & Neto, C. M. (2014): Total shrinkage, chloride penetration, and compressive strength of concretes that contain clear-colored rice husk ash. *Construction and Building Materials*, v. 54, p. 369-377.

Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Özbay, E. (2009): Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume. *Construction and Building Materials*, v. 23(5), p. 1847-1854.

Gobbo, L. de A. (2003): Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios-x e quantificação por refinamento de Rietveld. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 157p.

Gomes, P. C. C. (2002) Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete. Tese (Doutorado), Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 139 p.

Gomes, P. C. C. & Barros, A. R. (2009): Métodos de dosagem de concreto autoadensável. 1ª ed., Pini, São Paulo.

Gonçalves, J. P. (2005): Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial. Tese (Doutorado), Universidade Federal Do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro.

Helene, P. (1997): A nova NB 1/2003 (NBR 6118) e a vida útil das estruturas de concreto. Education, Research & Consultancy on Concrete Materials & Structures.

Hernández, J. F. M., B. Middendorf, M. Gehrke, e H. Budelmann. (1998): Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of reaction. *Cement and Concrete Research*, v.28, n. 11, p. 1525-1536.

Holschemacher, K.; klug, Y. (2002): A database for the evaluation of hardened properties of SCC. *LACER*, n.7, p.123-134;

Isaia, G. C. Concreto: ciência e tecnologia. São Paulo: IBRACON, v. 1, 2011.

Isaia G.C., Furquim P., Gastaldini A.L.G. (2012): A statistical approach of binary and ternary concrete mixtures with mineral additions. *Construction and Building Materials*, v. 36, p. 597-603.

Isaia, G. C., & Gastaldini, A. L. G. (2004): Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso. *Ambiente Construído*, v. 4(2), p. 19-30.

Jiménez-Quero, V. G., León-Martínez, F. M., Montes-García, P., Gaona-Tiburcio, C., & Chacón-Nava, J. G. (2013): Influence of sugar-cane bagasse ash and fly ash on the rheological behavior of cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, v. 40, p. 691-701.

Jin, R., Chen, Q., & Soboyejo, A. (2015): Survey of the current status of sustainable concrete production in the US. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 105, p. 148-159.

Kannan, V., & Ganesan, K. (2014): Chloride and chemical resistance of self compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin. *Construction and Building Materials*, v. 51, p. 225-234.

Kavitha, O. R., Shanthi, V. M., Arulraj, G. P., & Sivakumar, V. R. (2016): Microstructural studies on eco-friendly and durable Self-compacting concrete blended with metakaolin. *Applied Clay Science*, v. 124, p. 143-149.

Kusuma G. H., Budidarmawan J., Susilowati A. (2015): Impact of concrete quality on sustainability. *Procedia Engineering*. v., p. 754 – 759.

LNEC E-463 (2004), Betão – Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário – E 463. Documentação normativa, Especificação LNEC.

Laboratório Nacional de Engenharia Civil Especificação 477 (LNEC E 477): Betões - Guia para utilização de ligantes hidráulicos, Portugal, 2007.

Le, H. T., Siewert, K., & Ludwig, H. M. (2015): Alkali silica reaction in mortar formulated from self-compacting high performance concrete containing rice husk ash. *Construction and Building Materials*, v. 88, p. 10-19.

Li, Q., Geng, H., Huang, Y., & Shui, Z. (2015): Chloride resistance of concrete with metakaolin addition and seawater mixing: A comparative study. *Construction and Building Materials*, v. 101, p. 184-192.

Ling S.K., Kwan A.K.H. (2016): Adding limestone fines as cementitious paste replacement to lower carbon footprint of SCC. *Construction and Building Materials*, v. 111, p. 326-336.

Long, G., Gao Y., Xie Y. (2015): Designing more sustainable and greener self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v. 84 p. 301–306.

Macedo, P. (2009): Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 116 p.

Maia, L., *et al.* (2012): Influence of shrinkage reducing admixtures on distinct SCC mix compositions. *Construction and Building Materials*. V 35, p 304 – 312.

Marques, A. C. (2011): Concreto autoadensável: Caracterização da Evolução das Propriedades Mecânicas e Estudo da Sua Deformabilidade por Solicitação Mecânica. Retração e Fluência. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Massazza, F. (2004): Pozzolana and Pozzolanic Cements. In: *Lea's chemistry of cement and concrete*, por P. Hewlett, 471-602. Burlington: Elsevier Butterworth Heinemann.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. M. (2014). *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 1ª ed., IBRACON, São Paulo.

Mohammed, M. K., Dawson, A. R., & Thom, N. H. (2013): Production, microstructure and hydration of sustainable self-compacting concrete with different types of filler. *Construction and Building Materials*, v. 49, p. 84-92.

Moraes, J. C. B., Akasaki, J. L., Melges, J. L. P., Monzó, J., Borrachero, M. V., Soriano, L., & Tashima, M. M. (2015): 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*, v. 94, p. 670-677.

Müller H. S., Haist M., Vogel M. (2014): Assessment of the sustainability potential of concrete and concrete structures considering their environmental impact, performance and lifetime. *Construction and Building Materials*, v. 67, p. 321–337.

Neville, A. M.; (1997): *Propriedades do concreto*. 2ª ed., Pini, São Paulo.

Nguyen H., Chang T., Shih J., Chen C., Nguyen T. (2016): Engineering properties and durability of high-strength self-compacting concrete with no-cement SFC binder. *Construction and Building Materials*, v. 106, p. 670–677.

Okamura, H. & Ouchi M. (2003): Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 1, n. 1, p. 5-15.

Oliveira, C. A. de S. (2007) Avaliação microestrutural e comportamento físico e mecânico de concretos de alto desempenho produzidos com metacaulim. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 177 p.

Page C. L. *et al.* (1986): The Influence of Different Cements on Chloride Induced Corrosion of Reinforcing Steel. *Cement and Concrete Research*, v. 16, p. 79-86.

Ribeiro, D. V. (2014): Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise. 1ª ed., Elsevier, Rio de Janeiro.

Reis, R. J. A. da C. (2009) Betões Eco-Eficientes com Cinzas Volantes e Metacaulino. Dissertação (Mestrado), Universidade do Minho, Braga, 136 p.

Repetto, W. L. (2011): Concreto autoadensável. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1ed. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 1769-1806.

Safiuddin, Md. *et al.* (2011): Flowing ability of the mortars formulated from self-compacting concretes incorporating rice husk ash. *Construction and Building Materials*, v 25, p. 973-978.

Santos, S. (2006) Produção e avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 152 p.

Schneider, M. (2015): Process technology for efficient and sustainable cement production. *Cement and Concrete Research*, v. 78, p. 14-23.

Silveira, A. A. & Dal Molin, D. C. (1995): A influência do tratamento térmico da cinza de casca de arroz na pozolanicidade e na resistência à compressão de argamassas. I Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Goiânia. P. 15-24.

Su, N., & Miao, B. (2003): A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content. *Cement and Concrete Composites*, v. 25(2), p. 215-222.

Sua-iam G., Makul N. (2013): Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste. *Journal of Cleaner Production*, v. 57, p. 308-319.

Tessari, R. (2001) Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob a ação de íons cloreto. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 89 p.

Tutikian, B. F.; Dal Molin, D.C. (2008): *Concreto Auto-adensável*. 1ª ed., Pini, São Paulo.

Uysal, M., & Yilmaz, K. (2011): Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 33(7), p. 771-776.

Vieira, F. M. P. (2003) Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 223 p.

Wilson I. R., Santos H. de S., S. P. de Souza (1998): Caulins brasileiros: Alguns aspectos da geologia e da mineralogia. *Cerâmica*, v. 44, p. 287-288.

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

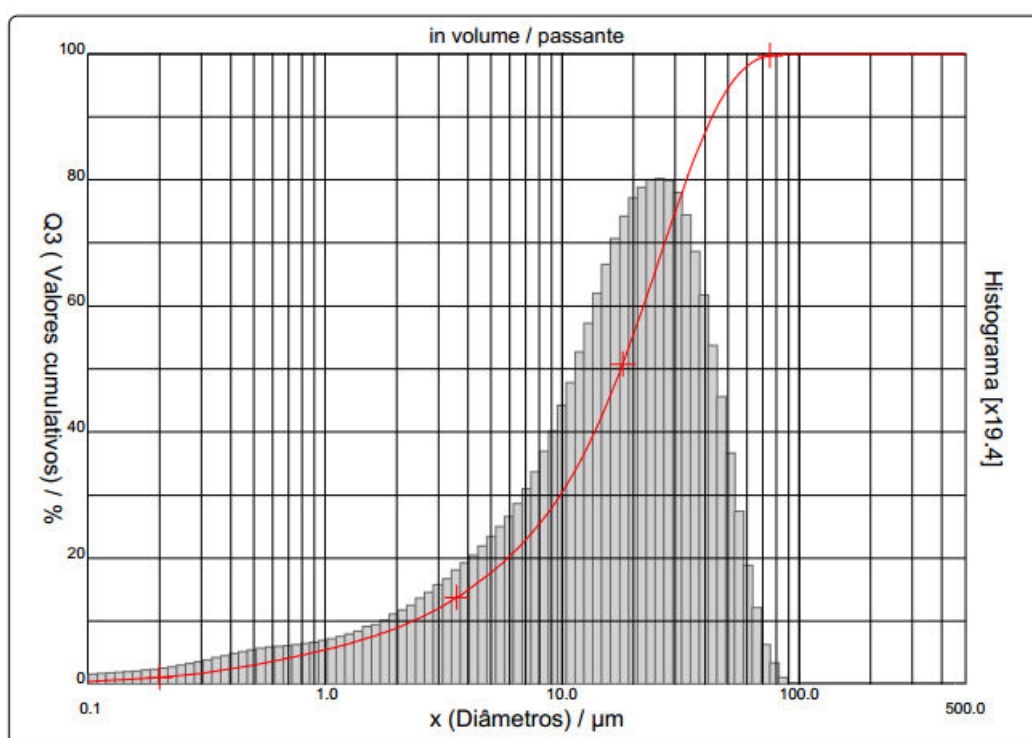
Yadav, V.S. *et al.* (2010): Sequestration of carbono dioxide (CO₂) using red mud. *Journal of Hazardous Materials*, v. 176, n. 1-3, p. 1044-1050.

ANEXO 1

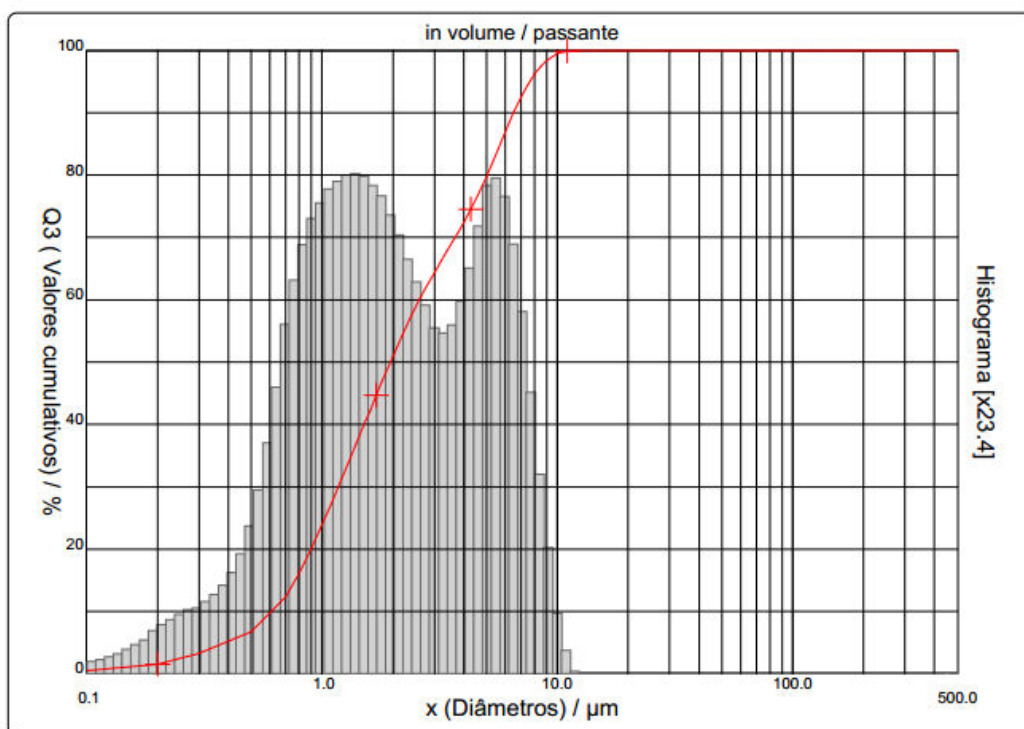
CURVAS GRANULOMÉTRICAS

A seguir são apresentadas as distribuições granulométricas do cimento e das adições utilizadas para confecção dos concretos estudados

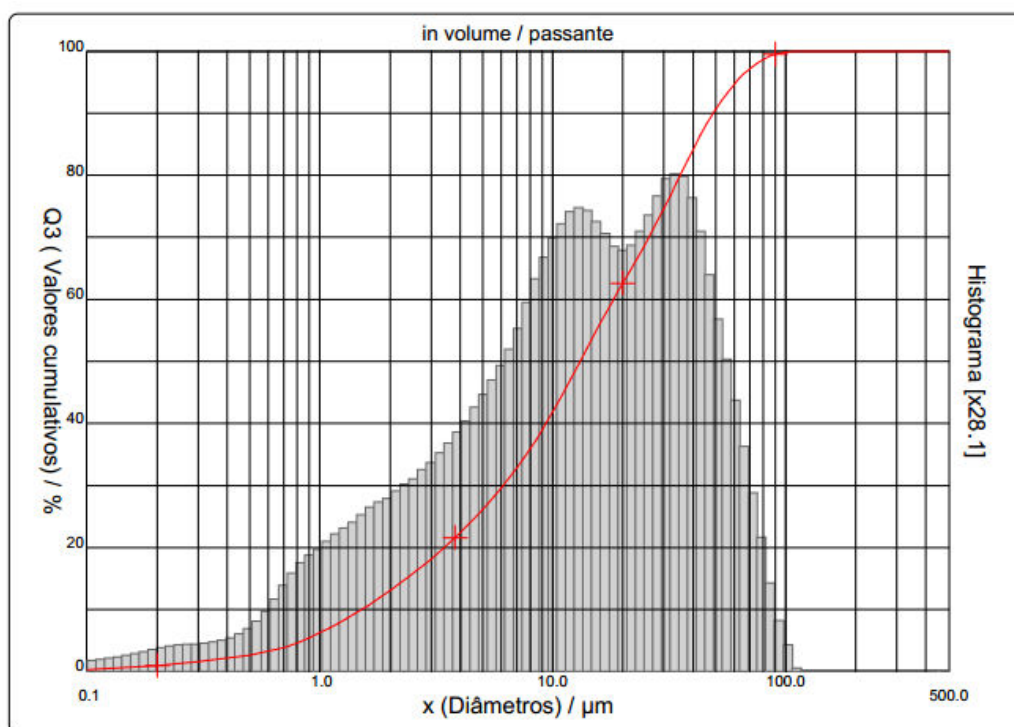
Distribuição granulométrica do cimento CPV ARI RS



Distribuição granulométrica do cinza da biomassa da cana-de-açúcar



Distribuição granulométrica da sílica da casca de arroz



ANEXO 2

MIGRAÇÃO EM REGIME NÃO ESTACIONÁRIO

A seguir são apresentadas as tabelas com os parâmetros e valores utilizados para as determinações dos coeficientes de difusão em regime não estacionário dos concretos estudados aos 28 e 91 dias de idade.

Parâmetros para determinação dos coeficientes de difusão em regime não estacionário dos concretos estudados aos 28 dias

Mistura	CP	L	T	U	t	xd	D	Médias
REFCAA	1	51,80	25,85	25	24	18,73	10,76	10,18
	2	42,93	25,90	25	24	18,06	8,71	
	3	48,73	25,90	25	24	20,27	11,08	
PCA30MK20	1	52,07	25,00	50	24	16,09	4,63	4,89
	2	46,70	25,00	50	24	21,54	5,68	
	3	44,10	25,15	50	24	17,63	4,36	
PCA20MK20	1	51,10	27,00	40	24	16,49	5,84	4,74
	2	52,63	27,20	40	24	13,11	4,70	
	3	51,73	27,20	40	24	10,59	3,67	
RBC30MK20	1	53,97	26,90	40	24	23,66	9,02	8,93
	2	52,13	27,00	40	24	24,31	8,99	
	3	50,50	26,80	40	24	24,50	8,79	
RBC20MK20	1	54,43	26,45	50	24	19,79	6,03	5,62
	2	51,57	26,45	50	24	19,06	5,51	
	3	50,30	26,55	50	24	18,81	5,31	

Parâmetros para determinação dos coeficientes de difusão em regime não estacionário dos concretos estudados aos 91 dias

Mistura	CP	L	T	U	t	xd	D	Médias
REFCAA	1	48,83	26,65	25	24	20,80	11,44	11,15
	2	50,20	26,80	25	24	19,01	10,66	
	3	52,83	26,70	25	24	19,27	11,33	
PCA30MK20	1	50,67	26,55	60	48	10,63	1,22	1,46
	2	51,00	26,60	60	48	14,91	1,76	
	3	51,00	26,50	60	48	12,09	1,41	
PCA20MK20	1	50,77	26,00	60	48	13,60	1,59	1,55
	2	49,70	26,20	60	48	11,94	1,36	
	3	52,33	26,10	60	48	14,14	1,70	
RBC30MK20	1	51,00	27,05	60	24	23,93	5,79	5,60
	2	52,37	26,85	60	24	21,00	5,18	
	3	51,73	26,80	60	24	23,84	5,84	
RBC20MK20	1	53,43	27,30	60	24	12,41	3,04	2,93
	2	51,43	27,25	60	24	10,83	2,53	
	3	52,03	27,80	60	24	13,39	3,21	