



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

RÔMULO ANTHONY JUNQUEIRA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ENDURECIDO DO
CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM INCORPORAÇÃO DE
ADIÇÕES NAS COMPOSIÇÕES DOS TRAÇOS ESTUDADOS**

**NATAL-RN
2016**

Rômulo Anthony Junqueira

Avaliação do comportamento endurecido do concreto autoadensável com incorporação de adições nas composições dos traços estudados

Trabalho de Conclusão de Curso na modalidade Artigo Científico, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof^a. Dr^a Maria das Vitórias V. A. de Sá

Coorientador: Prof^a.Msc Fernanda Karolline de Medeiros

Natal-RN

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

Junqueira, Rômulo Anthony.

Avaliação do comportamento endurecido do concreto autoadensável com incorporação de adições nas composições dos traços estudados / Rômulo Anthony Junqueira. - 2016.

16 f. : il.

Artigo científico (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil. Natal, RN, 2016.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria das Vitórias V. A. de Sá.

Coorientadora: Prof^a. Msc. Fernanda Karolline de Medeiros.

1. Engenharia Civil - TCC. 2. Concreto - TCC. 3. Bagaço de cana-de-acúcar - TCC. I. Sá, Maria das Vitórias V. A. de. II. Medeiros, Fernanda Karolline de. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624

Rômulo Anthony Junqueira

Avaliação do comportamento endurecido do concreto autoadensável com incorporação de adições nas composições dos traços estudados

Trabalho de conclusão de curso na modalidade Artigo Científico, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 18 de novembro de 2016.

Prof (a). Dr(a). Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá – Orientador

Prof(a). Msc. Fernanda Karolline de Medeiros – Coorientador

Prof. Dr. Marcos Lacerda de Almeida – Examinador interno

Eng. Italo Vale Monte Junior – Examinador externo

Natal-RN

2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço

A Deus,

Por me dar saúde, sabedoria para enfrentar as dificuldades que passamos dia a dia, por ajudar em todas as conquistas alcançadas, pela minha família e pelos amigos que conquistei.

A minha mãe,

Ana Lúcia, que sempre me apoiou e serviu de exemplo para mim, incentivando e aconselhando minhas decisões na vida pessoal e profissional.

A minha esposa,

Priscila, que sempre me apoia nas decisões da vida e me auxilia naquilo que seja necessário.

Aos Amigos,

Que sempre estiveram comigo nos bons e maus momentos de minha vida, em especial aos colegas de trabalho que hoje não são mais apenas colegas e sim amigos que levarei para a vida toda, os Engenheiros Civis Arthur da Silva Rebouças e Eberton Walter de Medeiros Fernandes, agradeço pelos conhecimentos compartilhados e conselhos que venho recebendo.

As professoras orientadoras,

Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá e Fernanda Karolline de Medeiros, por me orientarem e passar seus conhecimentos ao longo da pesquisa.

A todos os professores que dividiram seus conhecimentos comigo, em especial, aos do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Muito Obrigado.

RESUMO

Título: Avaliação do comportamento endurecido do concreto autoadensável com incorporação de adições minerais nas composições dos traços

Autor: Rômulo Anthony Junqueira

Orientadora: Prof^a. Dr^a Maria das Vitórias V. A. de Sá

Coorientador: Prof^a. Msc. Fernanda Karolline de Medeiros

Departamento de Engenharia Civil – UFRN

Natal, Novembro de 2016

A agressão ao meio ambiente provocada no processo de produção de concreto é de grande impacto pelo alto consumo de matéria-prima. Contudo, impacto substancialmente maior é causado pela produção de cimento Portland, material indispensável ao concreto. O uso de concreto autoadensável (CAA) surge como alternativa para amenizar os danos ambientais da produção de concreto tradicional, uma vez que possibilita utilizar altos teores de adições minerais, como a cinza do bagaço da cana-de-açúcar, cinza da casca de arroz, metacaulim e sílica ativa. Tais materiais, quando utilizados em mistura com cimento Portland e, sob certas condições, podem perfeitamente substituir altos teores de cimento nas misturas e ainda gerar aumento significativo de durabilidade, segundo estudos desenvolvidos na última década. A utilização do CAA vem aumentando significativamente devido as suas características de alta fluidez e coesão, além da possibilidade de moldagem *in loco* sem vibração, formando um produto com número reduzido de vazios e falhas, e que apresenta capacidade de fluxo através do seu peso próprio preenchendo completamente as fôrmas, com isso atinge a compactação mesmo em estruturas densamente armadas. Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo, avaliar aos 365 dias as propriedades mecânicas e de durabilidade dos eco-concretos autoadensáveis analisados, com altos teores de adições minerais e conseqüente redução do teor de cimento. Foram analisados 5 tipos de traços de concreto sendo um deles de concreto autoadensável com materiais convencionais, sem adições minerais para utilização como referência e os demais traços de concretos autoadensáveis com adições de cinza residual do bagaço da cana-de-açúcar, pozolana da casca de arroz e metacaulim, em teores de 40% e 50% de substituição do cimento. Os resultados mostraram que tais concretos produzidos com diminuição considerável do uso de cimento, não perderam suas principais propriedades mecânicas e de durabilidade, podendo desse modo contribuir para a sustentabilidade da indústria da construção, minimizando os impactos ambientais gerados.

Palavras Chaves: Concreto Autoadensável; Eco-concreto; Bagaço da cana-de-açúcar; Cinza da casca de arroz; ;Metacaulim ;Adições.

ABSTRACT

Title: Evaluation of the behavior of hardened self-compacting concrete with incorporation of mineral additions on the mixtuer compositions

Author: Rômulo Anthony Junqueira

Adviser: Prof^a. Dr^a Maria das Vitórias V. A. de Sá

Co-adviser: Prof^a. Msc. Fernanda Karolline de Medeiros

Department of Civil Engeneering – UFRN

Natal, November 2016

The environment aggression caused by the concrete production process has a great impact due to the high consumption of virgin raw material. However, substantially greater impact is caused by the production of Portland cement, an indispensable material used to produce concrete. The use of self-compacting concrete (SCC) appears as an alternative to reduce the environmental damage caused by the production of traditional concrete, since it allows the usage of high levels of mineral additions, such as sugarcane bagasse ashes, rice husk ashes, kaolin and active silica. Such materials, when used in combination with Portland cement and, under certain conditions, can perfectly replace high cement contents in the mixtures and still generate a significant increase of durability according to studies developed in the last decade. The use of SCC has increased significantly because of its high fluidity and cohesion characteristics and the possibility of molding in-situ without the necessity of vibration, forming a fault and void-free product which has also flowability by its own weight filling completely the molds and reaching compaction even in heavily armed structures. In this context, this study aims to evaluate the mechanical and durability properties of self-compacting eco-concretes at one year of age, with high levels of mineral additions in the mix, reducing the cement level. Five types of concrete mixtures will be analyzed, one being a self-compacting concrete with conventional materials, without mineral additions, used as a parameter, and self-compacting concrete mixtures with 40% and 50% of mineral additions to replace the cement. The expected results are that the concretes produced with a considerable reduction of the cement usage do not lose their main mechanical properties and durability, thus contributing to the sustainability of the construction industry, minimizing the environmental impacts generated.

Key-words: Self-compacting concrete; Eco-concretes; Sugarcane bagasse; Rice husk ash; Kaolin; Additions.

1.0 INTRODUÇÃO

O processo de produção de concreto, desde a fabricação ou extração dos seus materiais constituintes, geram um significativo impacto ambiental, uma vez que motiva um alto consumo de matéria-prima diretamente, como a de seus agregados constituintes e da água, bem como indiretamente, no processo de fabricação do cimento Portland, que além de consumir uma quantidade considerável de matéria-prima virgem, está entre os maiores emissores de CO₂ na atmosfera, que com uma produção aproximada de 2 bilhões de toneladas, é responsável por cerca de 5% das emissões mundiais. (WBCSD, 2009).

Nas últimas décadas houve um avanço considerável na área de tecnologia de concreto. Um desses avanços foi o desenvolvimento das técnicas para dosagem de concreto autoadensável (CAA). Surgido no Japão na década de 80, o CAA é capaz de se moldar nas formas sem o auxílio de vibração ou compactação para se adensar (TUTIKIAN & DAL MOLIN, 2008). O CAA também vem se mostrando vantajoso em relação a possibilidade de diminuição dos impactos ambientais e sociais gerados, uma vez que é capaz de receber grande quantidade de finos em sua composição, como resíduos de diversos processos industriais (TINOCO, 2013).

Nos últimos anos, a produção de cana-de-açúcar vem girando em torno de 600 milhões de toneladas anuais. Segundo a CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento, em seu segundo levantamento da safra 2016/2017 estima que a produção ficará em torno de 684,77 milhões de toneladas, contra 665.586 mil toneladas da safra 2015/2016. Este crescimento se deu pois, apesar da diminuição da produtividade que passou de 76.909 kg/ha na safra passada para 76.152 kg/ha na safra 2016/2017, houve aumento de cerca de 3,7% na área de produção, que este ano chegou a 8.973,2 mil hectares de superfície cultivada. Já a produção de arroz, foi de 10,6 mi de toneladas na safra brasileira 2015/2016, e na safra 2016/2017 há uma estimativa de incremento entre 8,4% e 13,9% em relação à safra 2015/2016 ficando entre 11,5 e 12,1 mi de toneladas. Desse montante, segundo a CONAB 430,6 mil toneladas serão produzidas na região Nordeste.

Segundo relatório da FIESP/CIESP (2001), cada tonelada de cana-de-açúcar produzida resulta em aproximadamente 6,2 kg de cinza residual, enquanto que cada tonelada de arroz produzido gera cerca de 200kg de casca, que após combustão produz aproximadamente 40 kg de cinza (Mehta & Monteiro, 2014). Desse modo, a produção de cinza gerada na safra de cana-de-açúcar 2016/2017 será de aproximadamente 4,24 milhões de toneladas. Um crescimento de 16,2% em relação à safra de 2015/2016, onde foi gerado cerca de 3,65 milhões de toneladas de

resíduo. Já a produção de arroz gerou na última safra cerca de 480 mil toneladas de cinza de sua casca.

Diante da situação atual, para tentar amenizar os impactos gerados pela indústria da construção civil, muitas pesquisas apresentam como proposta, estudar alternativas de dosagens com baixas taxas de cimento e incorporação de resíduos em concretos, inclusive em concretos autoadensáveis.

O concreto autoadensável tem como uma das características mais importantes, resistência elevada a segregação, mesmo com a alta fluidez ou deformabilidade em seu estado fresco. Para tanto, com o intuito de evitar a segregação do agregado graúdo, utilizam-se aditivos modificadores de viscosidade e/ou adições minerais para aumentar a coesão da mistura (TUTIKIAN & DAL MOLIN, 2008).

A adição de materiais finos no CAA melhora diversas propriedades, tanto no estado fresco quanto no 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, melhorando a zona de transição e como consequência, dificulta a penetração de agentes externos agressivos (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 (BARROS, 2008).

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, como o resíduo do bagaço da cana-de-açúcar (MEDEIROS, 2016).

O resíduo de biomassa da cana-de-açúcar 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).

Assim, o presente trabalho teve como objetivo principal, avaliar as propriedades mecânicas e de durabilidade de eco-concretos autoadensáveis com altos teores de adições minerais nos traços analisados, reduzindo o teor de cimento. Para tanto, foram analisados concretos com incorporação de 40% e 50% de adições minerais e concretos autoadensáveis

com materiais convencionais sem adições para serem usados como parâmetros de referência.

2.0 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CONCRETO AUTOADENSÁVEL

O concreto autoadensável é um tipo de concreto especial que foi desenvolvido com o intuito de sanar um dos principais problemas que ocorre principalmente em estruturas densamente armadas, que é a deficiência no adensamento por meio de vibração do concreto. Este tipo de concreto compacta-se em toda a fôrma, sem a necessidade de vibração, adensa-se simplesmente por meio de seu peso próprio (GOMES & BARROS, 2009).

Para ser considerado autoadensável, segundo EFNARC (2005), o concreto precisa ser fluido, podendo ser moldado in loco sem a necessidade de uso de vibração para que seja obtido uma mistura livre de vazios e por fim, que apresente uma capacidade de fluxo utilizando somente de seu peso próprio para preenchimento total das fôrmas, atingindo um grau de compactação satisfatório mesmo em estruturas com alta densidade de armaduras. Já a NBR 15823-1/2010 define como um concreto que é capaz de fluir, auto-adensar pelo seu peso próprio, preencher a forma e passar por embutidos, enquanto mantém sua homogeneidade nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento.

Mehta & Monteiro (2014) explica que o que diferencia o concreto autoadensável do concreto comum, são as propriedades reológicas, que no CAA são substancialmente superiores.

As principais propriedades do concreto autoadensável, são a habilidade de preenchimento, a habilidade de passar entre obstáculos e à resistência à segregação, definindo-se assim, parâmetros de caracterização que diferem o CAA do concreto convencional, (GOMES & BARROS, 2009).

Borja (2011), explica que para manutenção dessas características, principalmente após o lançamento, sua homogeneidade depende especialmente da viscosidade plástica e da tensão de escoamento, que é determinada pela dosagem da mistura, pelo tipo e teor do aditivo plastificante, pelo teor de finos e pela distribuição granulométrica dos materiais.

2.2 ADIÇÕES MINERAIS

Tutikian & Dal Molin (2008), explicam que o concreto autoadensável tem como uma das características mais importantes, resistência elevada a segregação mesmo com a alta fluidez

ou deformabilidade em seu estado fresco. Para tanto, com o intuito de evitar a segregação do agregado graúdo, utiliza-se aditivos modificadores de viscosidade e/ou adições minerais para aumentar a coesão da mistura.

Segundo Borja (2011), as adições utilizadas em concretos autoadensáveis são de origem mineral, sendo seus componentes principais, minerais silicosos ou silico-aluminosos. Na maioria das vezes se apresentam em uma configuração pulverulenta com propriedades cimentantes ou pozolânicas.

Dal Molin (2005) explica que essas adições podem ser classificadas em materiais pozolânicos, materiais cimentantes e fillers. O primeiro é definido pela NBR 12653 (2015) como um material silicoso ou silico-aluminoso que apesar de não apresentar quase que nenhuma propriedade cimentícia por si só, quando misturado com água, origina uma reação pozolânica com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando um composto com características cimentantes. Já os materiais cimentantes, dispensam a necessidade do hidróxido de cálcio, material presente no cimento Portland, para que haja formação de produtos cimentantes. Contudo, sua reação de auto hidratação é demasiada lenta e a quantidade de cimentantes gerados é insuficiente para uma utilização com fins estruturais. Diferente dos dois primeiros, o filler é um material que não apresentam atividade química e possui elevada finura. Suas ações se resumem a um “empacotamento” granulométrico e também se destacam como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento.

Assim, Tutikian & Dal Molin (2008), classificam as adições minerais, de acordo com sua ação físico-química em dois grupos: adições minerais quimicamente ativas, caso dos materiais cimentantes e materiais pozolânicos que são utilizados em substituição ao cimento nos traços de concreto e adições minerais sem atividade química, caso do filler, que é utilizado em substituição do agregado miúdo.

Mehta & Monteiro (2014), afirmam que as reações pozolânicas envolvendo adições minerais provocam um efeito físico de refinamento dos poros, o que acaba acarretando uma redução na permeabilidade do concreto, assim, tanto os estudos de campo como os de laboratório vem mostrando melhorias consideráveis na durabilidade química do concreto contendo esse tipo de adição.

Tutikian & Dal Molin (2008), afirmam que o efeito químico das adições minerais advém da capacidade de reação com o hidróxido de cálcio - Ca(OH)_2 composto frágil e solúvel que se forma no período da hidratação do cimento Portland. Dele resulta um composto resistente, o C-S-H (silicato hidratado de cálcio), que preenche os vazios de maiores dimensões existentes na pasta de cimento ou na zona de transição, aumentando o desempenho mecânico

e a durabilidade do concreto.

Borja (2011) complementa afirmando que, quando se trata de concretos autoadensáveis, as principais funções das adições minerais são promover coesão, preencher vazios e dar estabilidade ao sistema, contribuindo assim para a formação de compostos resistentes no estado endurecido.

2.2.1 RESÍDUO DE BIOMASSA DA CANA-DE-AÇÚCAR – RBC

A cinza da biomassa da cana-de-açúcar é obtida a partir da queima do bagaço nas fornalhas das caldeiras das usinas da indústria sucroalcooleira. Esta, tem despertado interesse devido sua disponibilidade crescente no mercado nacional e por mostrar-se como fonte suplementar de aditivo mineral para a produção de materiais cimentícios, afirma Anjos (2009).

Diversos estudos vêm apresentando resultados que demonstram sinais de atividade pozolânica no resíduo da biomassa da cana-de-açúcar, apresentando composição química adequada para aplicação como uma pozolana, sobretudo no que diz respeito ao seu alto teor de sílica e na presença de sílica amorfa (Hernández *et al.*, 1998; Frías *et al.*, 2007 apud Medeiros, 2016). Contudo, 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, afirma Medeiros (2016).

2.2.2 POZOLANA DA CASCA DE ARROZ – PCA

A pozolana da casca de arroz (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 parbolização dos grãos, (DAL MOLIN, 2011).

Tutikian & Dal Molin (2008) afirmam que esta adição possui tamanho das partículas variável em função da moagem e quando utilizada em substituição ao cimento, apresenta elevadíssimo aumento na coesão e redução acentuada da exsudação e segregação. Contudo, apresenta piores condições de fluidez em função da forma e textura das partículas, além de provocar elevado consumo de superplastificantes. No estado endurecido, provoca melhoria notável da resistência á compressão e da durabilidade uma vez que 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.

Medeiros (2016), demonstra que diferentes pesquisadores evidenciam que a adição de PCA no concreto proporciona ampliação ou conservação da resistência à compressão, refinamento dos poros e diminuição da penetração de íons cloreto devido à sua adequada atividade pozolânica, sobretudo em teores de 20%.

2.2.3 METACAULIM – MK

Segundo Mehta & Monteiro (2014) o metacaulim é uma adição mineral composta por argila caulínica de alta pureza calcinada em 650-800°C para aumentar a atividade pozolânica. Dal Molin (2011) afirma que quando a caulinita é submetida às temperaturas de calcinação, ocorre a remoção dos íons hidroxila da sua estrutura cristalina, acarretando a ruína do seu arranjo atômico. Desenvolve-se a partir de então, um componente amorfo e de elevada instabilidade química, designado metacaulinita ($Al_2Si_2O_7$), que é responsável pela atividade pozolânica, com desenvolvimento dominante de C-S-H e C_4AH_x .

Oliveira (2007), verificou em seus estudos que a permuta de cimento por metacaulim gerou aos concretos analisados uma microestrutura compacta e homogênea, bem como avanços no desempenho mecânico e na durabilidade dos concretos, sendo a máxima eficácia obtida com o teor de substituição do cimento por metacaulim em 15%.

Assim como a PCA, o metacaulim possui tamanho das partículas variável em função da moagem e quando utilizada em substituição ao cimento, apresenta um grande aumento na coesão e redução acentuada da exsudação e segregação. Contudo, não contribui para a fluidez em função da forma e textura das partículas, além disso, provoca aumento no consumo de superplastificantes. No estado endurecido, provoca melhoria notável da resistência à compressão e da durabilidade, afirma Tutikian & Dal Molin (2008).

2.3 CONCRETO AUTOADENSÁVEL NO ESTADO ENDURECIDO

A descrição das propriedades mecânicas e de durabilidade no estado endurecido dos concretos autoadensáveis, CAA, seguem os mesmos parâmetros já obtidos em tecnologia de concretos convencionais, CVV, onde tais propriedades são resultado de decisões tomadas durante a dosagem do tipo de concreto que se deseja (TUTIKIAN & DAL MOLIN, 2008).

2.3.1 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL

Mehta & Monteiro (2014), explicam que a resistência a compressão é a tensão máxima que um determinado concreto suporta sem entrar em colapso, ou seja, é a tensão necessária para causar a ruptura do material.

Borja (2011), avaliou que documentos normativos nacionais e internacionais indicam que o consumo de cimento deve indicar valores acima de 300 kg/m³ a fim de assegurar os níveis mínimos de resistência à compressão e durabilidade, necessários para classificação como concreto estrutural.

Entretanto, Medeiros (2016) mostrou que é possível produzir concretos de alta resistência à compressão, substituindo o cimento por adições minerais em até 50%, chegando a níveis de cimento entre 220 e 265 kg/m³, que apresentaram valores maiores do que o concreto de referência com consumo de 450kg/m³.

2.3.2 RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO QUÍMICA POR ÍONS CLORETOS

Os íons cloretos são achados no concreto em distintas configurações, dentre elas as mais comuns são, livres na solução dos poros do concreto, adsorvidos fisicamente às divisas dos poros, combinados quimicamente ao C-S-H ou como cloroaluminatos de cálcio, mais conhecido como sal de Friedel (C₃A.CaCl₂.10H₂O). Este, incorpora-se à fase sólida do cimento hidratado, outra parte é fisicamente retida por adsorção à superfície dos poros de gel. Uma terceira parte fica dissolvida na fase aquosa dos poros, constituindo os cloretos livres, que adentram através do concreto, até atingir a armadura, podendo desencadear o processo corrosivo (FORTES, 1995).

O concreto pode ser contaminado por cloretos devido ao ambiente em que está situado como nos casos de estar em contato com uma atmosfera marinha ou até mesmo em sua própria composição, como por exemplo na água utilizada em sua composição ou até mesmo agregados e aditivos aceleradores de pega com CaCl₂ em sua composição (MEDEIROS, 2016).

2.4 CONCRETOS COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO

Segundo o estudo desenvolvido por Wongkeo *et al.* (2014), que investigou 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, sendo estudadas substituições totais de 50, 60 e 70%. As análises indicaram que a resistência à compressão foi diminuída em misturas binárias, sendo o cimento em parte substituído por cinzas volantes. Porém, nas combinações ternárias o resultado foi mais adequado aos 7 dias. O estudo indicou também que as cinzas volantes e sílica ativa pode aperfeiçoar a resistência cloreto de CAA em altos teores de substituição do cimento Portland.

Anjos (2009), avaliou a adição do resíduo de biomassa da cana-de-açúcar em pastas para cimentação de poços petrolíferos produtores de óleos pesados. O estudo concluiu que a cinza de biomassa da cana-de-açúcar obtida na forma residual no município de Arês no Rio Grande do Norte, necessita de uma moagem adequada para ser utilizada como aditivo mineral, pois é uma cinza de biomassa obtida sem controle rigoroso de temperatura de queima. A moagem utilizada possibilitou que a cinza de biomassa atendesse a todas as especificações químicas e físicas exigidas para materiais pozolânicos, se enquadrando como pozolana classe E, pela norma NBR 12653/2015.

Foi observado que por difração de raios X, que a cinza de biomassa mostrar-se na forma cristalina, o que não favorece a reação pozolânica, no entanto depois da moagem a cinza apresentou diâmetros de grãos muito menores que o cimento Portland, o que beneficiou a atividade pozolânica da cinza de biomassa. Esta atividade foi determinada em pastas de cal-cinza, podendo comprovar através de ensaios de difração de raios X, a formação de silicato de cálcio hidratado originário da reação da cinza com o hidróxido de cálcio presente na cal, (ANJOS, 2009).

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo subsidiou a avaliação das propriedades mecânicas e de durabilidade frente ao ataque por cloretos dos concretos autoadensáveis com altos teores de adições minerais na idade de 365 dias, sendo o mesmo realizado nos laboratórios do Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN). Utilizou-se corpos de prova, executados durante a pesquisa para realização de dissertação de mestrado da Professora Fernanda Karolinne de Medeiros, cuja dosagem utilizada seguiu o métodos previamente estudados pelo grupo de pesquisa IFRN/PEC/UFRN.

Os traços foram desenvolvidos com o objetivo de diminuir o consumo de cimento e manter valores de resistência compatíveis com as recomendações da ABNT NBR 6118:2014,

com padrão mínimo de 20MPa para concretos estruturais. A tabela 3.1 apresenta a porcentagem de substituição de cimento nos traços.

Tabela 3.1 – Traços utilizados.

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

Foram realizados 5 tipos de traços com quatro corpos de prova por traço, sendo produzido um traço de Concreto autoadensável (CAA) de referência com 450 kg/m³ de cimento por m³, dois traços que substituíram 40% de cimento por adições minerais e dois traços que substituíram 50% de cimento. A tabela 3.2 apresenta a composição dos traços utilizados.

Tabela 3.2 – Composição dos traços utilizados.

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	1,9	346,4	0,44
PCA30MK20	220,4	132,2	0,0	88,1	722,8	951,9	191,7	6,6	358,7	0,44
PCA20MK20	265,6	88,5	0,0	88,5	725,9	956,1	194,8	4,6	361,5	0,44
RBC30MK20	219,7	0,0	131,8	87,9	720,7	949,3	191,2	5,3	359,9	0,44
RBC20MK20	265,1	0,0	88,4	88,4	724,6	954,3	194,4	4,9	363,3	0,44

Os traços foram nomeados de acordo com o seu percentual de adição, de forma que RBC30MK20, por exemplo, significa substituição de 30% do cimento por resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC) e 20% por metacaulim (MK). Além do RBC30MK20 e do traço de referência, os demais traços analisados foram RBC20MK20, PCA30MK20 e PCA20MK20, onde PCA refere-se ao resíduo resultante da combustão da casca de arroz.

3.1 ENSAIO DE MIGRAÇÃO DE CLORETOS EM REGIME NÃO ESTACIONÁRIO

Para a avaliação da durabilidade das amostras de concreto aos 365 dias, realizou-se o ensaio para a determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário, de acordo com o documento normativo LNEC E – 463 (2004), com a finalidade de avaliar a resistência à penetração de íons cloreto das amostras ensaiadas. Nessa fase, o estudo foi dividido em 4 etapas. Na primeira, foi realizada a coleta dos corpos de prova no IFRN, onde os mesmos ficaram submersos em água durante 365 dias. Após a coleta, realizou-se o fatiamento diametral dos corpos de prova utilizando-se a serra diamantada arrefecida a água no laboratório de Geologia da UFRN, para realização do ensaio, conforme a norma, foram utilizados 3 provetes de 100 mm de diâmetro por 50 mm de altura. Desse modo, utilizou-se 2 corpos de prova por traço e cada corpo de prova foi fatiado em 4 partes, sendo que para o ensaio em questão, utilizou-se apenas as fatias centrais dos corpos de prova, totalizando-se 3 fatias ensaiadas por traço e uma fatia reserva.

Na segunda etapa, após a serragem, os provetes foram escovados com escova de aço no sentido perpendicular do fluxo de íons, que foi gerado posteriormente para dificultar a passagem lateral dos íons e diminuir reentrâncias no corpo de prova. Em seguida, lavou-se os provetes e tirou-se o excesso de água de sua superfície. Quando estes secaram superficialmente, foram colocados na câmara de vácuo para que fossem submetidos ao tratamento por vácuo, cuja pressão absoluta da câmara de vácuo foi reduzida a 50mbar (5kPa) em poucos minutos.

A partir de então, foi mantido o vácuo durante 3 horas e em seguida, encheu-se o recipiente com solução saturada de hidróxido de cálcio - Ca(OH)_2 de modo que todos os provetes ficassem imersos, permanecendo mais uma hora no vácuo. Após a retirada do vácuo, os provetes permaneceram na solução de Ca(OH)_2 por mais 20 horas.

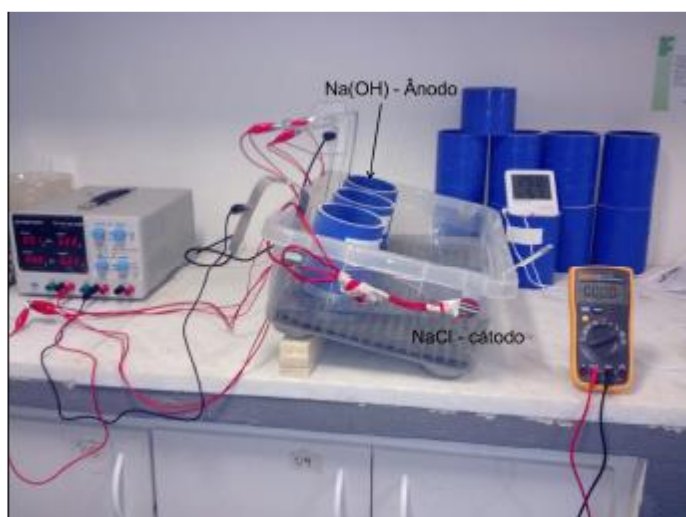
Começando a terceira etapa, deu-se início a montagem do ensaio, onde primeiramente as fatias dos corpos de prova foram inseridas em mangas de silicone com dimensões internas ligeiramente inferiores as dimensões externas dos provetes. Para impedir a passagem dos cloretos entre a manga e o provete, foram utilizadas abraçadeiras de aço. A estanqueidade do conjunto manga-provete foi testada antes de iniciar o ensaio. Foram utilizadas duas soluções durante o ensaio, uma catódica de 10% em massa de cloreto de sódio - NaCl em água (100g de NaCl em 900g de água) e uma anódica (12g de hidróxido de sódio - NaOH em 1 litro de água), mantendo as mesmas num gradiente de temperatura entre 20°C e 25°C.

Prosseguindo a montagem do ensaio, foi colocado o cátodo dentro do reservatório, nas dimensões do fundo, em seguida, colocou-se sobre o cátodo, um gradil isolante e encheu-se o

reservatório com cerca de 12 litros da solução catódica 10% de NaCl. Com o conjunto mangaproвете já montado, foi colocado em seu interior o ânodo e o imergiu com cerca de 300 ml de solução anódica.

Por fim, aplicou-se à uma fatia do corpo de prova, entre as faces circulares, um potencial elétrico externo, forçando os íons cloreto externo a migrarem para o interior da fatia do corpo de prova, ligando o cátodo ao polo negativo da fonte e o ânodo ao positivo. Em seguida, ligou-se a fonte de alimentação com uma voltagem de 30V e registrou-se as intensidades das correntes iniciais para cada provete. Após a medição inicial, todos os traços necessitaram de ajuste na voltagem, sendo que o REFCAA teve a voltagem ajustada para 25V e os demais traços para 60V, em seguida, anotou-se as novas correntes iniciais para cada provete, registrou-se as temperaturas iniciais em cada solução anódica e determinou-se o tempo de ensaio para cada traço de acordo com as correntes aferidas. A figura 3.1 ilustra o ensaio.

Figura 3.1 – Ensaio migração de cloretos LNEC.



Fonte: Medeiros, 2016.

Na quarta e última etapa do ensaio de migração de cloretos em regime não estacionário, após o tempo de ensaio que variou entre 24h (REFCAA) e 96h (PCA30MK20), registrou-se a intensidade das correntes finais, e as temperaturas finais. Por fim, retirou-se os provetes das mangas e com o auxílio da prensa hidráulica do Laboratório de Materiais e Produtos Cimentícios do IFRN, partiu-se os corpos de prova por compressão diametral em duas partes e escolheu-se a seção mais plana entre as duas, onde foi pulverizado na seção retangular, uma solução de Nitrato de prata - AgN_3 . Quando o precipitado branco do nitrato de prata ficou claramente visível na superfície separada, passados cerca de 15 minutos, foi feita a medição da profundidade de penetração com a ajuda de um paquímetro, do centro até ambos os bordos até obter sete profundidades, evitando-se por recomendação normativa, medidas a menos de 10

mm da borda, por ser uma região susceptível a maiores penetrações de cloreto devido a possíveis falhas que podem ocorrer durante a vedação entre o provete e a manga de silicone. Este procedimento se repetiu para cada um dos 5 traços estudados, utilizando 3 provetes para cada traço.

O coeficiente de difusão em regime não estacionário é calculado a partir da equação (3.01):

$$D = \frac{R.T}{z.F.E} \cdot \frac{x_d - \alpha \cdot \sqrt{x_d}}{t} \quad (3.01)$$

onde:

$$E = \frac{U - 2}{L} \quad (3.02)$$

$$\alpha = 2 \cdot \sqrt{\frac{R.T}{z.F.E}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2 \cdot c_d}{c_o} \right) \quad (3.03)$$

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

z , o valor absoluto de valência do íon, para os cloreto, $z = 1$;

F , constante de Faraday, $F = 9,648 \times 10^4 J/(V.mol)$;

U : valor absoluto da voltagem aplicada, V ;

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

T : valor medio das temperaturas inicial e final no anolito (*graus Kelvin*);

L : espessura do provete, m

x_d : valor medio da profundidade de penetracao, m ;

t : duracao do ensaio, *segundos*;

erf^{-1} : inverso da funcao 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 catolito*, $c_o \approx 2N$

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

3.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL

Quanto a avaliação das propriedades mecânicas, realizou-se ensaio de compressão axial dos corpos de prova nos traços estudados de acordo com a NBR 5739 (2007), aos 365 dias,

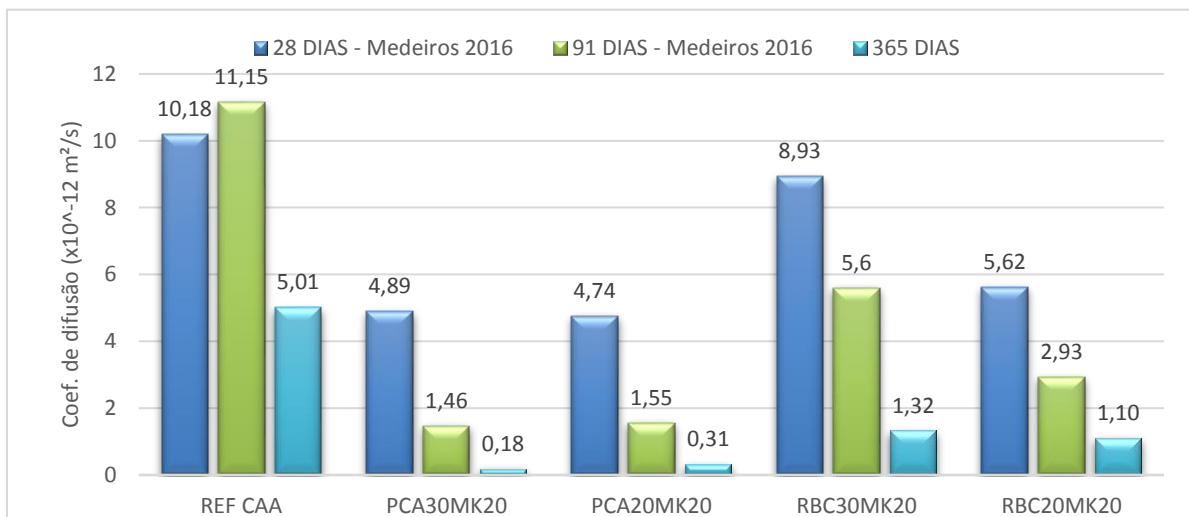
sendo ensaiados dois corpos de prova cilíndricos (10 x 20 cm) para cada traço dosado. Após a desmoldagem, os corpos de prova foram colocados em cura por imersão em água a temperatura de 22 ± 2 °C, onde ficaram até a idade estabelecida. Antes dos ensaios os corpos de prova foram retificados para regularização das faces superior e inferior nos casos necessários. 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.

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios para determinação do coeficiente de difusão dos cloretos em regime não estacionário mostram que ocorreu aumento na resistência à penetração dos íons cloreto aos 365 dias quando comparado aos resultados obtidos por Medeiros (2016) aos 28 e 91 dias.

Verifica-se que todos os traços com adições minerais apresentaram um comportamento significativo em relação à resistência a penetração de íons cloreto quando comparado ao traço de referência, conforme pode ser observado na figura 4.1, evidenciando que a inclusão de altos volumes de adições traz benefícios relevantes no tocante à durabilidade dos concretos frente ao ataque por cloretos.

Figura 4.1 – Coeficiente de difusão dos cloretos dos concretos aos 28, 91 e 365 dias.



O melhor resultado foi encontrado para os concretos da composição PCA30MK20, com redução de aproximadamente 96,41% do coeficiente de difusão dos cloretos, quando comparado com o concreto de referência. O concreto PCA20MK20, que apresentou melhor performance aos 28 e 91 dias nos estudos de Medeiros (2016), aos 365 dias reduziu 93,81%

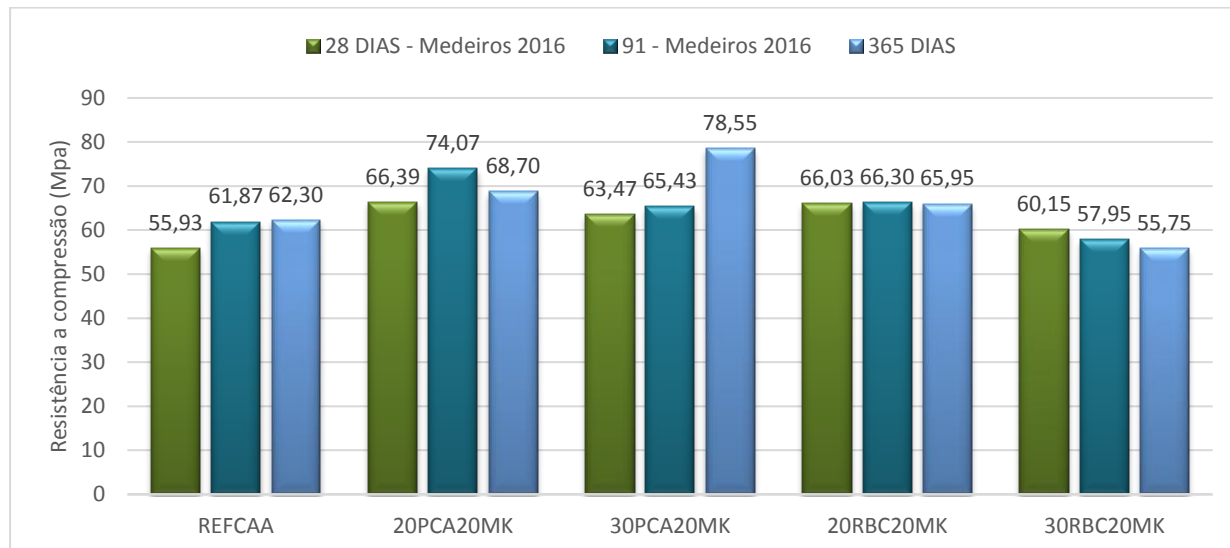
em relação ao REFCAA.

Essas significativas reduções aos 365 dias, podem ser explicadas 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 (MEDEIROS, 2016).

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, 91 e 365 dias, pois houve uma diminuição da resistência à migração de cloretos com o aumento da idade entre 28 e 91 dias, contudo, houve aumento da resistência aos 365 dias. Desse modo, considerou-se que ocorreu uma melhora significativa na resistência à migração de cloretos aos 365 dias.

Quanto a resistência à compressão axial, os concretos com adições minerais, a exceção do traço 30RBC20MK que obteve resistência aos 365 cerca de 10,51% inferior ao de referência, apresentaram valores de resistência aos 365 dias superiores ao traço de referência. Apesar desse comportamento inesperado do 30RBC20MK, o resultado foi satisfatório uma vez que conseguiu-se elevada resistência utilizando teores de cimento abaixo de 300 kg/m³.

Figura 4.2 – Média das resistências a compressão axial aos 28, 91 e 365 dias.



Na avaliação dos resultados também foi notado uma tendência de ganho de resistência tardia, após os 28 dias onde concretos convencionais atingem praticamente 100% de sua resistência característica.

Medeiros (2016) comenta que essas melhorias de resistência dos concretos com o emprego de adições pozolânicas, observadas nos resultados, é promovida pela densificação da

matriz da pasta, devido as reações com o hidróxido de cálcio e formação de silicato de cálcio hidratado - C-S-H adicional, e maior compactação 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 RBC, apresentaram melhores resultados em relação a resistência a compressão nos traços com substituição de 40% de cimento, enquanto que as composições com PCA tiveram melhores resistência na composição com substituição de 50%.

Os valores de resistência à compressão axial obtidos aos 365 dias, podem confirmar a real aplicabilidade dos concretos estudados, com valores de resistência de até 78,55 MPa, mesmo com um baixo consumo de cimento, variando de 220 a 265 kg/m³.

5.0 CONCLUSÃO

O presente estudo foi desenvolvido com o objetivo de analisar se a incorporação de elevados volumes de adições minerais, em especial o RBC e a PCA no concreto, é capaz de manter ou melhorar seu desempenho mecânico e durabilidade quando comparado a um concreto autoadensável produzido com materiais convencionais. Desse modo, as análises das amostras após um ano apresentaram resultados satisfatório no que se refere a durabilidade quando expostos a íons cloreto, e alta resistência mecânica quando submetido a esforços de compressão axial, dando evidências que é possível a utilização de concretos autoadensáveis com altos teores de adições minerais com substituição de até 50% do cimento. Para complementação deste estudo no que refere-se à questão de durabilidade, sugere-se uma análise do avanço da frente de carbonatação em concretos autoadensáveis com elevados teores de adições minerais.

6.0 REFERÊNCIAS

ANJOS, M. A. S. dos: **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. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**: NBR 5739, Rio de Janeiro. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto autoadensável – Parte 1 – Classificação, controle e aceitação no estado fresco**: NBR 15823-1, Rio de Janeiro. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto -**

Procedimento: NBR 6118, Versão Corrigida - Rio de Janeiro. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais pozolânicos - requisitos:** NBR 12653, Rio de Janeiro. 2014. Versão corrigida (2015).

BARROS, P. G. dos S.: **Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável obtido com resíduo de corte de mármore e granito.** Dissertação Mestrado/ Pedro Gustavo dos Santos Barros. Maceió. 2008.

BORJA, E. V. :**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. 2011.

CONAB Companhia Nacional de Abastecimento: **Acompanhamento da Safra Brasileira – Grãos – 2º Levantamento – Novembro.** Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_11_11_14_54_21_boletim_graos_nove_mbro_2016.pdf. Acessado em 10/11/2016.

DAL MOLIN, D. C. C.: **Adições minerais para concreto estrutural.** In: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. ed. G. C. ISAIA. 1ª edição. São Paulo: IBRACON, 2005.

DAL MOLIN, D. C. C.: **Adições minerais.** In: Concreto: ciência e tecnologia. ed. G. C. ISAIA. São Paulo: IBRACON, v. 1. Cap. 08, p. 261–310. 2011

EFNARC - European Federation For Specialist Construction Chemicals And Concrete Systems . **Specification and guidelines for self-compacting concrete.** London, 2005.

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

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

GOMES, P. C. C. & BARROS, A. R.:**Métodos de dosagem de concreto autoadensável.** 1ª ed., Pini, São Paulo, 2009.

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

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

MEHTA, P. K., & MONTEIRO, P. M.: **Concreto: Microestrutura, propriedades e Materiais.** 1a ed., IBRACON, São Paulo. 2014.

OLIVEIRA, C. A. de S.: **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. 2007.

TINOCO, H. F. F.: **Responsabilidade Social na Construção Civil.** Boletín Técnico N°10 – Alconpat – Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción. 21 p.2013.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D.C.: **Concreto Auto-adensável.** 1ª ed., Pini, São Paulo, 2008.

WBCSD – World Business Council for Sustainable Development: **Cement Technology Roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050.** 36 p. 2009. Disponível em: <http://www.wbcscement.org/index.php/en/key-issues/climate-protection/technology-roadmap>. Acesso em:18/11/2016.

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