



Universidade Federal do Pampa

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA – UNIPAMPA

CENTRO DE TECNOLOGIA DE ALEGRETE - CTA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

GABRIEL GAVIÃO MENDES

**DURABILIDADE DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE SÍLICA DA CASCA DE ARROZ
À PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Alegrete, RS, Brasil

2014

GABRIEL GAVIÃO MENDES

**DURABILIDADE DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE SÍLICA DA CASCA DE ARROZ
À PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETOS**

Trabalho De Conclusão De Curso
Apresentado Ao Programa De
Graduação Em Engenharia Civil Da
Universidade Federal Do Pampa, Como
Requisito Parcial Para Obtenção Do
Grau De Engenheiro Civil.

Orientador: Dr. Ederli Marangon

Coorientador: Eng. Marcelo de Jesus
Dias De Oliveira

Alegrete, RS, Brasil

2014

GABRIEL GAVIÃO MENDES

**DURABILIDADE DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE SÍLICA DA CASCA DE ARROZ
À PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal
do Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso
Defendido e aprovado em: 14/03/2014
Banca examinadora:

Prof. Dr. Ederli Marangon
Orientador – UNIPAMPA

Eng. Marcelo de Jesus Dias de Oliveira
Coorientador – UNIPAMPA

Prof. Dr. Telmo Egmar Camilo Deifeld
Banca Examinadora – UNIPAMPA

Eng. Luis Fernando Mota Marton
Banca Examinadora – GEEA

Dedico este trabalho aos meus pais,
Elautério e Ângela, ao meu irmão
Guilherme e ao meu tio Eduardo.

AGRADECIMENTO

A Deus por tudo que tenho nesta vida e a todas as pessoas que me apoiaram.

À minha família por todo apoio e amor.

Ao Prof. Dr. Ederli Marangon pela orientação e incentivo ao longo da elaboração deste trabalho.

Ao Eng. Marcelo Dias por aceitar fazer parte deste trabalho e por sempre estar disposto a sanar minhas dúvidas.

Aos técnicos de laboratório da UNIPAMPA pelo auxílio no programa experimental.

Aos colegas de laboratório; Daniela, Deividi, Everton, Letícia e Raphael pelo auxílio na realização deste trabalho.

A todos amigos, pelo apoio e momentos de descontração.

À GEEA e a Pilecco Nobre Alimentos Ltda, pelo apoio financeiro para a realização deste estudo.

“O sucesso nasce do querer, da determinação
e persistência em se chegar a um objetivo.
Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e
vence obstáculos, no mínimo fará coisas
admiráveis.”

José de Alencar

RESUMO

Os íons cloretos são os principais agentes iniciadores de corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado, isso se deve a sua capacidade de destruir a película passivadora gerada pelo cimento Portland. O objetivo deste trabalho é estudar os efeitos da adição de sílica da casca arroz, obtida por meio de queima em leito fluidizado, na durabilidade de concretos, a base de cimento Portland do tipo CII-Z, frente à penetração de íons cloretos. Neste trabalho foram analisadas, além da mistura referência, outras três misturas, nas quais foi substituído o cimento Portland por sílica de casca de arroz, nos teores de 3%, 5% e 10%. Para a avaliação da durabilidade destes concretos a penetração de íons cloretos foram adotados dois métodos; ensaio acelerado de penetração de íons cloretos, e o ensaio de penetração de íons cloretos por imersão em solução salina. Também foram realizados ensaios de resistência à compressão axial para análise do comportamento mecânico dos concretos estudados. Os ensaios foram realizados aos 56 dias e aos 91 dias de idade. As amostras provenientes das misturas contendo sílica da casca de arroz apresentaram uma redução da profundidade média da penetração de íons cloretos e da carga passante, sendo que a mistura contendo 5% de sílica foi a que apresentou resultados mais satisfatórios, reduzindo em aproximadamente 25% o valor da carga passante no ensaio acelerado, realizado aos 91 dias. A profundidade média da penetração de cloretos nos ensaios de imersão foi de aproximadamente 37% menor para a mistura contendo 5% de sílica de casca de arroz em relação à mistura de referência.

Palavras-chave: Concreto, Sílica de casca de arroz, Cloretos, Durabilidade.

ABSTRACT

The chloride ions are the principals initiators agents of corrosion of armors in reinforced concrete structures, this happened due his capacity of destroy the passivation film generated for the Portland concrete (Neville, 1997). The objective this work is studies the effects of the addition of silica from rice husk, obtained by burn in layer fluidized, in the durability of concrete, based Portland cement of kind CPII-Z, front of penetration of chloride ions. In this work were analyzed, beyond of mixture reference, another three mixtures, what was substituted the Portland cement for silica from rice husk, in the levels of 3%, 5% and 10%. For the evaluation of durability this concretes of penetration chloride ions were adopted two methods: accelerated test of penetration of chloride ions, and the test of penetration of chloride ions for immersion in saline. Also were realized resistance tests for axial compression to analysis of mechanic comportment of studied concretes. The tests were realized to 56 days and to 91 years old. The samples from of silica from rice husk mixtures presented a reduction of average deepness of the penetration of chloride ions and of passing load, being that the mixture containing 5% of silica was that showed the best results, reducing in approximately 25% of the value the passing load in the accelerate test, realized to 91 days. The average depth of penetration of chlorides in the immersion tests was approximately 37% lower for the blend containing 5% silica rice husk compared to the reference mixture.

Keywords: Concrete, Silica Rice Husch, Chloride, Durability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| <i>Figura 1: Modelo de corrosão</i> | 22 |
| <i>Figura 2: Células de migração</i> | 24 |
| <i>Figura 3: Ensaio de resistência à compressão axial</i> | 34 |
| <i>Figura 4: Compacidade do cimento com adição de sílica</i> | 35 |
| <i>Figura 5: Etapas de preparo e pré-condicionamento</i> | 37 |
| <i>Figura 6: Ensaio acelerado de penetração de íons cloretos</i> | 38 |
| <i>Figura 7: Profundidade da penetração de íons cloretos após ensaio acelerado</i> | 38 |
| <i>Figura 8: Procedimentos para ensaio de íons cloretos por imersão</i> | 39 |
| <i>Figura 9: Ação de íons cloretos por imersão em solução</i> | 40 |
| <i>Figura 10: Curvas de corrente passante ao longo do tempo para diferentes misturas e idades de ensaio</i> | 43 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| <i>Tabela 1: Limite crítico de cloretos</i> | 23 |
| <i>Tabela 2: Penetração de íons cloretos por ensaio acelerado em idades avançadas</i> | 26 |
| <i>Tabela 3: Influência da relação A/ag. na penetração de cloretos.</i> | 27 |
| <i>Tabela 4: Caracterização dos agregados</i> | 29 |
| <i>Tabela 5: Características químicas do CP II-Z</i> | 30 |
| <i>Tabela 6: Características físicas do cimento CP II-Z</i> | 31 |
| <i>Tabela 7: Índice de atividade pozolânica da sílica da casca de arroz</i> | 32 |
| <i>Tabela 8: Consumo de materiais em kg para 1m³</i> | 33 |
| <i>Tabela 9: Classificação da penetração de íons cloretos com base na carga passante</i> | 36 |
| <i>Tabela 10: Adições utilizadas para estudo da penetração de íons cloretos</i> | 45 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/ag. – Relação entre água e aglomerante

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AgNO₃ – Nitrato de prata

ASTM – American Society for Testing and Materials

CP II-Z – Cimento Portland pozolânico

CP's – Corpos de prova

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

e- – Elétron

EPCI- Ensaio de penetração de íons cloretos por imersão

Fe – Ferro

Fe⁺⁺ – Íons ferro

Hg - Mercúrio

NaCl – Cloreto de sódio

NaOH – Hidróxido de sódio

Ph – Potencial de hidrogênio

R² - Coeficiente de determinação

REF. – Mistura referência

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 Contextualização do tema de pesquisa | 14 |
| 1.2 Definição do problema e da questão de pesquisa | 14 |
| 1.3 Objetivos | 15 |
| 1.3.1 Objetivo geral..... | 15 |
| 1.3.2 Objetivos específicos..... | 15 |
| 1.4 Justificativa | 15 |
| 1.5 Estrutura do trabalho | 16 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA | 17 |
| 2.1 Concretos com adições minerais | 17 |
| 2.1.1 Introdução | 17 |
| 2.1.2 Efeitos das adições..... | 17 |
| 2.1.3 Adição de sílica de casca de arroz..... | 18 |
| 2.2 Durabilidade de estruturas em concreto | 19 |
| 2.2.1 Introdução | 19 |
| 2.2.2 Mecanismos de corrosão de armaduras | 21 |
| 2.2.3 Penetração de íons cloretos em estruturas de concreto | 22 |
| 2.3 Ensaio para determinação da penetração de íons cloretos | 24 |
| 2.3.1 Ensaio acelerado de penetração de íons cloretos ASTM C 1202..... | 24 |
| 2.3.2 Ensaio de penetração de íons cloretos por imersão-EPCI..... | 26 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS | 28 |
| 3.1 Introdução | 28 |
| 3.2 Materiais | 28 |
| 3.2.1 Agregados..... | 28 |
| 3.2.2 Cimento Portland | 30 |
| 3.2.3 Sílica da casca de arroz..... | 31 |
| 3.2.4 Aditivo | 33 |
| 3.3 Métodos experimentais | 33 |
| 3.3.1 Método de dosagem | 33 |
| 3.3.2 Ensaio de resistência à compressão axial | 33 |
| 3.3.3 Determinação da compacidade de materiais compostos por partículas com dimensões inferiores a 100 µm | 34 |
| 3.3.4 Ensaio acelerado de penetração de íons cloretos..... | 35 |
| 3.3.5 Ensaio de penetração de íons cloretos por imersão - EPCI..... | 39 |
| 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS | 40 |
| 4.1 Determinação da compacidade dos materiais | 40 |
| 4.2 Ensaio de resistência à compressão axial | 41 |
| 4.3 Ensaio acelerado de penetração de íons cloretos | 42 |

| | |
|--|-----------|
| 4.4 Ensaio de penetração de íons cloretos por imersão - EPCI | 47 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 48 |
| 5.1 Conclusões..... | 48 |
| 5.2 Sugestões para trabalhos futuros..... | 49 |
| REFERÊNCIAS..... | 50 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema de pesquisa

O mercado da construção civil brasileira tem crescido muito nos últimos anos, e isso se deve, principalmente, a projetos governamentais e aos preparativos para receber grandes eventos esportivos que serão realizados no país. Estas obras de construção civil trazem benefícios permanentes para o desenvolvimento do país, pois estão sendo construídos, blocos residenciais, viadutos, pontes e a duplicação de rodovias importantes para os brasileiros.

O aquecimento do setor da construção civil no país acarreta um aumento substancial na demanda do uso de concretos, devido a sua grande importância para o setor. Segundo Helene e Andrade (2007) o concreto de cimento Portland é o mais importante material estrutural e de construção civil da atualidade, podendo ser considerado como uma das descobertas mais interessantes da história do desenvolvimento da humanidade e sua qualidade de vida.

O cimento Portland é o principal material constituinte do concreto, porém, seu custo é expressivo e sua produção gera impactos ambientais. Tendo em vista a necessidade da redução do consumo de cimento, tanto do ponto de vista ambiental como econômico, sem que haja perda das propriedades físicas, químicas e de durabilidade que esse oferece ao concreto. Estudos vêm utilizando adições minerais ao cimento de diversos rejeitos industriais e agrícolas com o intuito de manter e até mesmo melhorar as propriedades do concreto. Dentre estas adições, pode-se citar a utilização de cinza volante, escória de alto forno e cinza da casca de arroz.

Dentre os benefícios que podem ser gerados pelas adições minerais, ao concreto, destacam-se: a melhora da resistência à fissuração térmica devido à redução do calor de hidratação, o aumento da resistência mecânica e a alta durabilidade frente à ação de agentes agressivos devido ao refinamento dos poros (Mehta e Monteiro, 2006).

1.2 Definição do problema e da questão de pesquisa

A casca de arroz vem sendo utilizada como forma alternativa de combustível para geração de energia em termelétricas. Com a queima da casca é gerada a cinza, que conforme Dal Molin (2011), se a combustão for feita de maneira controlada, com temperaturas entre 500 a 700°C, pode-se obter cinzas de alta pozolanicidade.

A sílica proveniente da queima da casca do arroz torna-se uma alternativa promissora que visa à redução do consumo de cimento e ao mesmo tempo um destino adequado e produtivo para este material. Vem sendo realizados trabalhos como o de Missau (2004), Pedrozo (2008), Trindade (2011), Da Silva (2012), entre outros, que visam o estudo da influência das adições de sílica da casca do arroz, proveniente da queima da casca de arroz, ao concreto e a resistência desses concretos a penetração de íons cloreto.

No entanto, não foi encontrada, na bibliografia pesquisada, a existência de trabalhos, que tratem da adição de sílica da casca de arroz proveniente de combustão em leito fluidizado e moagem controlada, e a influência em teores de 3%, 5% e 10%, em substituição parcial ao cimento CII-Z, na resistência a penetração de cloretos.

Para o melhor entendimento deste trabalho é feita a seguinte pergunta: Qual é a influência da adição de baixos teores de sílica da casca do arroz na durabilidade de concretos, frente à ação de agentes agressivos, tais como, íons cloreto?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O principal objetivo deste trabalho é avaliar a durabilidade de concretos, com adição de baixos teores de sílica da casca do arroz, em relação à penetração de íons de cloretos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analisar o efeito da variação de baixos teores de sílica da casca do arroz no desempenho de concretos à ação de íons cloretos.
- Estudar a forma de atuação da sílica da casca do arroz na durabilidade de concretos.
- Comparar resultados de ensaios de resistência à compressão axial com diferentes ensaios de penetração de íons cloreto.

1.4 Justificativa

Ao passo que o mercado da construção civil exige materiais alternativos que agridam menos ao meio ambiente, existe uma preocupação contínua sobre os efeitos desses novos materiais e a durabilidade destas construções.

Um dos parâmetros de referência para o dimensionamento de uma estrutura é a sua resistência à compressão, no entanto, um quesito fundamental para uma estrutura durável é a sua capacidade de proteger a armadura da entrada de agentes agressivos, como os íons cloretos, que segundo Figueiredo (2011), são os principais agentes iniciadores da corrosão às armaduras de estruturas de concreto. Com isso, torna-se necessário o estudo da resistência de concretos com adições de sílica da casca de arroz, ao cimento CP II-Z, a penetração de íons cloreto.

Em se tratando de concretos, a substituição parcial de cimento por sílica da casca de arroz, tornou-se uma alternativa interessante para a redução dos custos das estruturas e do impacto ambiental, tanto o gerado na produção do Cimento Portland, quanto o do descarte inadequado da cinza. Porém, sua eficiência como material pozolânico está associada ao controle adequado da temperatura de queima do material e o processo de moagem. A sílica de casca de arroz que foi utilizada neste trabalho é proveniente de um processo de combustão em leito fluidizado, onde existe um controle do gradiente de temperatura, gerando uma sílica amorfa e moagem controlada. Optou-se por estudar teores de substituição de cimento Portland por sílica de casca de arroz semelhantes aos que vem sendo comercializados em concreteiras do estado. Espera-se que esta sílica represente ganhos na durabilidade dos concretos frente à penetração de íons cloretos.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. No primeiro contém a introdução, os objetivos, definição do problema e a justificativa desta pesquisa. No segundo consta a fundamentação teórica, sendo abordados tópicos com relação ao concreto, adições minerais, durabilidade de concretos e ação dos íons cloreto, também serão apresentados alguns resultados encontrados em outros trabalhos. No terceiro, são apresentados os procedimentos metodológicos que foram utilizados para realização do programa experimental proposto neste trabalho. No quarto capítulo, são apresentados os resultados obtidos no programa experimental. O quinto e último capítulo traz as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

2.1 Concretos com adições minerais

2.1.1 Introdução

De acordo com Mehta e Monteiro (2006), devido a fatores econômicos e ambientais muitos subprodutos industriais e agroindustriais tornaram-se uma fonte de adições minerais ao concreto. Desde que, com controle de qualidade adequado, esses materiais podem ser incorporados ao concreto, quer sob a forma de mistura no cimento portland, ou como, adições minerais. As usinas geradoras de energia que utilizam carvão mineral ou casca de arroz, como combustível e fornos da indústria metalúrgica são as principais fontes de subprodutos utilizados como adições minerais ao concreto, sendo produzidos em muitos países milhões de toneladas por ano.

Para Cordeiro (2006), adições minerais podem ser definidos como materiais utilizados conjuntamente com o cimento Portland, com o objetivo de propiciar um desempenho diferenciado a produtos cimentícios. As adições minerais comumente empregados 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 de alto-forno.

Dal Molin (2011) classifica as adições de acordo com sua ação físico-química, em três grupos: (1) Pozolanas: Por definição, pozolana é um material silicoso que em si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas numa forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com o Ca(OH)_2 a temperaturas ambientais para formar compostos com propriedades cimentantes (MEHTA e MONTEIRO, 2006). (2) Material Cimentante: não necessita de cálcio presente no cimento para formar produtos cimentantes como o C-S-H. (3) Fíler: é uma adição mineral finamente dividida sem atividade química, ou seja, sua ação se resume a um efeito físico de empacotamento granulométrico.

2.1.2 Efeitos das adições

De acordo com Cordeiro (2006) pode-se atribuir a efeitos físicos e químicos as mudanças nas propriedades de produtos cimentícios confeccionados com adições minerais. Os dois principais efeitos físicos das adições minerais ao concreto podem ser: nucleação dos poros e efeito fíler.

Devido à pequena dimensão das adições, estas podem agir como pontos de nucleação para os produtos de hidratação. O crescimento dos cristais ocorrerá não somente a partir da superfície dos grãos de cimento, mas também nos poros ocupados pela adição mineral e água, acelerando as reações de hidratação (DAL MOLIN, 2011). É atribuído ao efeito fíler a redução do número de vazios, devido a adição de pequenas partículas, cujo diâmetro médio deve ser semelhante ou menor que o das partículas de cimento (CORDEIRO, 2006).

O refinamento dos poros através de adições de pozolanas é relevante na redução da permeabilidade, ou seja, na durabilidade dos concretos, pois quanto maior a permeabilidade, maior a facilidade de entrada de agentes agressivos, causadores de danos às estruturas de concreto armado (DUART, 2008).

Segundo Dal Molin (2011) o efeito químico das adições minerais está associado à capacidade de reação com o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , formado durante a hidratação do cimento Portland, para formar os silicatos de cálcio hidratado (C-S-H). Estes silicatos formados tendem a preencher os vazios capilares, aumentando a resistência da pasta de cimento, na zona de transição, que é a principal fonte de microfissuras nos concretos.

2.1.3 Adição de sílica de casca de arroz

O arroz está entre os cereais mais consumidos do mundo. O Brasil é o nono maior produtor mundial e colheu 11,26 milhões de toneladas na safra 2009/2010. A produção está distribuída nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Mato Grosso (MAPA, 2013).

A casca de arroz é um revestimento ou capa protetora formada durante o crescimento do grão a qual, representa 20% do seu peso, possui baixa densidade, contém alto teor de sílica, sendo composta por: 50 % de celulose, 30 % de lignina e 20 % de resíduos inorgânicos (HOUSTON, 1972 apud POUHEY, 2006).

A sílica da casca do arroz é o material resultante da combustão da casca e arroz, usada pelas indústrias beneficiadoras de arroz, como fonte de geração de calor e vapor necessários nos processos de secagem e paraboilização dos grãos e por usinas termelétricas como combustível para geração de energia elétrica.

De acordo com Duart (2008) a utilização da cinza da casca do arroz se fundamenta em dois principais fatores: o reaproveitamento de um rejeito industrial e

a diminuição do custo na produção de concretos, uma vez que por serem rejeitos industriais tem custo baixo, normalmente apenas o de transporte do material.

A eficiência da cinza da casca de arroz como material pozolânico está relacionada ao seu processo de obtenção. Cinzas provenientes de combustão não controlada, geralmente, contém uma grande proporção de minerais de sílica não reativos, chamados cristalinos, e de baixo valor pozolânico (DAL MOLIN, 2011).

O processo de calcinação é muito importante para a atividade pozolânica. A calcinação deve ser feita em temperaturas de 500 a 700 °c, por tempo capaz de remover quase que a totalidade da matéria orgânica presente na cinza de casca de arroz (DA SILVA, 2007). Segundo Mehta e Monteiro (2006) quanto mais escura for a cinza da casca de arroz, maior o seu teor de carbono, ou seja, maior a quantidade de matéria orgânica não queimada.

Em alguns casos, devido ao baixo índice de atividade pozolânica de uma adição mineral ou a falta de água para sua hidratação, podem ocorrer situações onde estas adições não atuem como formadores de C-S-H e sim, somente como material de preenchimento dos vazios, o chamado efeito microfíler (DUART, 2008).

2.2 Durabilidade de estruturas em concreto

2.2.1 Introdução

A NBR 6118 (ABNT, 2007) define durabilidade como a capacidade da estrutura de resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início de elaboração do projeto. Para Isaia (2005) a durabilidade dos materiais está ligada à sua capacidade de conservar-se em determinado estado, para o qual foi projetada, com características similares, ao longo da vida útil de projeto.

A norma brasileira de projeto de estruturas de concreto NBR 6118 (ABNT, 2007), determina que uma edificação em concreto deve resistir aos intempéries ambientais. Para isso é necessário que o projetista defina de maneira adequada, à classe de agressividade ambiental a qual a estrutura estará exposta durante sua vida útil, o quadro 1 apresenta a classificação das estruturas quanto a classe de agressividade ambiental.

Quadro 1: Classificação das estruturas de concreto de acordo com sua classe de agressividade

| Classe de agressividade ambiental | Agressividade | Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto | Risco de deterioração da estrutura |
|-----------------------------------|---------------|--|------------------------------------|
| I | Fraca | Rural | Insignificante |
| | | Submersa | |
| II | Moderada | Urbana ^{1), 2)} | Pequeno |
| III | Forte | Marinha ¹⁾ | Grande |
| | | Industrial ^{1), 2)} | |
| IV | Muito forte | Industrial ^{1), 3)} | Elevado |
| | | Respingos de maré | |

¹⁾ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2007, p. 20)

A determinação da classe de agressividade serve de parâmetro para a determinação da espessura mínima de cobrimento para um elemento estrutural, sendo este o grande responsável pela proteção das barras de aço do interior da estrutura. Segundo Shi (2012), um acréscimo à espessura da camada de cobrimento do concreto, leva a efeitos benéficos, uma vez que aumenta a barreira para a entrada de agentes agressivos, entretanto, existem limites para esse acréscimo, devido a razões econômicas e mecânicas.

O desempenho de uma estrutura em termos de durabilidade é avaliado a partir de uma inspeção visual associada a ensaios de campo e de laboratório, com os dados obtidos, é possível estimar-se a vida útil de uma estrutura (ARAÚJO et al, 2010). De maneira geral, define-se que a durabilidade de uma estrutura de concreto é determinada por quatro fatores identificados como “regra dos 4 C”, são eles: composição do concreto, compactação, cura e cobrimento das armaduras (MEDEIROS, ANDRADE, HELENE, 2011).

De acordo com Cascudo e Helene (2001) tem crescido o número de estruturas de concreto armado com manifestações patológicas, principalmente com problemas de corrosão de armaduras, como resultado do envelhecimento precoce das construções existentes. Para Mehta e Monteiro (2006), a maioria dos problemas

patológicos das estruturas atuais, se deve, principalmente, pelo uso inadequado de novos materiais e sistemas construtivos.

2.2.2 Mecanismos de corrosão de armaduras

A corrosão de armaduras em estruturas de concreto constitui um dos maiores problemas na construção civil, no que diz respeito a patologias das construções. Atualmente é crescente e de certa forma relevante à mobilização de vários segmentos da engenharia civil no sentido de combater este fenômeno causador de prejuízos econômicos para a sociedade de uma forma geral (CASCUDO e HELENE, 2001).

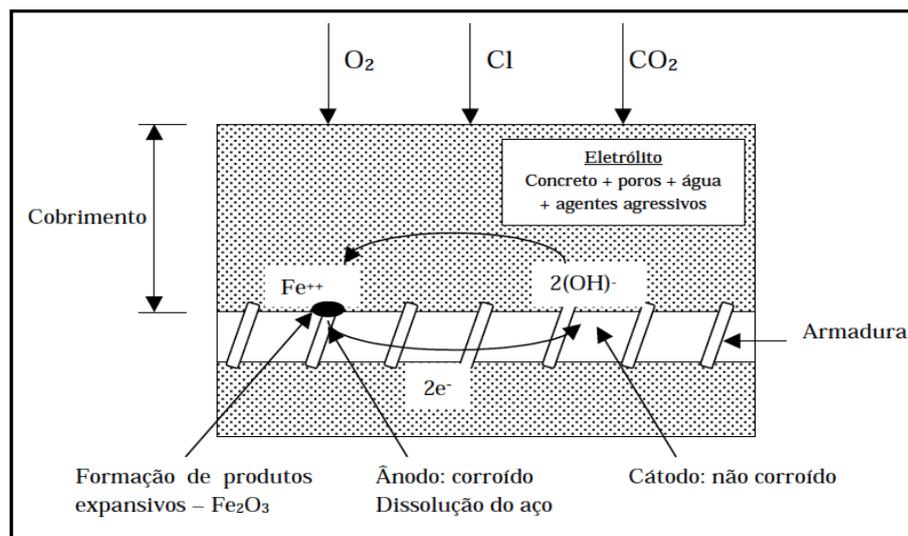
O concreto fornece ao aço uma dupla proteção. Primeiro uma proteção física isolando o aço do contato direto com o meio ambiente e seus agentes agressivos, e segundo, uma proteção química, devido ao pH alcalino do concreto, o qual promove uma película que protege as barras de aço do seu interior (VIEIRA, 2003).

O processo de corrosão das barras de aço do interior de uma estrutura de concreto envolve uma fase inicial, na qual, agentes agressivos alteram as condições do concreto que envolve a barra, denominada despassivação da armadura. Posteriormente é formada uma célula de corrosão, responsável pela propagação da corrosão da armadura (FIGUEIREDO e MEIRA, 2011).

Segundo Andrade (2001), existe duas formas básicas de corrosão: oxidação e corrosão eletroquímica. A natureza da oxidação é puramente química, caracterizada pela formação de um filme delgado de produtos de corrosão na superfície do metal.

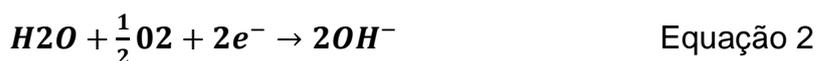
A corrosão eletroquímica é o tipo de corrosão observada em estruturas de concreto armado, a qual só ocorre quando existir um eletrólito, uma diferença de potencial e a presença de oxigênio (VIEIRA, 2003). Esse fenômeno eletroquímico tem natureza expansiva e pode levar ao aparecimento de elevadas tensões de tração no concreto, ocasionando a fissuração e posteriormente o deslocamento da camada de cobertura, causando perda de seção transversal da estrutura (ANDRADE, 2001). A Figura 1 apresenta o modelo de corrosão eletroquímica que ocorre em estruturas de concreto armado.

Figura 1: Modelo de corrosão



Fonte: Andrade (2001, p. 23)

O mecanismo da corrosão eletroquímica é caracterizado pela formação de uma célula de corrosão (VIEIRA, 2003). A equação 1 representa as reações de oxidação do metal (perda de massa), chamada zona anódica. Já a equação 2 representa as reações catódicas, caracterizada pelo consumo de elétrons produzidos na zona anódica.



Para que haja a formação da pilha de corrosão é necessária à existência de meios de transporte para que os íons e os elétrons originários desse processo se movimentem entre as áreas anódicas e as áreas catódicas. Normalmente os elétrons migram via contato direto metal-metal e os íons por dissolução e migração via solução (ANDRADE, 2001).

2.2.3 Penetração de íons cloretos em estruturas de concreto

Os cloretos são agentes iniciadores da corrosão das armaduras de estruturas de concreto. Os íons cloretos e o gás de carbono são considerados os agentes mais problemáticos no processo de corrosão de armaduras, tanto no início como na propagação da corrosão (FORMAGINI, 2005). Segundo Neville (1997), estes íons destroem a película passivadora, com a presença de água e oxigênio, ocorre a corrosão acarretando um aumento do volume de 8 a 10 vezes o volume original,

onde são criadas tensões no concreto, que fazem com que este se rompa por tração, apresentando fissuras que seguem as linhas das armaduras principais, e inclusive dos estribos, se a corrosão foi muito intensa.

De acordo com Da Silva (2012), o ingresso dos íons cloretos no concreto é influenciado por diversos fatores, tais como: Relação água/aglomerante, composição química do cimento e adições minerais, temperatura, cura, umidade relativa, agentes ambientais, fissuras, entre outros. Isaia (2005) afirma que, em concreto simples, a presença dos íons cloreto torna-se quase que irrelevante, a não ser pelo fato de que funciona como um aditivo acelerador de pega.

A contaminação por penetração de íons cloretos, normalmente ocorre em estruturas expostas a ambientes marinhos, pavimentos suscetíveis a agentes dessalinizadores e concretos em contato com solo podem ser afetados com maior intensidade. Os íons cloretos podem ser encontrados no interior de concretos das seguintes formas: quimicamente combinados, fisicamente adsorvidos na superfície dos poros capilares e livres na solução dos poros do concreto (FIGUEIREDO, 2011).

Não existe um consenso para a determinação do teor limite crítico de íons cloretos que podem estar presentes em estruturas de concreto armado, sem que ocorra a despassivação das armaduras. Na Tabela 1 são apresentados alguns valores limites, propostos por diferentes normas, os teores são expressos em porcentagem em relação a massa de cimento.

Tabela 1: Limite crítico de cloretos

| Norma | País | Ano | Teor de cloretos recomendado |
|-----------------|------------|------|--|
| NBR 6118 (ABNT) | Brasil | 2003 | Não se reporta ao teor de cloretos. |
| ACI 318-21 | USA | 2001 | $\leq 0,15\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente com cloretos. |
| | | | $\leq 0,30\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente normal. |
| | | | $\leq 1\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente seco. |
| | | | $\leq 0,06\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente com cloretos. |
| CEB | Europa | 1991 | $\leq 0,40\%$ em relação à massa de cimento. |
| ENV 2006 | Portugal | 1991 | |
| BS 8110:1 | Inglaterra | 1985 | |
| JCSE - SP2 | Japão | 1986 | $\leq 0,60 \text{ kg/m}^3$ de concreto. |

Fonte: Casanova (2013)

2.3 Ensaios para determinação da penetração de íons cloretos

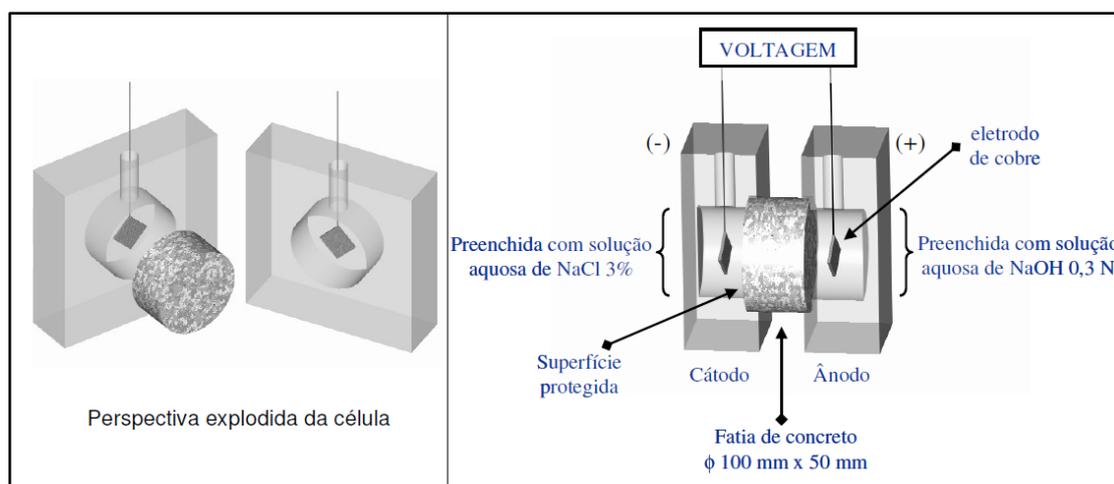
2.3.1 Ensaio acelerado de penetração de íons cloretos ASTM C 1202

O ensaio de penetração de cloretos, descrito pela C 1202 (ASTM, 2012), é utilizado para produzir uma informação qualitativa sobre a difusão de cloretos no concreto, evitando assim a necessidade da execução do ensaio de difusão, que demanda muito tempo para ser executado (MEDEIROS, 2008).

Este método de ensaio avalia a resistência à penetração de cloretos através de uma relação com a condutância elétrica em corpos de prova de concreto, sendo utilizado para a avaliação de materiais, dosagens e desempenho mecânico (MISSAU, 2004). O ensaio consiste em acoplar um corpo de prova cilíndrico, entre duas células de acrílico, denominadas células de migração, uma delas contendo uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,3N, outra com solução de 3% cloreto de sódio (NaCl) em massa, de acordo com a C 1202 (ASTM, 2012).

Entre as células é gerada uma diferença de potencial 60 V, corrente contínua, dando origem a uma corrente elétrica que induz o ânion cloreto a se difundir através do concreto sob a ação de um campo elétrico (FORMAGINI, 2005). A Figura 2 apresenta detalhadamente as células de migração e seu funcionamento.

Figura 2: Células de migração



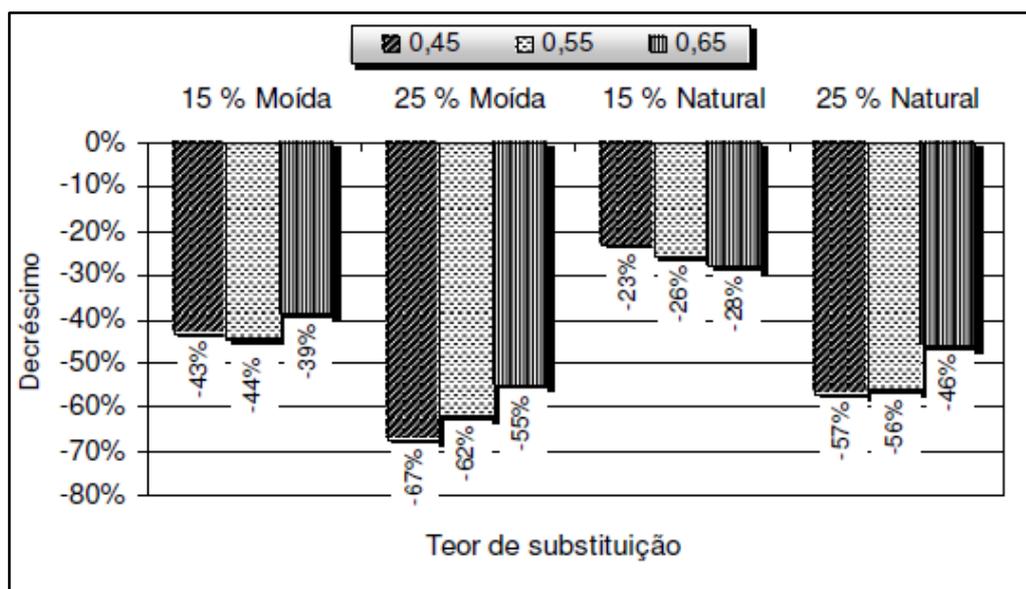
Fonte: Medeiros (2008, p. 71)

O produto da corrente versus o tempo, expresso em Coulomb, indica a carga total que atravessa o corpo de prova e revela uma maior ou menor resistência do concreto a penetração dos íons cloreto. O ensaio é realizado em um intervalo de tempo de seis horas, sendo que, as medições da corrente passante devem ser efetuadas a cada trinta minutos, por meio de um amperímetro (FORMAGINI, 2005).

Segundo Figueredo (2011) a principal crítica ao ensaio diz respeito à alta tensão aplicada (60 Volts), porém a simplicidade de montagem e a fácil execução permite uma boa avaliação qualitativa do concreto e da influência de adições minerais em substituição parcial do cimento Portland.

Pedrozo (2008) estudou a influência da substituição de cimento Portland composto por fíler calcário (CPII - F) por cinza da casca do arroz, natural e moída, em teores de 15% e 25%. No Gráfico 1 são apresentadas comparações entre as misturas compostas com cinza de casca de arroz e a mistura que possui apenas cimento Portland com relação ao decréscimo na carga passante. O autor concluiu que a cinza da casca de arroz influenciou positivamente na penetração de íons cloretos e afirma que o acréscimo do teor de substituição de cinza da casca de arroz acarreta uma redução da penetração de íons cloretos.

Gráfico 1:Decréscimo da carga passante versus misturas



Fonte: Pedrozo (2008)

Dando continuidade ao estudo proposto por Pedrozo (2008), Casanova (2013) avaliou o influência de idades avançadas na penetração de íons cloretos pelo ensaio ensaio acelerado de penetração de íons cloretos. Embasado na Tabela 2 Casanova (2013) demonstra que com exceção da mistura que contém apenas cimento Portland todas as misturas obtiveram resultados melhores na classificação qualitativa de penetração de íons cloretos em idades avançadas, o autor afirma que isso ocorreu devido ao aumento dos compostos hidratados e a ação pozolânica.

Tabela 2: Penetração de íons cloretos por ensaio acelerado em idades avançadas

| Mistura | a/ag | Penetrabilidade aos íons cloretos | |
|---------|------|-----------------------------------|-----------------------------|
| | | Pedrozo (2008) 91 Dias | Casanova (2013) 540 Dias |
| R | 0,45 | Moderada | Moderada |
| | 0,55 | Moderada | Moderada |
| | 0,65 | Moderada | Moderada |
| 15M | 0,45 | Baixa | Muito Baixa |
| | 0,55 | Baixa | Muito Baixa |
| | 0,65 | Moderada | Muito Baixa |
| 25M | 0,45 | Muito Baixa | Muito Baixa |
| | 0,55 | Baixa | Muito Baixa |
| | 0,65 | Baixa | Muito Baixa |
| 15N | 0,45 | Moderada | Baixa |
| | 0,55 | Moderada | Baixa |
| | 0,65 | Moderada | Baixa |
| 25N | 0,45 | Baixa | Muito Baixa |
| | 0,55 | Baixa | Muito Baixa |
| | 0,65 | Moderada | Baixa |

Fonte: Adaptado de Casanova (2013, p.133)

2.3.2 Ensaio de penetração de íons cloretos por imersão-EPCI

O ensaio de penetração de cloretos por imersão é baseado na T 259 (AASHTO, 2006), onde as amostras são submetidas a determinados tempos de cura, posteriormente são imersas em solução salina, em condições semelhantes as encontradas no mar, com intuito de simular a profundidade da ação dos íons cloretos à concretos expostos a ambientes agressivos.

Saciloto (2005) investigou o comportamento de concretos com adições minerais de cinza volante, cinza de casca de arroz e escória de alto-forno, frente à penetração de íons cloretos, por meio de ensaio acelerado. Confrontou os resultados obtidos, com os do ensaio de imersão e chegou à conclusão que o ensaio acelerado de penetração de íons cloretos fornece resultados irreais, quando analisados concretos com diferentes tipos de aglomerantes. Isto ficou comprovado, pois misturas que apresentaram um mesmo coeficiente de difusão, no ensaio de imersão, foram classificadas em classes distintas pelo método do ensaio acelerado, pela ASTM C 1202.

Trindade (2011) estudou a influência da relação água aglomerante na penetração de íons cloretos pelo ensaio de imersão em solução salina. A Tabela 3 mostra os resultados obtidos pelo autor em uma mistura com substituição de 15% do cimento Portland do tipo CP II-Z, por cinza da casca de arroz. Nesta mistura também foi adicionado 12,75% de cinza volante, em massa, em relação ao cimento. Fica

demonstrado que o acréscimo da relação A/ag provoca um aumento da profundidade média da penetração de íons cloretos.

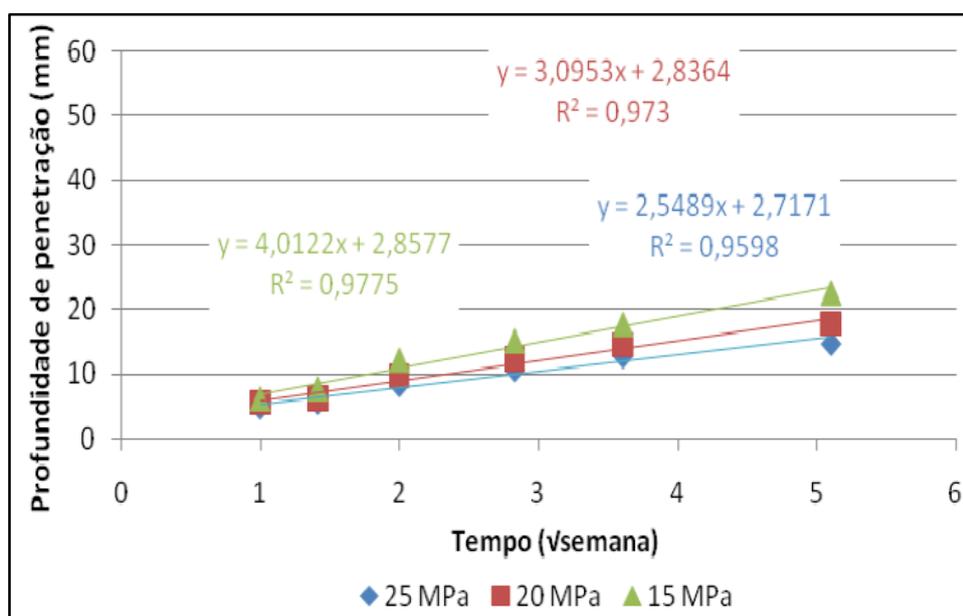
Tabela 3: Influência da relação A/ag. na penetração de cloretos.

| Tempo de imersão (dias) | Profundidade média de penetração (mm) | | |
|----------------------------|---------------------------------------|-----------|-----------|
| | a/ag 0,45 | a/ag 0,55 | a/ag 0,65 |
| 7 | 9,49 | 14,43 | 16,31 |
| 14 | 11,31 | 17,32 | 20,13 |
| 28 | 13,64 | 18,93 | 24,23 |
| 56 | 16,2 | 23,41 | 25,56 |
| 91 | 16,3 | 22,11 | 25,68 |

Fonte: Trindade (2011, p.162)

Crauss (2010) em seu trabalho pesquisou influência de diferentes níveis de resistência à compressão axial na penetração de íons cloretos por imersão em solução salina. No Gráfico 2 são apresentados três níveis de resistência a compressão axial, onde pode-se perceber uma forte correlação do aumento da penetração de íons cloretos, com o decorrer do tempo, R^2 médio igual a 0,97, também pode ser observado que quanto maior a resistência a compressão axial, menor é a profundidade média da penetração de íons cloretos.

Gráfico 2: Profundidade da penetração de cloretos



Fonte: Adaptado de Crauss (2010, p. 75)

Nesta pesquisa, foram adotados para a avaliação da penetração de íons cloretos, os ensaios de acordo com a norma C 1202 (ASTM, 2012) e ensaios de penetração de cloretos por imersão, preconizado pela T 259 (AASHTO, 2006), para que pudessem ser analisada em idades compatíveis foram adotadas idades de ensaio de 56 e 91 dias. No capítulo 3 são descritos detalhadamente os procedimentos que foram realizados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.1 Introdução

Com a finalidade de atingir os objetivos propostos nesta pesquisa, foi analisado o comportamento de concretos com adição de sílica da casca do arroz frente à ação de íons cloretos. Abaixo são descritas as variáveis analisadas.

Teores de adição de sílica da casca do arroz:

- Referência (0%), 3%; 5% e 10% de substituição parcial de cimento Portland por sílica da casca de arroz.

Idades estudadas:

- 28, 56 e 91 dias – Resistência à compressão axial;
- 56 e 91 – Ensaio acelerado de penetração de íons cloreto;
- 56 e 91 – Ensaio de penetração de íons cloretos por imersão;

3.2 Materiais

3.2.1 Agregados

O agregado gráudo que foi utilizado neste trabalho é de origem basáltica e é comercializado no município de Alegrete-RS. O agregado miúdo foi obtido no leito do rio Ibicuí no município de Manoel Viana-RS. A Tabela 4 apresenta algumas características físicas do agregados utilizados, e o gráfico 3 mostra a composição granulométrica. Foram realizados os seguintes ensaios para a caracterização dos agregados.

- Determinação de massa específica, do agregado miúdo, conforme a NBR NM 52 (ABNT, 2009);
- Determinação de massa específica, do agregado gráudo, conforme a NBR NM 53 (ABNT, 2009);
- Determinação da composição granulométrica, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003);

Tabela 4: Caracterização dos agregados

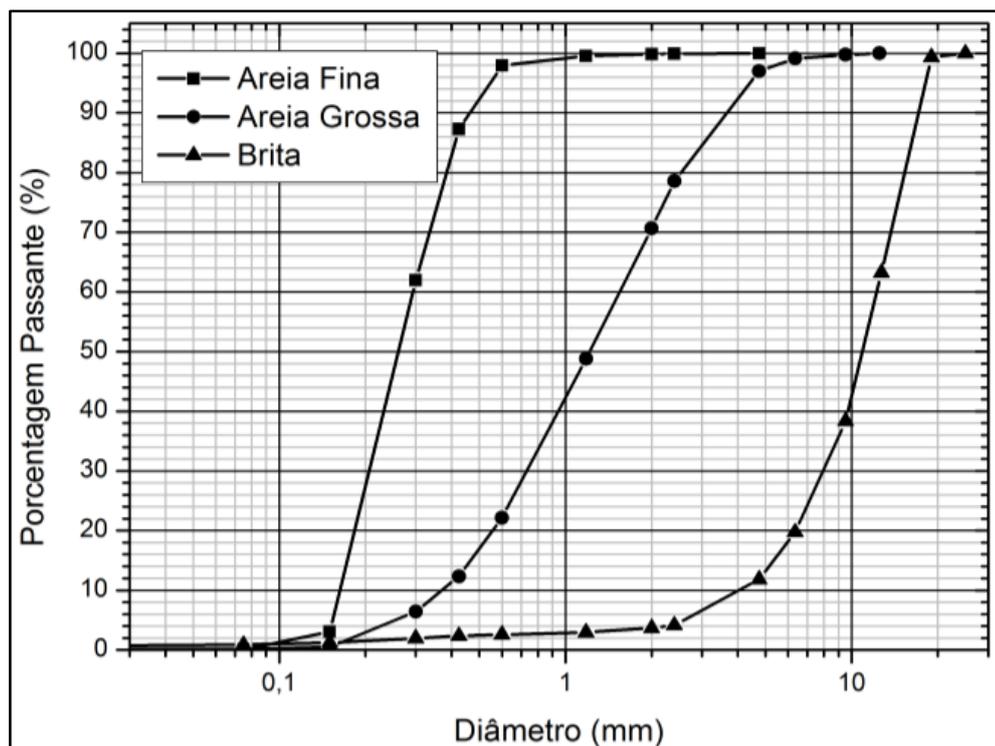
| Ensaio | Areia Fina | Areia Grossa | Brita |
|--|------------|--------------|-------|
| Módulo de Finura | 1,37 | 3,47 | 6,38 |
| Dimensão Máxima Característica (mm) | 0,6 | 4,75 | 19 |
| Massa Específica (kg/dm ³) | 2,63 | 2,62 | 2,89 |

Fonte: Elaboração própria

Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005) o agregado miúdo é classificado na Zona ótima para utilização quando apresentar módulo de finura entre 2,20 e 2,90. Pode-se observar que os agregados miúdos utilizados neste trabalho encontram-se fora desta faixa, a areia fina encontra-se abaixo da Zona utilizável inferior que é de 1,55 a 2,20, já a areia grossa ficou classificada na Zona utilizável superior que é entre 2,9 a 3,5. A norma NBR 7211 (ABNT, 2005) classifica os agregados como leves quando sua massa específica absoluta é inferior à 2000 Kg/m³ e pesados quando a sua massa específica for superior à 3000 Kg/m³, neste trabalho todos agregados utilizados estão entre esses limites e são classificados como normais.

As curvas granulométricas dos agregados são apresentadas no gráfico 3, pode-se observar que apenas a areia grossa possui distribuição granulométrica contínua e bem graduada, contendo porção granulares em diferentes faixas granulométricas. A areia fina e a brita possuem característica granulométrica uniforme contendo deficiência granular em algumas peneiras, isso pode ser observado pela inclinação da curva granulométrica.

Gráfico 3 :Composição granulométrica dos agregados



Fonte: Elaboração própria

3.2.2 Cimento Portland

O Cimento Portland utilizado é do tipo CII Z-32 de fabricação da Supremo Cimentos. Esse tipo de cimento foi utilizado, uma vez que é o tipo de cimento Portland brasileiro comercializado na região do pampa e da campanha. O cimento apresenta as seguintes características físicas que são apresentadas na Tabela 5 e químicas conforme a tabela 6.

Tabela 5: Características químicas do CP II-Z

| Ensaio Químico | Norma | Unidade | Média | Máximo | Mínimo | Especificação Da Norma |
|--------------------|----------|---------|-------|--------|--------|------------------------|
| Perda ao Fogo | NM 18-04 | % | 5,34 | 5,87 | 3,85 | < ou = 6,5 |
| Óxido de Magnésio | NM 14-04 | % | 5,87 | 6,05 | 5,65 | < ou = 6,5 |
| Anidrido Sulfúrico | NM 16-04 | % | 2,7 | 3,26 | 2,22 | < ou = 4 |
| Anidrido Carbônico | NM 20-04 | % | 4,37 | 5 | 2,92 | < ou = 5 |
| Resíduo Insolúvel | NM 22-05 | % | 12,8 | 14,55 | 11,24 | < ou = 16 |

Fonte – Marton et al (2012)

Tabela 6: Características físicas do cimento CP II-Z

| Ensaio Físicos | Norma | Unidade | Média | Máximo | Mínimo | Especificação Da Norma |
|--------------------------------------|----------|--------------------|-------|--------|--------|------------------------|
| Área Específica | NM 76-98 | m ² /Kg | 374 | 396 | 347 | > ou = 260 |
| Massa Específica | NM 23-01 | g/cm ³ | 2,96 | - | - | Não Aplicável |
| Finura (#200) | 11579-91 | % | 3,1 | 4,2 | 2,3 | < ou = 12 |
| Finura (#325) | 12826-93 | % | 11,3 | 14,4 | 8,6 | Não Aplicável |
| Água da Pasta de Consistência Normal | NM 43-02 | % | 26,8 | 27,1 | 26,2 | Não Aplicável |
| Início de Pega | NM 65-03 | Minutos | 249 | 270 | 230 | > ou = 60 minutos |
| Fim de Pega | NM 65-03 | Minutos | 330 | 355 | 305 | < ou = 480 minutos |
| Expansibilidade de Le Chatelier | 11582-91 | Minutos | 0,55 | 1 | 0 | < ou = 5 |

Fonte – Marton et al (2012)

Pode-se verificar nas tabelas 5 e 6 que o cimento Portland CP II Z-32, utilizados neste trabalho, atende todas especificações prescritas pela ABNT, tanto no que diz respeito aos parâmetros físicos quanto químicos.

3.2.3 Sílica da casca de arroz

A sílica que foi utilizada neste trabalho é da marca SILCCA NOBRE, comercializada do município de Alegrete-RS pela empresa Pilecco Nobre Alimentos LTDA. Esta sílica é obtida através de um processo de controle de combustão por meio de leito fluidizado. Esse processo melhora a eficiência da queima, resultando em uma sílica mais amorfa. No trabalho de Marangon et al (2013) foi avaliado o índice de atividade pozolânica da sílica da casca de arroz, a mesma utilizada neste trabalho, o autor concluiu que a sílica da casca do arroz possui índice de atividade pozolânica igual a 101,7% superior aos 75%, índice mínimo previsto na NBR 12653 (ABNT, 2012) para ser considerada material pozolânico.

Na Tabela 7 pode ser observado os resultados do índice de atividade pozolânica da sílica da casca de arroz e cimento com utilização de superplastificante, mistura C2, a mistura B2 composta por sílica de casca de arroz e cimento não contém superplastificante. A mistura A2 é composta apenas por cimento.

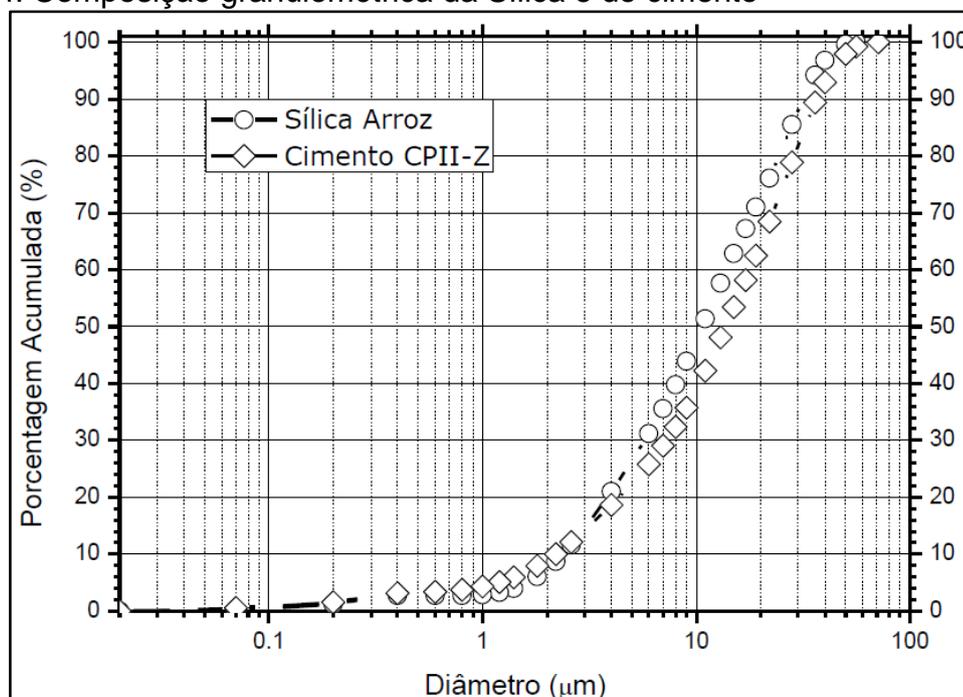
Tabela 7: Índice de atividade pozolânica da sílica da casca de arroz

| Misturas | Resistência à Compressão | | | Módulo de Elasticidade | | | IAP com cimento (%) | IAP com Cimento e SP (%) |
|----------|--------------------------|----------|--------|------------------------|----------|--------|---------------------|--------------------------|
| | Fc (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | E (GPa) | DP (MPa) | CV (%) | | |
| A2 | 35,32 | 1,58 | 5,35 | 45,7 | 3,93 | 8,09 | - | - |
| B2 | 19,48 | 1,84 | 11,34 | - | - | - | 55,15 | - |
| C2 | 35,92 | 1,8 | 6,03 | 46,26 | 2,82 | 6,1 | - | 101,70 |

Fonte: Adaptado de Marangon et al (2013).

No gráfico 4 é apresentada a análise granulométrica a laser da sílica da casca de arroz e do cimento CP II Z-32, utilizando o aparelho CILAS 1190, disponível no campus de Bagé-RS da UNIPAMPA.

Gráfico 4: Composição granulométrica da Sílica e do cimento



Fonte: Elaboração própria.

Podemos observar que o cimento e a sílica da casca do arroz possuem granulometrias muito similares. Esse comportamento viabiliza a substituição parcial do cimento Portland por sílica da casca do arroz sem que ocorram perdas significativas da compactidade da mistura, porém, o ideal seria que as composições granulométricas fossem diferentes. Assim, teríamos uma contribuição maior do efeito físico desses materiais.

3.2.4 Aditivo

O aditivo utilizado neste trabalho é do tipo redutor de Água – Polifuncional, que possui massa específica igual à 1,18 g/cm³. Pode reduzir o consumo de água em até 15%, é fabricado pela empresa GRACE com o nome comercial de MIRA 34.

3.3 Métodos experimentais

3.3.1 Método de dosagem

A dosagem dos concretos foi realizada segundo o método IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1993). O cimento foi substituído, parcialmente, em volume por sílica de casca de arroz. As porcentagens da substituição foram definidas de acordo com as porcentagens utilizadas por concreteiras da região onde é comercializada a sílica de casca de arroz utilizada neste estudo. Na Tabela 8 são apresentados os valores de consumo de material para a dosagem de 1m³ de concreto para as diferentes misturas estudadas neste trabalho.

Tabela 8: Consumo de materiais em kg para 1m³

| MISTURAS | Cimento | Areia Fina | Areia Grossa | Brita | Sílica | Água |
|----------|---------|------------|--------------|---------|--------|--------|
| REF. | 359,28 | 493,85 | 404,6 | 1070,95 | | 179,64 |
| 3% | 348,5 | 493,85 | 404,6 | 1070,95 | 7,47 | 179,64 |
| 5% | 341,32 | 493,85 | 404,6 | 1070,95 | 12,44 | 179,64 |
| 10% | 323,35 | 493,85 | 404,6 | 1070,95 | 24,89 | 179,64 |

Fonte: Elaboração própria.

3.3.2 Ensaio de resistência à compressão axial

Para o estudo do comportamento mecânico dos concretos estudados foram moldados e curados em conformidade com a NBR 5738 (ABNT, 2003), 60 corpos-de-prova de 100x200mm, que foram submetidos ao ensaio resistência à compressão axial de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007). Todas as amostras estudadas foram capeadas com argamassa para regularização da superfície dos corpos-de-prova. Cada mistura contou com cinco amostras representativas, por ensaio, nas idades de 28, 56 e 91 dias. A Figura 3 mostra o ensaio de resistência à compressão axial em andamento na prensa EMIC com capacidade de aplicar 150 toneladas.

Figura 3: Ensaio de resistência à compressão axial

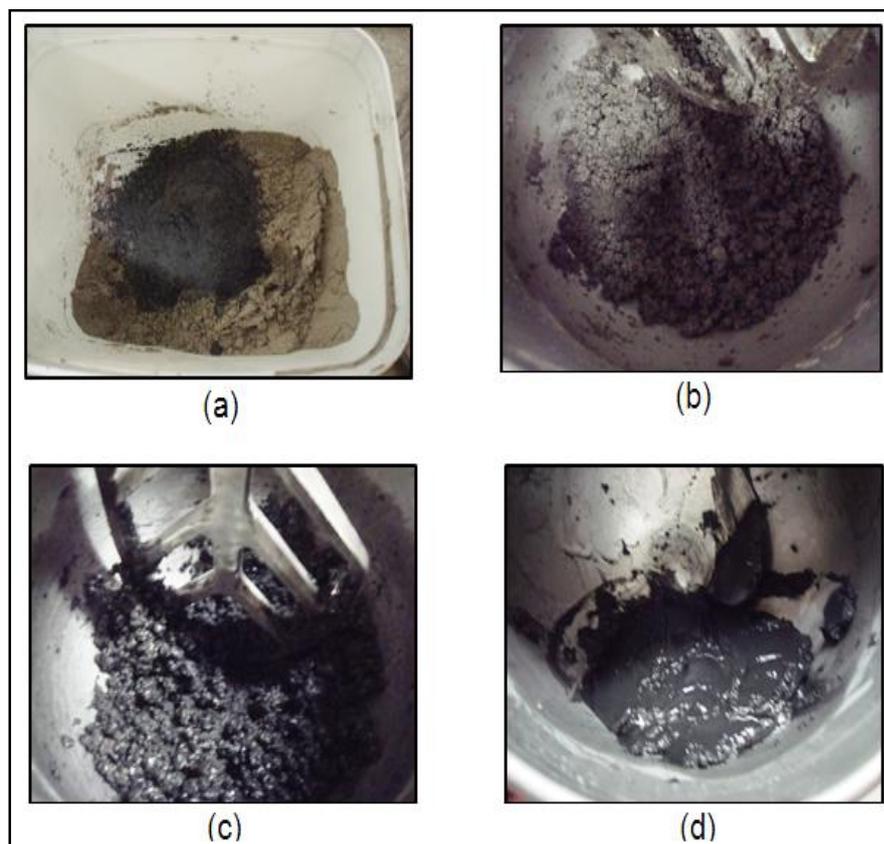


Fonte: Elaboração própria.

3.3.3 Determinação da compacidade de materiais compostos por partículas com dimensões inferiores a 100 μm

Para a determinação da compacidade dos materiais foi utilizado o método de demanda d'água com a finalidade de determinar o máximo empacotamento das partículas da mistura de cimento CP II-Z e sílica da casca de arroz. O ensaio experimental consistiu inicialmente na análise da demanda de água no cimento CP II-Z, seguida pela substituição gradativa, em massa, do aglomerante pela sílica da casca de arroz. O ensaio de demanda consiste em adicionar água aos materiais com dimensões inferiores a 100 μm até o ponto em que estes materiais formem uma mistura homogênea. A massa de água necessária para fazer a mistura passar do estado seco a uma pasta homogênea, definida como demanda d'água do material, essa quantidade de água equivale à quantidade necessária para preencher os vazios da mistura granular (Formagini, 2005). A Figura 4 mostra as quatro fases da compacidade dos materiais compostos por partículas finas com dimensões inferiores a 100 μm .

Figura 4: Compacidade do cimento com adição de sílica



Fonte: Elaboração própria.

A primeira fase do empacotamento corresponde ao material no estado seco, mostrado na figura 4(a). Adicionando água a mistura inicia-se o estado denominado pendular, mostrado na figura 4(b), neste estado, a água se condensa entre os contatos dos grãos formando pequenas pontes líquidas. Essa fase perdura até o instante em que as superfícies de todos os grãos são molhadas por completo pela água, que é marcada pela presença de bolhas de ar no interior da mistura. Esta fase é denominada funicular, mostrado na figura 4(c). O incremento na quantidade de água é utilizado para gerar o afastamento desejado entre as partículas. Acredita-se que o ponto caracterizado como demanda de água do material encontra-se no início do estado capilar, mostrado na figura 4(d). Estas fases do empacotamento das partículas são descritas por Sobral (1990, apud Formagini, 2005).

3.3.4 Ensaio acelerado de penetração de íons cloretos

O ensaio consiste em acoplar um corpo de prova cilíndrico, de 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura, entre duas células de acrílico, uma delas contendo uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,3N, outra com solução de 3% cloreto

de sódio (NaCl), aplica-se uma diferença de potencial de 60V e são realizadas leituras da corrente passante a cada trinta minutos em um intervalo de seis horas, então, é obtida a carga passante pela equação 3. Posteriormente as amostras são classificadas, qualitativamente, conforme a Tabela 9.

$$Q = 900(I_0 + 2 I_{60} + \dots + 2 I_{330} + I_{360}) \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

Q= Carga total passante, em Coulomb.

I₀= Corrente logo após a aplicação da diferença de potencial, em Ampères.

I_t= Corrente em “t” minutos depois da aplicação da diferença de potencial, em Ampères.

Tabela 9: Classificação da penetração de íons cloretos com base na carga passante

| Carga Total Passante (C) | Penetração De Íons Cloretos |
|--------------------------|-----------------------------|
| >4000 | Alta |
| 2000-4000 | Moderada |
| 1000-2000 | Baixa |
| 100-1000 | Muito Baixa |
| <100 | Desprezível |

Fonte: C 1202 (ASTM, 2012, p.8)

Usualmente é retirada apenas uma fatia do meio de cada corpo de prova moldado, no caso de corpo-de-prova 100x200mm são eliminados 75% da amostra, porém, Medeiros (2012) comprovou em seu trabalho que não existe influência significativa nos resultados de penetração de cloretos em ensaios retirando mais de uma fatia da porção central de um único corpo-de-prova de 100x200mm. Neste trabalho optou-se pela retirada de duas fatias centrais de cada corpo-de-prova.

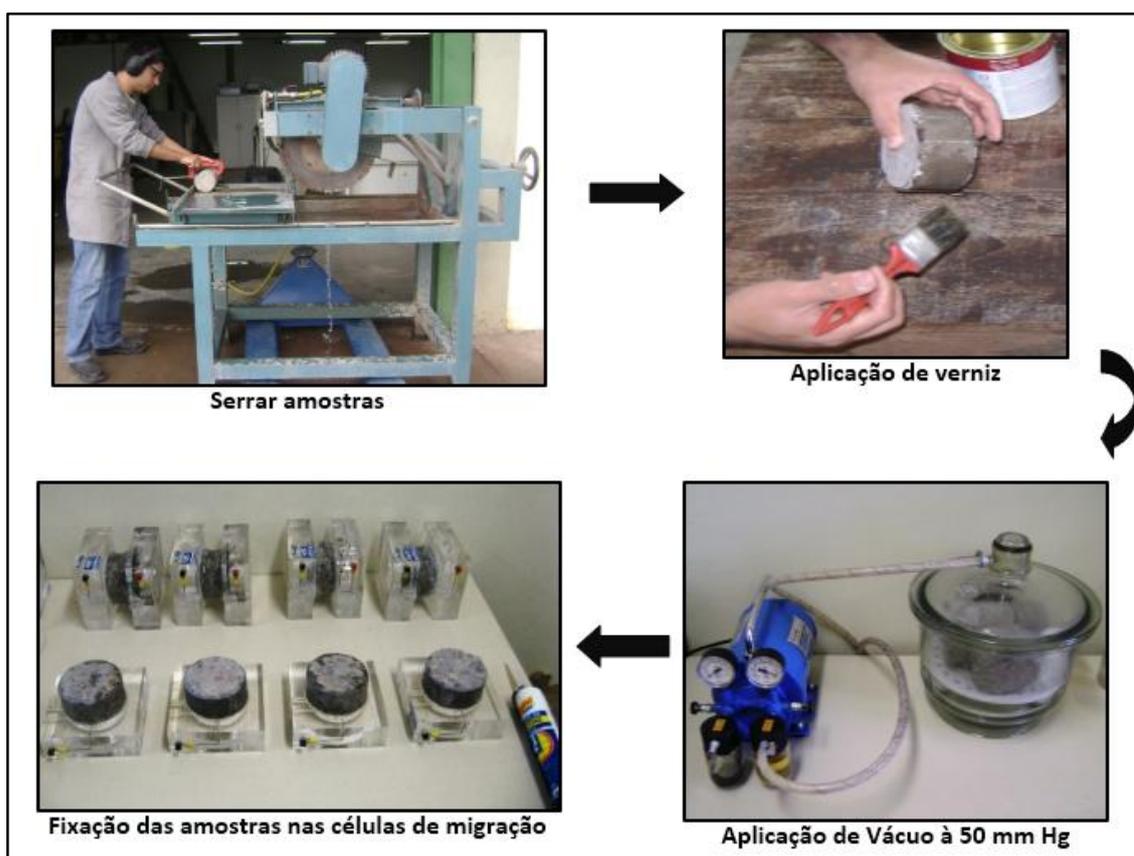
Para a determinação da penetração de cloretos por meio do ensaio acelerado, foram moldados 16 corpos de prova com dimensões de 100x200mm, divididos em 4 por mistura, 2 para ensaio aos 56 dias de idade e 2 aos 91. Após 55 dias de cura por imersão em água, do centro de cada amostra foram extraídas 2 fatias de 50x100mm, totalizando 4 fatias por mistura. Para realização do ensaio acelerado, todos os procedimentos foram repetidos aos 90 dias.

Ao completarem 55 e 90 dias de cura imersa em água, todas as amostras foram submetidas ao pré-condicionamento prescrito na C 1202 (ASTM, 2012), que consiste em:

- Aplicação e secagem de uma camada de verniz poliuretânico na face curva do corpo de prova;
- Aplicação de vácuo, por 3 horas, a uma pressão de 50 mm Hg;
- Aplicação de vácuo submerso em água deionizada, por 1 hora, a uma pressão de 50 mm Hg;
- Imersão em água deionizada por um período de 18 ± 2 horas.

A figura 5 mostra as etapas de preparo e do pré-condicionamento das amostras que foram utilizadas no ensaio acelerado de penetração de íons cloretos desta pesquisa, no laboratório de materiais de construção civil da Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA.

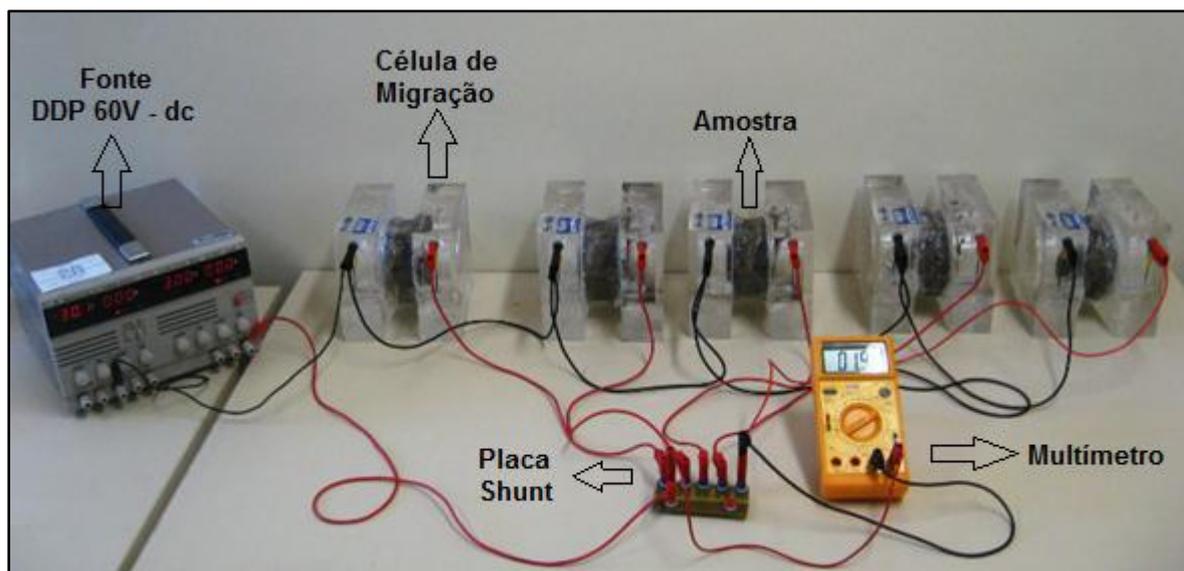
Figura 5: Etapas de preparo e pré-condicionamento



Fonte: Elaboração própria

A Figura 6 mostra uma imagem do ensaio acelerado de penetração de íons cloretos em andamento, para obtenção da carga passante.

Figura 6: Ensaio acelerado de penetração de íons cloretos



Fonte: Elaboração própria

Após o ensaio acelerado todas as amostras foram rompidas por compressão diametral. Então foi aspergido nitrato de prata, que ao entrar em contato com a região que possui cloretos livres adquire coloração clara. A Figura 7 mostra a reação do nitrato de prata com a região atacada por cloretos, tornando possível a medida da profundidade da penetração de íons cloretos, por meio de fotografias digitais e o auxílio do software AutoCAD.

Figura 7: Profundidade da penetração de íons cloretos após ensaio acelerado



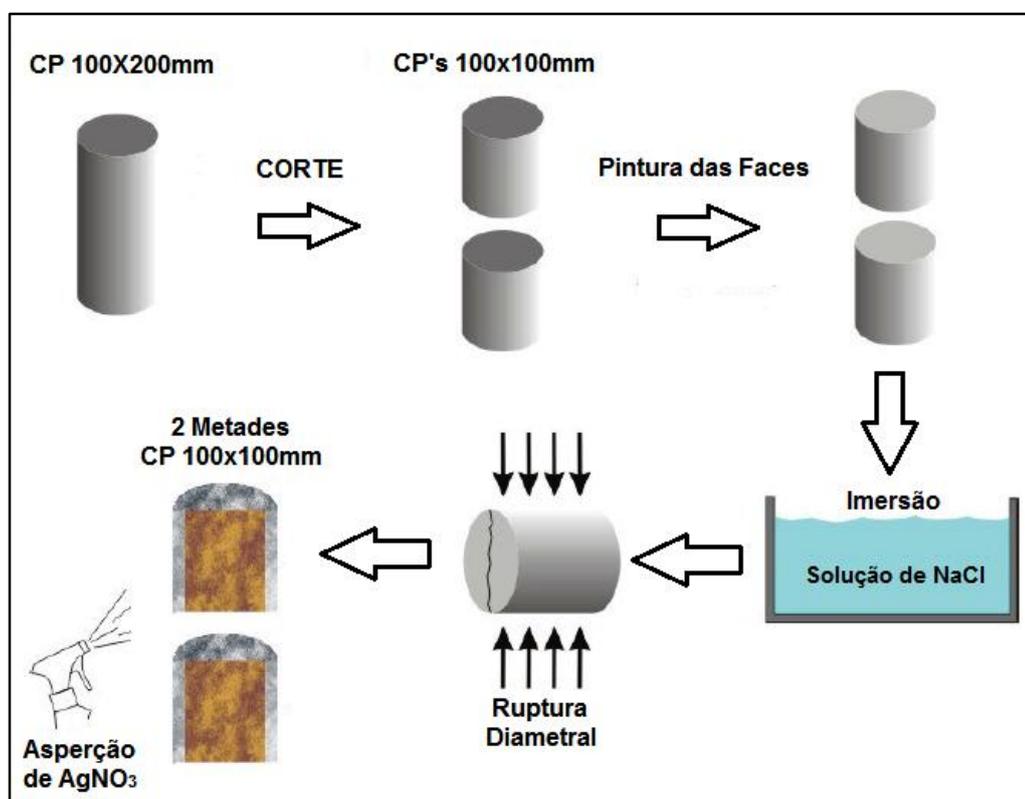
Fonte: Elaboração própria

3.3.5 Ensaio de penetração de íons cloretos por imersão - EPCI

Este ensaio consiste em moldar corpos-de-prova de 100x200mm, que são serrados, com serra diamantada, obtendo-se amostras de 100x100mm. Estas amostras têm suas faces retas impermeabilizadas com verniz poliuretânico. Posteriormente são submersas completamente em solução salina, em condições semelhantes a encontradas no mar. Ao serem retiradas do período de imersão, as amostras foram lavadas em água corrente e rompidas por compressão diametral.

Nestas fatias foi aspergida uma solução de nitrato de prata (AgNO_3). E este procedimento faz com que sejam geradas duas regiões de coloração bem definidas na amostra, uma de coloração marrom e outra esbranquiçada. A região marrom corresponde à região livre da ação de cloretos, já a região esbranquiçada representa a região que contém cloretos. Essa diferença colorimétrica possibilita a verificação da profundidade da penetração dos íons cloretos por meio de imagens digitais e o auxílio do software AutoCAD. A Figura 8 mostra esquematicamente o funcionamento do ensaio de penetração de íons cloretos por imersão em solução salina.

Figura 8: Procedimentos para ensaio de íons cloretos por imersão



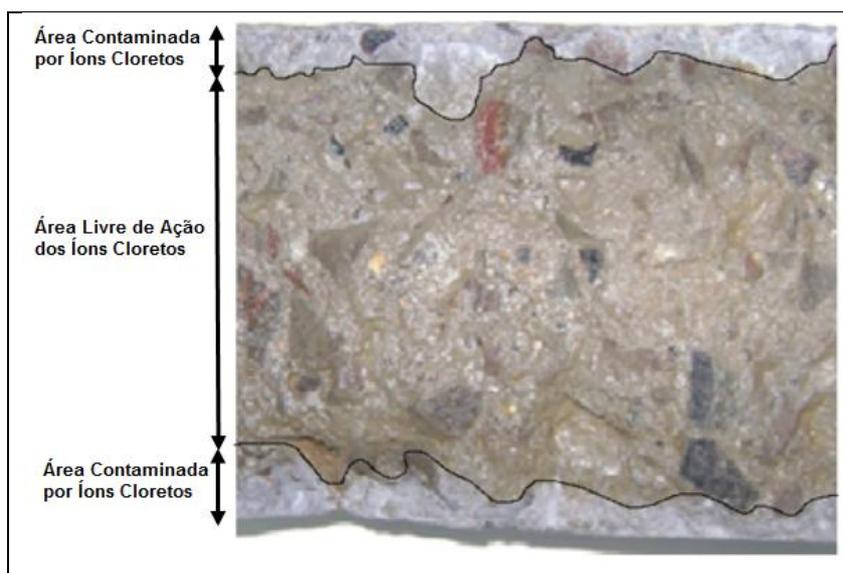
Fonte: SACILOTO (2005, p.96)

Para verificação da profundidade média da penetração de íons cloretos, foi realizada a moldagem de 4 corpos-de-prova de 100x200mm, para cada uma das

quatro misturas, totalizando 16 corpos-de-prova de 100x200mm. Após 24 horas da moldagem, os corpos-de-prova foram desmoldados e submetidos a cura por imersão em água por 28 dias. Posterior ao período de cura (28 dias) todos corpos-de-prova foram serrados ao meio, gerando 32 duas amostras 100x100mm que tiveram suas faces retas impermeabilizadas com verniz porliuretânico antes da imersão em solução salina. Foram utilizadas 4 amostras por mistura para ensaio aos 28 dias de imersão em solução salina (56 dias de idade). O processo foi repetido após as amostras completarem 56 dias imersos em solução salina (91 dias de idade). Os procedimentos dos ensaios foram de acordo com a norma T 259 (AASHTO, 2006).

Na figura 9 podemos observar o resultado da reação do nitrato de prata com a região contaminada por cloretos, após o período de imersão em tanque com solução de 31,94 g de NaCl por litro de água deionizada.

Figura 9: Ação de íons cloretos por imersão em solução



Fonte: Elaboração própria

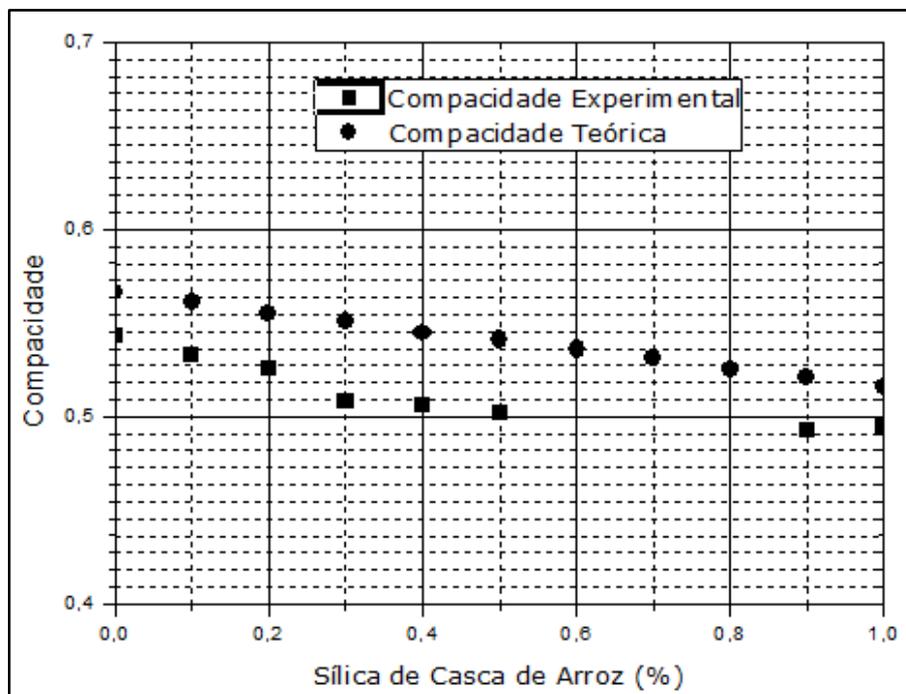
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Determinação da compactidade dos materiais

Na análise dos resultados foi utilizado o programa desenvolvido pela UFRJ denominado MEC_COPPE, para a determinação da compactidade teórica dos materiais. Foi possível confrontar os resultados obtidos pelo MEC_COPPE com os obtidos experimentalmente. O gráfico 5 denota a coerência entre a análise experimental e a teórica, também ficou demonstrado que a compactidade do cimento CP II-Z é maior que a compactidade da sílica de casca de arroz e da mistura desses

materiais, ou seja, a medida que aumenta a porcentagem de sílica, reduz a compacidade da mistura. Os percentuais de 60, 70 e 80% da adição mineral foram desprezados devido à notória tendência apresentada durante o ensaio experimental.

Gráfico 5: Compacidade experimental e teórica

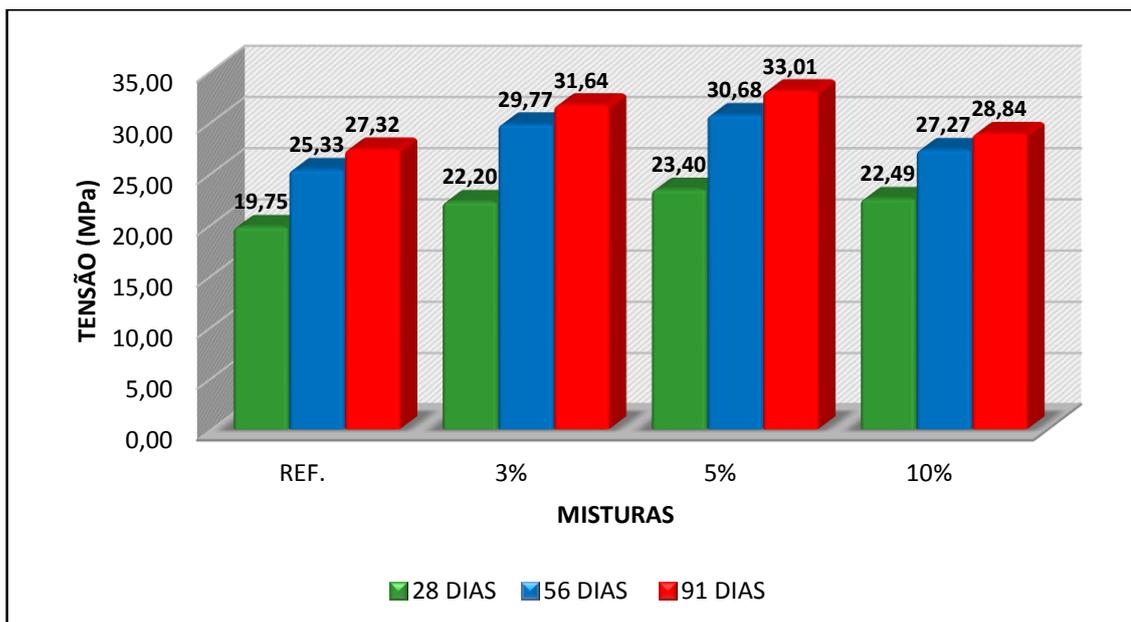


Fonte: Elaboração própria

4.2 Ensaio de resistência à compressão axial

Os valores de resistência foram obtidos por meio de média aritmética de 5 corpos de prova, sendo que, foram desprezados valores com coeficiente de variação superior à 10%. O gráfico 6 apresenta os valores de resistência à compressão de todas as misturas e idades propostas neste trabalho. A tabela abaixo mostra todos os resultados encontrados nos ensaios de compressão axial.

Gráfico 6: Resistência à compressão axial



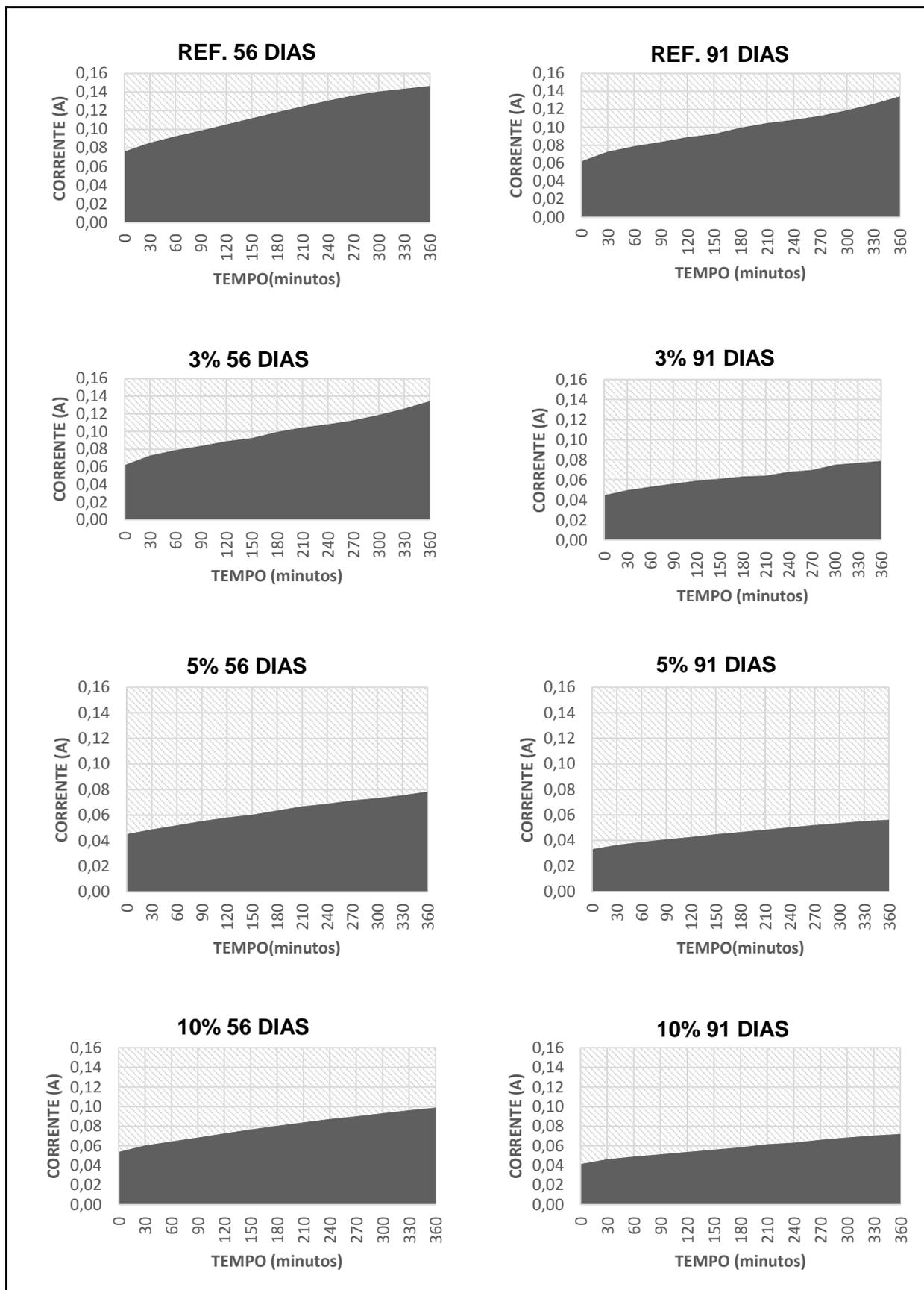
Fonte: Elaboração Própria

Pode ser observado no gráfico 6 um ganho de resistência à compressão aos 56 dias em todas as misturas. Pode-se verificar também que as misturas que possuem substituição parcial do cimento por sílica de casca de arroz obtiveram um acréscimo de resistência ao concreto em todas as idades. A mistura contendo 5% de sílica de casca do arroz foi a que apresentou maior resistência à compressão, em todas as idades analisadas.

4.3 Ensaio acelerado de penetração de íons cloretos

Na Figura 10 é possível visualizar os gráficos de corrente passante ao longo do tempo, obtidos através dos ensaios acelerados de penetração de íons cloretos. Segundo Marcondes (2012) a área do gráfico é numericamente igual ao valor da carga passante, sendo que, a carga passante é diretamente proporcional a facilidade com que ocorre a penetração de íons cloretos.

Figura 10: Curvas de corrente passante ao longo do tempo para diferentes misturas e idades de ensaio

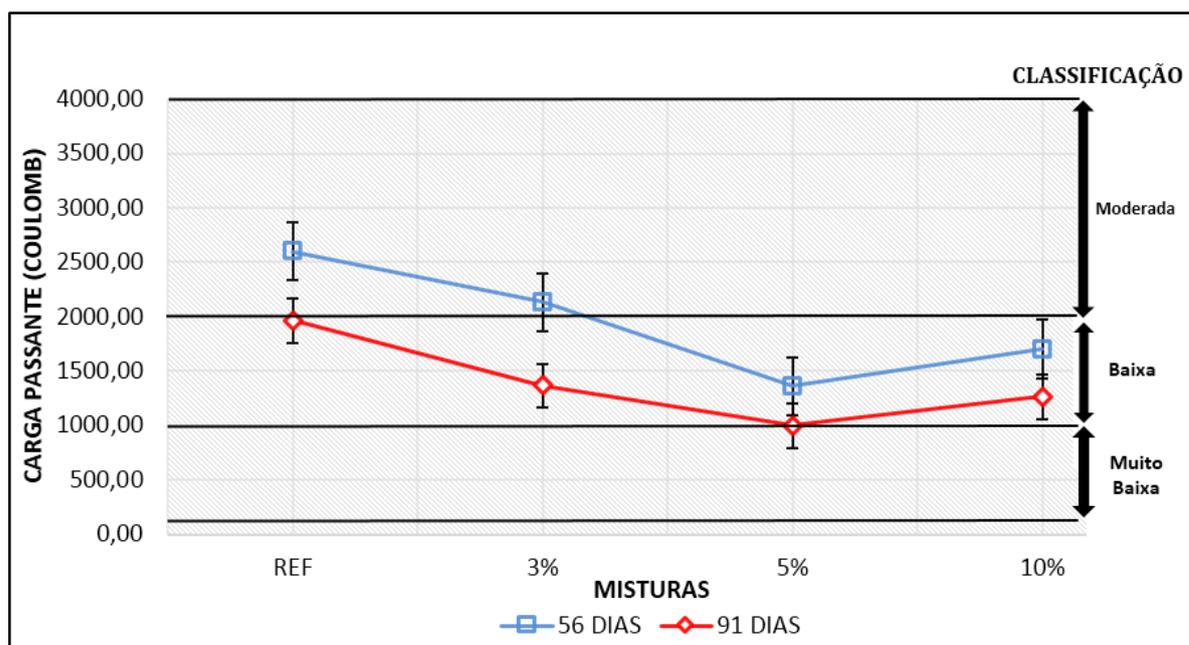


Fonte: Elaboração Própria

A mistura que contém apenas cimento foi quem apresentou os maiores resultados de corrente passante tanto aos 56 como aos 91 dias. Foi possível analisar que a mistura de 5% ensaiada aos 91 dias, apresentou uma redução de corrente passante bastante acentuada, cerca de 25% quando comparado a mistura de referência nesta mesma idade. As misturas de 3 e 10% apresentaram comportamento bastante similares quando ensaiada aos 91 dias, porém, o mesmo não ocorre ao 56 dias.

Após a obtenção dos resultados da corrente passante ao longo das seis horas de ensaio acelerado, foi calculada a carga passante conforme a Equação 4. O gráfico 7 mostra os resultados obtidos de carga passante para todas as misturas analisadas e a classificação qualitativa indicada pela norma C 1202 (ASTM, 2012), apresentada na Tabela 9.

Gráfico 7: Correlação entre carga passante pelo ensaio acelerado e misturas.

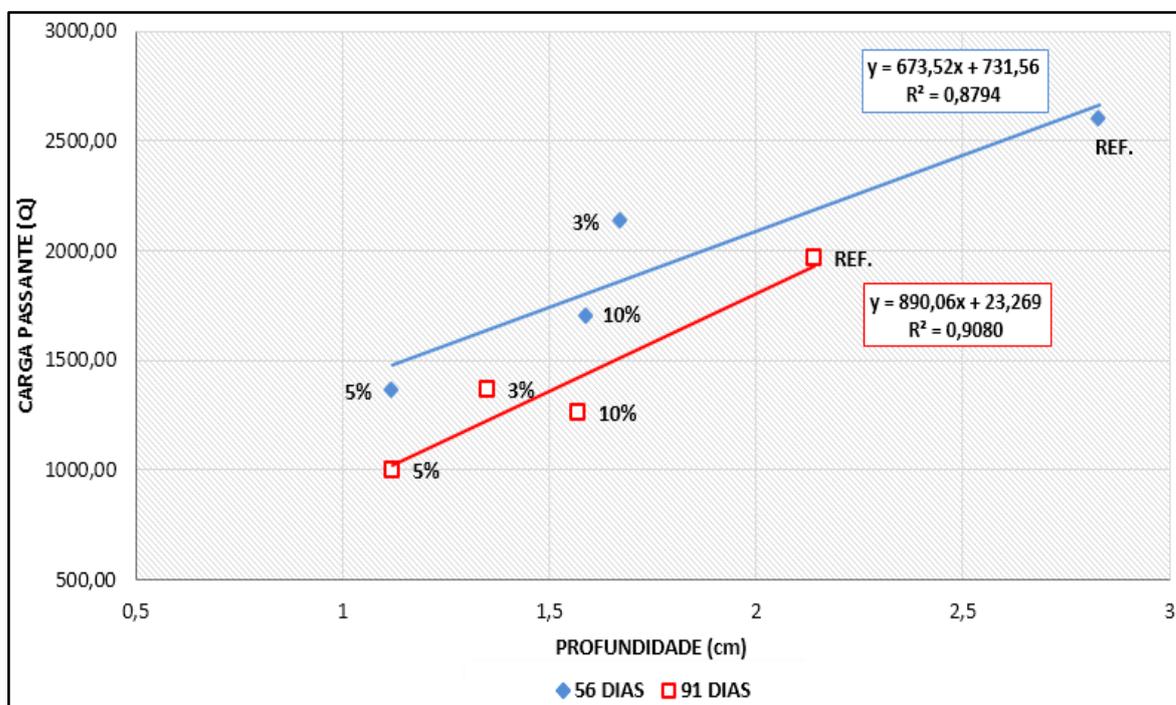


Fonte: Elaboração Própria

O gráfico apresentado mostra que apenas a mistura de 5% ensaiada ao 91 dias pode ser classificada como “muito baixa” quanto a susceptibilidade de penetração de íons cloretos, tendo em vista que apresentou um valor de carga passante igual a 998,69 Coulomb, portanto ficando muito próximo aos 1000 Coulomb, valor limite prescrito pela C 1202 (ASTM, 2012), onde seria classificada como “baixa”. Analisando os resultados obtidos pelas amostras ensaiadas aos 91 dias é possível observar que praticamente todas as misturas ficaram classificadas como baixa, com exceção da mistura com 5% de sílica da casca do arroz.

Após o ensaio acelerado de penetração de íons cloretos, todas amostras foram rompidas por compressão diametral onde foi aspergida uma solução de nitrato de prata, para que reagisse com a região contaminada por cloretos, tornando possível mensurar a profundidade da penetração de cloretos. No gráfico 8 são expostas as correlações de carga passante e a profundidade da penetração de cloretos, nas diferentes idades de ensaio analisadas. Onde fica demonstrada a existência de uma forte correlação entre carga passante e profundidade da penetração de íons cloretos.

Gráfico 8: Correlação entre carga passante pelo ensaio acelerado e profundidade da penetração de íons cloretos.



Fonte: Elaboração Própria

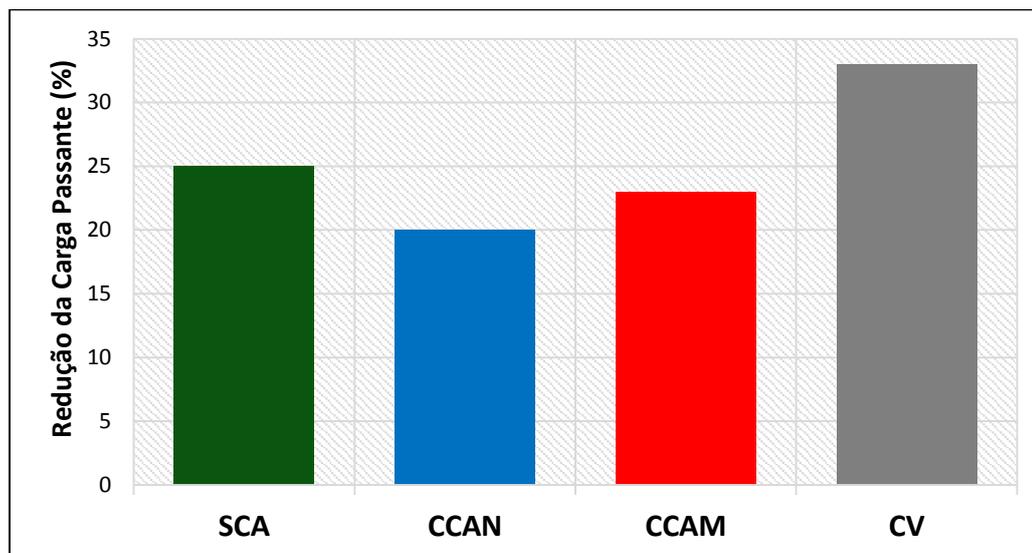
Na Tabela 10 são apresentadas as adições estudadas por Missau (2004) e Pedrozo (2008) e os seus respectivos teores, os resultados obtidos são apresentados no Gráfico 9.

Tabela 10: Adições utilizadas para estudo da penetração de íons cloretos

| Autores | Material Utilizado | Teor |
|--------------------|--|-------------|
| Missau(2004) | Cinza da casca de arroz moída (CCAM) | 10% |
| Missau(2004) | Cinza volante (CV) | 35% |
| Pedrozo(2008) | Cinza da casca de arroz natural (CCAN) | 15% |
| Elaboração própria | Sílica da casca de arroz (SCA) | 5% |

Fonte: Elaboração própria

Gráfico 9: Redução da carga passante em diferentes adições

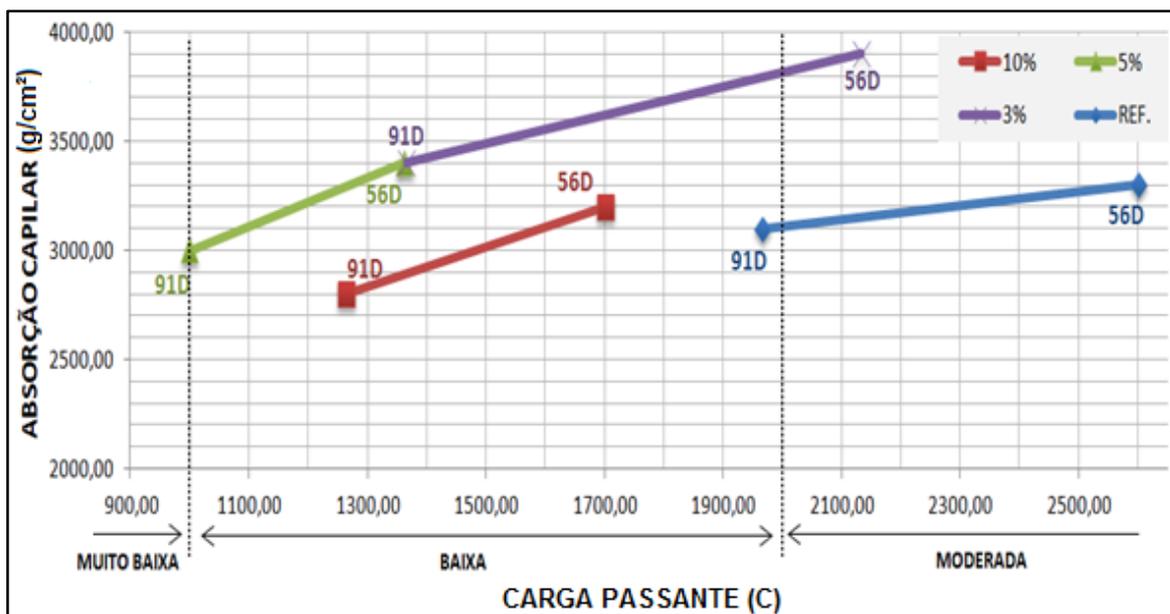


Fonte: Elaboração própria

Fica demonstrado nos resultados acima que a utilização da sílica da casca de arroz, mesmo que em baixos teores, resulta em uma redução da carga passante superior a proporcionada por adição de CCAN e CCAM, em teores de adições superiores. Também pode-se observar a grande eficiência da utilização da cinza volante na redução da carga passante, no ensaio acelerado de penetração de íons cloretos, sugerindo a possibilidade de uma mistura binária de cinza volante e sílica de casca de arroz com intuito de reduzir a suscetibilidade de concretos a ação de íons cloretos.

No gráfico 10 são apresentados os resultados de carga passante, obtidos pelo ensaio acelerado de penetração de íons cloretos e são comparados aos resultados de absorção capilar.

Gráfico 10: Carga passante versus absorção capilar



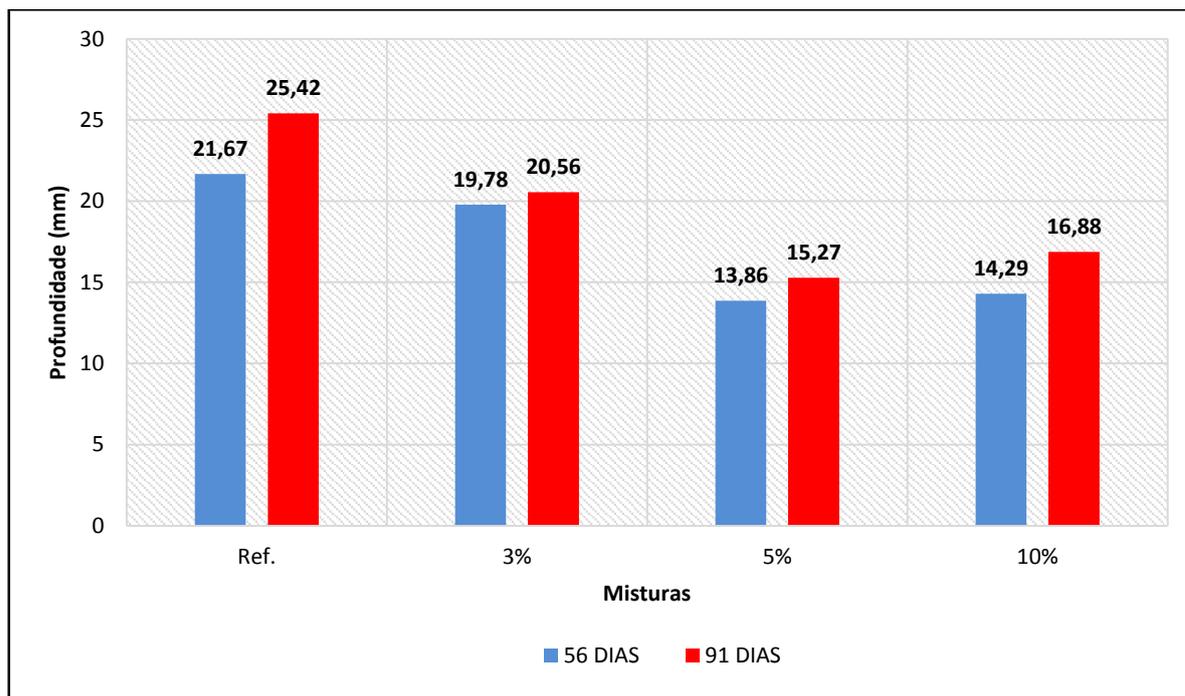
Fonte: Elaboração própria

O gráfico apresentado demonstra que a mistura com melhor desempenho, ou seja, menor absorção capilar, foi a mistura com 10% de sílica da casca de arroz, isso denota a existência de efeito físico da sílica da casca de arroz, mesmo tendo granulometria muito semelhante a do cimento Portland CP II Z-32. Pode-se verificar também a existência de uma fraca correlação entre os dois ensaios, uma vez que a mistura que obteve melhor desempenho no ensaio acelerado foi a mistura com teor de 5% de substituição de cimento por sílica da casca de arroz, porém, em ambos ensaios as misturas contendo sílica de casca de arroz obtiveram melhor desempenho, quando comparadas a mistura que contém apenas cimento Portland.

4.4 Ensaio de penetração de íons cloretos por imersão - EPCI

Os valores obtidos no ensaio de penetração de íons cloretos por imersão em solução salina são mostrados no gráfico 11. Fica evidenciado o acréscimo da profundidade da região atacada pela ação de íons cloretos quanto maior o tempo de imersão dos corpos de prova em solução salina. Também pode-se observar no gráfico a redução da profundidade da penetração de íons cloretos em todas as misturas que contém sílica da casca do arroz, sendo que a mistura contendo 5% de sílica de casca de arroz apresentou uma redução média da profundidade da penetração de aproximadamente 37% quando comparada à mistura de referência.

Gráfico 11: Profundidade média da penetração de íons cloretos



Fonte: Elaboração Própria

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

As principais conclusões referentes ao presente trabalho são listadas a seguir.

- Os resultados de resistência à compressão axial mostraram-se inversamente proporcionais aos de penetração de íons cloretos, tanto no ensaio acelerado como no ensaio de imersão em solução salina, ou seja, quanto maior a resistência à compressão axial menor é a suscetibilidade deste concreto a ação de íons cloretos.
- Quanto à classificação qualitativa proposta pela C 1202 (ASTM, 2012) para o ensaio acelerado de penetração de íons cloretos, foi observado que a proposta não deve ser utilizado como o único balizador para tomada de decisões no que se refere a escolha de determinado tipo de concreto, pois segundo a norma apenas um Coulumb de diferença de carga passante classifica um concreto com características muito semelhantes em faixas diferentes. Isso fica comprovado pelo ensaio colorimétrico realizados nas amostras após a execução do ensaio acelerado, onde percebeu-se que concretos com profundidades muito semelhantes estavam classificados em faixas diferentes. Sendo assim, é essencial avaliar magnitude da carga passante para a tomada de decisões, pois a classificação por si só deixa

dúvidas, quanto ao ganho de durabilidade de um concreto de diferente faixa de classificação.

- As misturas contendo teores de 3 e 10% de sílica da casca do arroz obtiveram resultados semelhantes e demonstraram uma pequena vantagem em relação ao concreto produzido apenas com cimento Portland. A mistura com substituição parcial de cimento Portland por sílica da casca de arroz no teor de 5%, foi a que apresentou melhores resultados, sendo que, o concreto produzido com este teor pode ser descrito como um concreto com capacidade de penetração de íons cloretos “muito baixa”, segundo a classificação da C 1202 (ASTM, 2012).
- A profundidade média da penetração de íons cloretos em solução salina, foi aproximadamente 37% menor para a mistura contendo 5% sílica de casca de arroz em relação à mistura de referência.
- Ficou demonstrado que o ganho de resistência a penetração de íons cloretos dos concretos produzidos com sílica da casca de arroz se deve principalmente à sua atividade pozolânica, já que o CII-Z apresentou, no ensaio de demanda d'água, compacidade maior que a da mistura de CII-Z com sílica da casca de arroz.
- Os resultados comprovam que as misturas contendo sílica de casca de arroz trouxeram benefícios aos concretos quanto à proteção ao ataque por íons cloretos, tornando a sílica de casca de arroz uma alternativa para aumentar a durabilidade de estruturas de concreto.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para a continuidade deste trabalho, com o objetivo de estudar a durabilidade de concretos com adição sílica de casca de arroz, sugere-se o estudo de outras propriedades:

- Estudar outros teores de substituição do cimento por sílica da casca de arroz;
- Avaliar a resistividade elétrica de concretos contendo sílica da casca de arroz;
- Determinar o consumo de hidróxido de cálcio;
- Analisar por meio de microscópio eletrônico de varredura a microestrutura do concreto.
- Analisar a penetração de íons cloretos em outras idades;
- Estudar a Reação álcali-sílica;

REFERÊNCIAS

American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO T 259: Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration, Washington. D. C, EUA. 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM), C 1202-12. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. ASTM C-1202.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 23: Cimento Portland: Determinação da massa específica do cimento. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica, Massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, Massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR NM 65: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo Abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição Granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR5738: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR 5739: Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova Cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. NBR 5752: Materiais pozolânicos: Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland, Índice de atividade pozolânica com cimento, Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

_____. NBR 7211: 2005 Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

_____. NBR 7251: Agregados em estado solto – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

_____. NBR 8522: Concreto: Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. NBR 9776: Agregados: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

_____. NBR 9833: Concreto fresco: Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 11579: Cimento Portland: Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 12653: Materiais Pozolânicos: Requisitos. Rio de Janeiro, 1991.

ANDRADE, Jairo José de Oliveira. Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos. 2001, 227 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

ARAÚJO, Adriana, et al. Avaliação da durabilidade de estruturas de concreto em ambiente marinho tropical. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 50, 2010, Fortaleza. ANAIS DO 52º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2010 – 52CBC0397.

ARAÚJO, Adriana, et al. Avaliação da durabilidade de estruturas de concreto em ambiente marinho tropical. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 50, 2010, Fortaleza. ANAIS DO 52º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2010 – 52CBC0397.

CASANOVA, B.S. Microestrutura e Durabilidade a Cloretos de Protótipos de Concreto com Cinza de Casca de Arroz Com e Sem Moagem Prévia. 2013. 165p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2013.

CASCUDO, Oswaldo. HELENE, Paulo Roberto do Lago. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP – Departamento de Engenharia de Construção Civil. Resistência à corrosão no concreto dos tipos de armaduras brasileiras para concreto armado. São Paulo, 2001.

Cechella. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Editora Ibracon, 2011. V1. Cap. 8, p. 261-309.

CORDEIRO, Guilherme Chagas. Utilização de Cinzas Ultrafinas do Bagaço de Cana-De-Açúcar e da Casca de Arroz como Aditivos Minerais em Concreto. 2006.

485p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

DA SILVA, Monique Pafiadache. Retração total e penetração de cloretos de concretos compostos com cinzas de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico. 2012. 152p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. Adições Minerais. In: ISAIA, Geraldo Cechella. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Editora Ibracon, 2011. V1. Cap. 8, p. 261-309.

DUART, Marcelo Adriano. Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento. 2008. 134p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

FIGUEIREDO, E. P. MEIRA, G.R. Corrosão das Armaduras das Estruturas de Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Editora Ibracon, 2011. V1. Cap. 26, p. 903-933.

FORMAGINI, Sidiclei. Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de concretos de Altíssimo Desempenho. 2005. 259p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

HELENE, Paulo Roberto Lago. ANDRADE, Tibério. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: Ibracon, 2007. V2, Cap. 27, p. 905 -944.

HELENE, Paulo Roberto Lago. TERZIAN, Paulo. Manual de Dosagem e Controle do Concreto. São Paulo: PINI / SENAI, 1993. 189p.

ISAIA, Geraldo Cechella. Questões de ensino e pesquisa na durabilidade das estruturas do concreto. Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil Vol. 2, n. 2, p. 92-104, Novembro 2005.

MAPA, Ministério da Agricultura Pecuária e abastecimento. Disponível em:<<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/arroz/saiba-mais>>. Acessado em 30 de julho de 2013.

MARANGON, E.; et al. Atividade Pozolânica Da Sílica Da Casca De Arroz Por Combustão Em Leito Fluidizado. In: Ibracon, 2013, Gramado RS. 55º Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo: IBRACON, 2013. p. 135.

MARCONDES, Carlos Gustavo Nastari. Adição De Nanotubos De Carbono Em Concretos De Cimento Portland- Absorção, Permeabilidade, Penetração De Cloretos E Propriedades Mecânicas.2012. 143p. Dissertação (Mestrado). UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, 2012.

MARTON, L.F.M; et al. Avaliação Da Utilização Da Sílica De Casca De Arroz Obtida Através De Leito Fluidizado Em Pisos Intertravados. In: IBRACON, 2013, Gramado RS. 55º Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo: IBRACON, 2013. p. 140

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias. Andrade, Tibério. HELENE, Paulo. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Editora Ibracon, 2011. V1. Cap. 22, p. 773-806.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íon cloretos. 2008. 218 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

MEHTA, P.K. MONTEIRO, P.J.M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials (with P.K. Mehta), McGraw-Hill, third edition (2006).

MISSAU, Fabiano. Penetração de cloretos de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz. 2004. 146p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. São Paulo. PINI. 1997.

PEDROZO, Éder Claro. Estudo da utilização da cinza de casca de arroz residual em concretos estruturais: uma análise da durabilidade aos cloretos. 2008. 143p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

POUEY, Maria Tereza Fernandes. Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico. 2006. 316 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SACILOTO, Adriano Pedroso. Comportamento frente à ação de cloretos de concretos compostos com adições minerais submetidos a diferentes períodos de cura. 2005. 180p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

SHI, Xianming. Streangth and corrosion properties of Portland cement mortar and concrete with mineral admixtures. Contruccion and building materials. 2012.

SOBRAL, Hernani S. Reologia e Trabalhabilidade dos Concretos. Associação Brasileira De Cimento Portland, N° 62, São Paulo, 1990, P. 76.

TRINDADE, Guilherme Hoher. Durabilidade do concreto com cinza da casca de arroz sem moagem: mitigação da reação alcali-sílica e penetração de cloretos. 2011. 200p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2011.

VIEIRA, Fernanda Macedo Pereira. Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa. 2003. 242 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.