

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Tatiani Coletto

**PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS COMPOSTOS COM
CINZA DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM
DIFERENTES TEORES DE ADIÇÃO**

Santa Maria, RS
2017

Tatiani Coletto

**PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS
COMPOSTOS COM CINZA DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ÁGUA EM DIFERENTES TEORES DE ADIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração Construção Civil e Preservação Ambiental, Linha de Pesquisa: Materiais de Construção da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof^o. Dr^o. Antônio Luiz Guerra Gastaldini

Santa Maria, RS
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Coletto, Tatiani

Penetração de cloretos em concretos compostos com cinza de lodo de estação de tratamento de água em diferentes teores de adição / Tatiani Coletto.- 2017.
127 p.; 30 cm

Orientador: Antônio Luiz Guerra Gastaldini
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2017

1. Cinza de lodo de estação de tratamento de água 2. Penetração de cloretos 3. Concreto 4. Durabilidade I. Gastaldini, Antônio Luiz Guerra II. Título.

© 2017

Todos os direitos autorais reservados a Tatiani Coletto. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte. E-mail: eng.tatianicoletto@gmail.com

Tatiani Coletto

**PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS
COMPOSTOS COM CINZA DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ÁGUA EM DIFERENTES TEORES DE ADIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração Construção Civil e Preservação Ambiental, Linha de Pesquisa: Materiais de Construção da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 31 de agosto de 2017:

Antônio Luiz Guerra Gastaldini, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

André Lübeck (UFSM)

Rafael Cabral Cruz (UNIPAMPA)

Santa Maria, RS
2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em especial aos meus pais, Giovani e Elis, a meu irmão Lorenzo, e a minha vó Valtereza por todo amor, carinho, apoio e incentivo para a realização deste trabalho.

Ao meu marido, Christian, por toda compreensão em dias e noites mal dormidas, pela companhia no laboratório, e nas madrugadas na hora da escrita, por sempre ter ficado ao meu lado me apoiando, tanto nas horas boas e ruins, enfim por toda ajuda.

Agradeço à minha filha, Nina, mas principalmente à Deus, por ter me dado a graça de ser mãe, dessa riqueza de criança, pois foi ela que me deu forças para seguir em frente e assim concluir este trabalho.

Ao meu professor orientador, Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini, pela orientação, pelos conhecimentos transmitidos, pela paciência e principalmente por não ter desistido de mim nos momentos mais difíceis.

Aos integrantes do Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto (Gepecon), especialmente a Rosana, Mirdes, Mariah, Fábio, Lucas e Diego, colegas de mestrado e pesquisa, pelos ensinamentos, pelas ajudas e pela companhia.

Aos bolsistas pela grande colaboração nas atividades de laboratório.

Aos funcionários do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), em especial ao Sr. João, pela ajuda concedida.

Aos membros da banca examinadora, pela atenção e colaboração.

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) por possibilitar esta pesquisa.

A todos, muito obrigada!

RESUMO

PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS COMPOSTOS COM CINZA DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM DIFERENTES TEORES DE ADIÇÃO

AUTORA: Tatiani Coletto

ORIENTADOR: Prof^o. Dr^o. Antônio Luiz Guerra Gastaldini

O crescente aumento populacional tem sido responsável pela demanda cada vez maior por água potável e, com isso, num aumento da quantidade de resíduos gerados nas Estações de Tratamento de Água. Na grande maioria dos municípios esses resíduos, chamado de lodo de ETA, são dispostos de maneira inadequada, em rios, e se constitui num problema ambiental. Devido a isto, e às exigências por construções sustentáveis, é crescente o número de pesquisas que visam a substituição de parte do cimento por sub-produtos agroindustriais, uma vez que possibilitam a redução na emissão de gases de efeito estufa, oriundos do processo de fabricação deste, além de proporcionarem vantagens econômicas e técnicas, garantindo maior durabilidade às estruturas. No entanto, são poucos os trabalhos publicados relatando o comportamento do concreto composto com essa adição mineral sujeito ao ataque por cloretos. Nesse trabalho investigou-se o comportamento do concreto composto com cinza de lodo de ETA (CLETA) em teores de substituição ao cimento Portland de 5% a 30% denominadas 5L, 10L, 15L, 20L, 25L E 30L, além de misturas ternárias compostas com 5% e 10% de escória de alto forno e 15% de CLETA, denominadas 5EAF e 10EAF e uma mistura quaternária com 15% de CLETA, 5% de EAF e 5% de cinza de casca de arroz, denominada 5CCA frente ao ataque por cloretos. A avaliação foi feita segundo o método de ensaio da ASTM C 1202 (teste rápido de penetração de cloretos) aos 28 e 91 dias, em corpos de prova de dimensões 100x51mm, e pelo ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata (EPCANP) que possibilita a determinação do coeficiente de difusão de cloretos (K). Este ensaio foi realizado em corpos de prova de dimensões 100x100x285mm, imersos numa solução salina na proporção de 31,94g para cada litro de água destilada, e ensaiados nas idades de 7, 14, 28, 56 e 91 dias, determinando-se o coeficiente de difusão. Em ambos os ensaios os corpos de prova foram submetidos à cura úmida por 3 e 7 dias e foram adotadas três relações água/aglomerante, 0,35, 50 e 0,65. Os resultados foram confrontados com aqueles obtidos em uma mistura de referência constituída por 100% de cimento Portland de alta resistência inicial. Dos resultados obtidos, para ambos o ensaios adotados, constata-se aumento na resistência à penetração de cloretos com o aumento no prazo de cura e no teor de substituição do cimento Portland (ARI) pela cinza do lodo de estação de tratamento de água (CLETA). As misturas ternárias e quaternárias apresentaram melhor desempenho do que a mistura de referência, contudo, inferior àquela composta com 30% de CLETA.

Palavras-chave: Cinza de lodo de estação de tratamento de água. Penetração de cloretos. Concreto. Durabilidade.

ABSTRACT

PENETRATION OF CHLORETHS IN CONCRETE COMPOUNDS WITH GRAY OF WATER TREATMENT STATION IN DIFFERENT ADDED CONTENT

AUTHOR: TATIANI COLETTO

ADVISOR: PROF^o. DR. ANTÔNIO LUIZ GUERRA GASTALDINI

The increasing population growth has been responsible for the increasing demand for drinking water and, therefore, an increase in the amount of waste generated in Water Treatment Stations. In the vast majority of municipalities, these wastes, called ETA sludge, are inadequately disposed of in rivers and constitute an environmental problem. Due to this, and the requirements for sustainable construction, the number of researches that seek to substitute part of the cement for agroindustrial by-products is growing, since they enable the reduction in the emission of greenhouse gases, originating from the manufacturing process of this, besides providing economic and technical advantages, guaranteeing greater durability to the structures. However, few published works report the behavior of composite concrete with this mineral addition subject to attack by chlorides. In this work the behavior of the composite concrete with ETA sludge ash (CLETA) was investigated in substitution contents of 5% to 30% Portland cement denominated 5L, 10L, 15L, 20L, 25L and 30L, as well as composite ternary mixtures with 5% and 10% of blast furnace slag and 15% of CLETA, denominated 5EAF and 10EAF and a quaternary mixture with 15% of CLETA, 5% of EAF and 5% of husk ash, denominated 5CCA in front of the attack by chlorides. The evaluation was done according to the test method of ASTM C 1202 (rapid chlorine penetration test) at 28 and 91 days in specimens of dimensions 100x51mm and by the silver nitrate sputtering chlorides penetration test (EPCANP) that allows the determination of the diffusion coefficient of chlorides (K). This test was carried out on test specimens of dimensions 100x100x285mm, immersed in a saline solution at the rate of 31.94g for each liter of distilled water, and assayed at the ages of 7, 14, 28, 56 and 91 days, determining the coefficient of diffusion. In both tests, the specimens were submitted to wet curing for 3 and 7 days and three water / binder ratios were used, 0.35, 50 and 0.65. The results were compared with those obtained in a reference mixture consisting of 100% Portland high initial strength cement. From the results obtained, for both the tests adopted, there is an increase in the resistance to the penetration of chlorides with the increase in the curing time and the substitution content of the Portland cement (ARI) by the sludge ash from the water treatment plant (CLETA). The ternary and quaternary mixtures presented better performance than the reference mixture, however, lower than that composed with 30% of CLETA.

Keywords: Sludge ash from water treatment plant. Penetration of chlorides. Concrete. Durability.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Teor limite de cloreto para diversas normas.....	52
Quadro 2 - Classes de agressividade ambiental.....	56
Quadro 3 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm.....	57
Quadro 4 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de uma estação convencional com tratamento de lodos....	30
Figura 2 - Principais usos da casca de arroz.....	40
Figura 3 - Representação esquemática dos mecanismos de transporte de íons cloreto no concreto.....	42
Figura 4 - Influência da relação a/c nos coeficientes de difusão de cloretos de pastas de cimento Portland endurecido	46
Figura 5 - Representação esquemática das deteriorações induzidas pela corrosão: fissuração, descamação e delaminação.....	49
Figura 6 - Modelo da célula de corrosão no concreto.....	50
Figura 7 - Tipos de corrosão.....	51
Figura 8 - Efeito da cura e da relação a/c na profundidade de alcance dos cloretos.....	59
Figura 9 - Influência dos ciclos de cura na penetração de íons cloreto	61
Figura 10 - Lodo de ETA proveniente do município de Venâncio Aires, RS.....	65
Figura 11 - Difratograma de raios-X da amostra de lodo: A) in natura e B) calcinada a 600°C.	69
Figura 12 - Curva granulométrica do agregado miúdo	71
Figura 13 - Curva granulométrica do agregado graúdo.....	72
Figura 14 - Corpo de prova entre as células de acrílico	79
Figura 15 - Corpos de prova fatiado, preparados para imersão no tanque	81
Figura 16 - Corpos de prova fatiados, imersos no tanque	81
Figura 17 - Demonstração de penetração de íons Cloreto.....	82
Figura 18 - Corpo de prova com penetração de íons cloreto.....	82
Figura 19 - Coeficiente de Penetração de Cloretos de acordo com a relação a/agl e período de cura - 3 dias	87
Figura 20 - Coeficiente de Penetração de Cloretos de acordo com a relação a/agl e período de cura - 7 dias	88
Figura 21 - Influência do período de cura úmida sobre o coeficiente de penetração k.....	91
Figura 22 - Carga total passante das misturas investigadas aos 28 dias de idade - 3 dias de cura.....	96
Figura 23 - Carga total passante das misturas investigadas aos 28 dias de idade - 7 dias de cura.....	96
Figura 24 - Carga total passante das misturas investigadas segundo aos 91 dias de idade - 7 dias de cura	97
Figura 25 - Carga total passante das misturas investigadas aos 91 dias de idade - 3 dias de cura.....	97
Figura 26 - Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 para o período de cura de três dias aos 28 dias	105
Figura 27 - Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 para o período de cura de sete dias aos 28 dias	105
Figura 28 - Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 para o período de cura de três dias aos 91 dias	106
Figura 29 - Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 para o período de cura de sete dias aos 91 dias	106
Figura 30 - Carga passante versus resistência à compressão - 28 dias - três dias de cura	108

Figura 31 - Carga passante versus resistência à compressão – 28 dias - sete dias de cura	109
Figura 32 - Carga passante versus resistência à compressão – 91 dias - 3 dias de cura.....	109
Figura 33 - Carga passante versus resistência à compressão – 91 dias - 7 dias de cura.....	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das adições minerais para concreto.....	33
Tabela 2 - Acréscimo de tempo para iniciar a corrosão em função do teor de C3A	58
Tabela 3 - Período de cura mínima	60
Tabela 4 - Características físico-químicas dos aglomerantes	67
Tabela 5 - Características físico-químicas do lodo de estação de tratamento de água in natura e calcinado a 600°C por 1 hora	68
Tabela 6 - Composição mineralógica do lodo in natura	70
Tabela 7 - Composição mineralógica do lodo calcinado a 600°C por 1 hora	70
Tabela 8 - Características físicas dos agregados.....	71
Tabela 9 - Propriedades físico-químicas dos aditivos utilizados na pesquisa	72
Tabela 10 - Proporções das adições minerais em cada mistura de aglomerante	73
Tabela 11 - Consumo de materiais por metro cúbico de concreto	74
Tabela 12 - Idade de ensaio, dimensão dos corpos-de-prova e número de camadas (adensamento).....	76
Tabela 13 - Classificação dos cloretos segundo a penetração de cloretos	78
Tabela 14 - Coeficiente de Penetração K das misturas, de acordo com a relação a/agl e período de cura úmida.....	86
Tabela 15 - Índice de penetração de íons cloreto em relação à REF.....	88
Tabela 16 - Resultados de carga total passante aos 28 dias	94
Tabela 17 - Resultados de carga total passante aos 91 dias	94
Tabela 18 - Classificação dos concretos segundo a penetração de cloretos	95
Tabela 19 - Influência do teor de substituição na redução da carga passante aos 28 dias para três e sete dias de cura úmida.....	99
Tabela 20 - Influência do teor de substituição na redução da carga passante aos 91 dias para três e sete dias de cura úmida.....	100
Tabela 21 - Influência do período de cura úmida sobre a redução da carga passante para ensaio de 28 dias.....	101
Tabela 22 - Influência do período de cura úmida sobre a redução da carga passante para ensaio de 91 dias.....	102
Tabela 23 - Coeficiente de difusão de cloretos para os níveis de resistências de 35 MPa, 45 MPa e 50 MPa, e períodos de cura investigados.....	111
Tabela 24 - Tp (em anos) necessário para os íons cloreto atingirem a espessura de 25mm na camada de passivação do aço, para os níveis de resistência de 35 MPa, 45 Mpa e 50 Mpa	112

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
AgNO₃	Nitrato de prata
a/c	Relação água/cimento
a/ag	Relação água/aglomerante em massa
agl	Aglomerante
C	Coulomb
°C	Graus Celsius
C3A	Aluminato tricálcico
C4AF	Ferro Aluminato tetracálcico
CaCl₂	Cloreto de cálcio
CA	Casca de arroz
Ca(OH)₂	Hidróxido de cálcio
Cl⁻	Íons cloreto
CCA	Cinza de casca de arroz
CCAC	Cinza de casca de arroz de cor clara
CCA E	Cinza de casca de arroz de cor escura
CH	Hidróxido de cálcio
cm	Centímetro(s)
CO₂	Dióxido de carbono
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CPV – ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
cp's	Corpos de prova
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
EPCANP	Ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata
Fe	Ferro
Fe⁺⁺	Íons ferro
g	Grama(s)
GEEA	Indústria Geradora de Energia Elétrica Alegrete
GEPECON	Grupo de Pesquisa em Concreto
h	Hora(s)
H₂O	Molécula de água
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
kg	Quilogramas
m	Metro(s)
m²	Metro quadrado
m³	Metro cúbico
mm	Milímetro(s)

MPa	Mega-Pascal
Na	Sódio
NaCl	Cloreto de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
NBR	Norma Brasileira Regulamentada
O₂	Gás oxigênio
OH-	Íons hidroxila ou hidroxila
pH	Potencial de hidrogênio
Q	Carga total passante
REF	Mistura de referência, composta somente de cimento Portland
SiO₂	Dióxido de silício
AS	Sílica ativa
T_p	Tempo de penetração
TRPC	Teste rápido de penetração de cloretos
3d	Cura de 3 dias
7d	Cura de 7 dias
5 CLETA	5% de cinza de lodo de ETA
10 CLETA	10% de cinza de lodo de ETA
15CLETA	15% de cinza de lodo de ETA
20CLETA	20% de cinza de lodo de ETA
25CLETA	25% de cinza de lodo de ETA
30CLETA	30% de cinza de lodo de ETA
5EAF	5% de escória de alto forno
10EAF	10% de escória de alto forno
5CCA	5% de cinza de casca de arroz
Ø	Diâmetro
#	Abertura da malha de uma peneira padronizada
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	DEFINIÇÃO DA TEMÁTICA.....	23
1.1.1	Apresentação do tema	23
1.2	OBJETIVOS	24
1.2.1	Objetivo Geral	24
1.2.2	Objetivos específicos	24
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	25
2	REVISÃO DE LITERATURA	27
2.1	SISTEMA DE TRATAMENTO DE ÁGUA	27
2.2	CLASSIFICAÇÃO DO LODO GERADO NA ETA.....	30
2.3	ADIÇÕES MINERAIS	32
2.3.1	Lodo de ETA	35
2.3.2	Escória de alto forno	37
2.3.3	Cinza de casca de arroz	38
2.4	AÇÃO DE ÍONS CLORETO	40
2.4.1	Mecanismos de transporte no concreto	41
2.4.1.1	<i>Permeabilidade e Durabilidade</i>	42
2.4.1.2	<i>Absorção Capilar</i>	43
2.4.1.3	<i>Migração e Difusão</i>	44
2.5	CORROSÃO DAS ARMADURAS	48
2.6	PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO.....	53
2.6.1	Fatores que influenciam o ingresso de íons cloreto no concreto	54
2.6.2	Fatores climáticos	55
2.6.3	Condições de exposição	55
2.6.3.1	<i>Fatores inerentes ao concreto</i>	58
2.6.3.2	<i>Influência da cura na resistência à penetração de cloretos</i>	59
3	MATERIAIS E MÉTODOS	63
3.1	MATERIAIS E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA.....	64
3.2	CARACTERIZAÇÕES DOS MATERIAIS	66
3.2.1	Aglomerantes	66
3.2.2	Lodo de ETA e CLETA	67
3.2.3	Agregados	70
3.2.4	Aditivos	72
3.2.5	Água	73
3.3	DOSAGEM DOS CONCRETOS	73
3.4	MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS-DE-PROVA.....	76
3.5	ENSAIOS	77
3.5.1	Teste rápido de penetração de cloretos (TRPC) – ASTM C1202	77
3.5.2	Ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata (EPCANP)	80
3.5.3	Resistência à compressão axial	83
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	85
4.1	ANÁLISES DOS RESULTADOS DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS – EPCANP.....	85
4.1.1	Influência da relação água/aglomerante e teor de substituição do cimento pelas adições minerais	87

4.1.2	Influência do período de cura úmida	91
4.2	ANÁLISES DOS RESULTADOS DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS – ASTM C1202	92
4.2.1	Influência da relação água/aglomerante	93
4.2.2	Influência do teor de substituição do cimento pelas adições minerais	98
4.2.3	Influência do período de cura úmida	101
4.2.4	Determinação da profundidade de penetração nas misturas submetidas ao ensaio TRPC (ASTM C1202).....	104
4.2.5	Comparação entre carga passante e resistência à compressão	106
4.2.6	Análise dos resultados em igualdade de resistência	110
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	115
	REFERÊNCIAS	119

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento das cidades e os constantes esforços pelo aumento da qualidade de vida dos seus cidadãos, têm aumentado a demanda por água tratada e, conseqüentemente, o incremento da geração de materiais sólidos provenientes do tratamento de águas fluviais (HOPPEN C. et al., 2005).

A Portaria 518 de 25 de Março de 2004 do Ministério da Saúde estabelece que a potabilização das águas doces naturais, para fins de abastecimento público, tem como principal função adequar a água bruta afluyente à estação de tratamento, ao padrão de potabilidade. O tratamento de água consiste basicamente na remoção de partículas suspensas e coloidais, matéria orgânica, micro-organismos e outras substâncias possivelmente deletérias à saúde humana presentes nas águas (VON SPERLING, 2005).

A má qualidade da água dos rios, que é resultado do somatório de fatores como: o lançamento de efluentes indústrias, a baixa taxa de tratamento dos esgotos domésticos (urbanos e rurais), e disposição de resíduos, somados a crescente demanda por água potável, acabam exigindo que se faça uso de maiores concentrações de produtos químicos nas Estações de Tratamento de Água (ETA), gerando uma grande quantidade de resíduos, denominados lodos de ETA.

O uso do lodo remanescente após o tratamento de água surge como uma alternativa de matéria prima para o setor da construção civil, pois possibilita a sua reintrodução parcial na composição dos concretos e argamassas.

Isaia (1995) explica que o concreto, por ser o material mais utilizado pelo homem, demanda, na fabricação do cimento, uma quantidade muito grande de energia e matéria-prima (argila e calcário), que gera grande impacto ambiental sobre o ecossistema, devido à retirada desse material e ao excessivo consumo energético necessário para transformá-lo em clínquer. O autor ainda adverte que grande parte desse impacto pode ser minimizado se parte do cimento utilizado no concreto for substituído por um ou mais tipos de pozolanas. Além disso, o uso de adições minerais no cimento proporciona uma redução na poluição gerada, pois reduz a emissão de CO₂ no processo de produção de cimento, uma vez que em escala global a indústria do cimento é responsável pela emissão de 5% a 7% do total de CO₂ (HUNTZINGER; EATMON; MEYER, 2009). Contudo, outros autores relatam que essa emissão é cerca de 5,3% mas que sua participação está crescendo (QUERÉ et al., 2014).

Conforme Gartner (2004), Le et al. (2011) e Peng et al. (2013), cada tonelada de clínquer produzido gera cerca de 0,66 a 0,82 toneladas de CO₂, e, no Brasil, esse valor é ainda menor, ficando em torno de 600 kg de CO₂ para cada tonelada de cimento produzido (CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE, 2013).

Segundo dados preliminares levantados pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) no período de janeiro a outubro de 2017, as vendas de cimento no mercado interno totalizaram 45,2 milhões de toneladas, de acordo com dados preliminares da indústria. Esse montante representa uma queda de 6,7% frente ao mesmo período do ano passado. Em 12 meses, as vendas acumuladas totalizaram 54,2 milhões de toneladas, quantidade 6,4% menor do que nos 12 meses anteriores (nov/15 a out/16). No mês de outubro de 2017, foram vendidas 4,6 milhões de toneladas, o que representa uma queda de 0,5% em relação a outubro de 2016. Na comparação por dia útil - melhor indicador da indústria por considerar o número de dias trabalhados, que tem forte influência no consumo de cimento - as vendas do produto no mercado interno em outubro apresentaram redução de 2,6% em comparação a outubro de 2016 e 6,6% em relação a setembro de 2017.

De acordo com Bertolini (2010), as adições pozolânicas melhoram o comportamento do concreto em relação à penetração de cloretos ao ataque de sulfatos, à reação álcali-agregados, à erosão pela água e a fissuração produzida pelo desenvolvimento do calor de hidratação. Além das vantagens técnicas, tendo em vista a durabilidade das estruturas, a utilização desses subprodutos possibilita uma vantagem ambiental, devido ao aproveitamento do resíduo diminuindo os impactos que esse descarte ocasiona, assim como pela diminuição da emissão de gases de efeito estufa devido à fabricação do cimento Portland; econômica pela substituição do clínquer, material caro por um resíduo e, estratégica, pela redução na utilização de matéria prima, ficando disponível para gerações futuras.

Estudos feitos por diferentes autores mostram a viabilidade ambiental e econômica do uso de subprodutos agroindustriais. Tais subprodutos como a cinza de casca de arroz (CCA), cinza de lodo de estação de tratamento de água (CLETA) e escória de alto forno (EAF), podem ser utilizadas no concreto, conferindo-lhe condições de maior durabilidade (NEVILLE, 1997; SANTOS, 2006; HENGGEN, 2014).

A durabilidade de uma estrutura de concreto é função da durabilidade do concreto e do aço inserido a este. A deterioração devido à corrosão das armaduras é um dos mais sérios problemas encontrados pela indústria da construção civil. A

corrosão da armadura de concreto normalmente ocorre como resultado da redução da alcalinidade devido à carbonatação do concreto, a lixiviação dos álcalis ou a presença de quantidade significativa de íons cloreto no concreto (BASHEER, 2002).

Entre os agentes de degradação os cloretos se apresentam como os mais agressivos, devido à facilidade de penetração destes íons na película de passivação da armadura, dando origem a uma corrosão intensa do tipo pontual, que reduz a seção resistente do aço.

Assim, a ênfase desse trabalho foi dada na utilização da cinza de lodo de estação de tratamento de água em misturas binárias, ternárias e quaternárias em aspectos relacionados à durabilidade do concreto, especificamente na resistência à penetração de cloretos.

Importante ressaltar que o presente trabalho faz parte de um projeto maior que verificou o comportamento de concretos com cinza de lodo de ETA. Hengen (2014) investigou a melhor temperatura/tempo de queima e tempo de moagem na resistência à compressão axial e, conseqüentemente, na possibilidade de utilização como adição mineral avaliou a pozolanicidade e quantificou a redução no consumo de cimento para obtenção de mesmo nível de resistência à compressão. Antolini (2015) investigou a retração total e a penetração de cloretos após a retração. Amaral (2015) investigou a absorção capilar e a resistividade elétrica aparente, Adorna (2016) investigou a carbonatação acelerada e Stein (2016) analisou as características de pastas de cimento portland com adição de CLETA.

1.1 DEFINIÇÃO DA TEMÁTICA

1.1.1 Apresentação do tema

Este trabalho dá seqüência à estudos que tratam da durabilidade de concretos produzidos com cinza de lodo de ETA em substituição ao cimento Portland, realizados pelo Grupo de estudos e pesquisas em concreto (GEPECON/UFSM). Sendo assim, teve-se como premissa avaliar o desempenho dessas adições minerais comparando os concretos frente à penetração de íons cloreto em cada um.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Dessa forma, o presente estudo teve por objetivo avaliar a influência da cinza de lodo de estação de tratamento de água, obtido com queima controlada, em teor de 5% a 30%, da relação a/agl, e período de cura úmida na resistência à penetração de cloretos por diferentes métodos. Foram avaliadas, também, misturas ternárias e quaternárias, compostas com escória de alto forno em teores de 5% e 10%, e cinza de casca de arroz, em teor de 5%, todas comparadas a uma mistura de referência composta com 100% de cimento Portland de alta resistência inicial.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atender ao objetivo geral da pesquisa, os objetivos específicos propostos são:

- a) Averiguar a influência da CLETA com diferentes teores de substituição no desempenho de concretos com diferentes relações a/agl (0,35; 0,50; e 0,65) frente penetração de cloretos, segundo o método da ASTM C 1202 e por aspensão de nitrato de prata após imersão em solução salina com teor de cloreto semelhante a água do mar;
- b) Investigar a influência dos diferentes prazos de cura úmida, 3 e 7 dias na penetração de cloretos;
- c) Comparar os desempenhos dos concretos com misturas binárias, ternárias e quaternárias de CLETA, EAF e CCA, a fim de averiguar qual adição mineral e qual teor de substituição é mais benéfico à durabilidade do concreto, em especial à penetração de íons cloreto;
- d) Analisar o comportamento dos concretos frente à penetração de íons cloreto em igualdade de resistência.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é organizado em 5 Capítulos contados a partir da Introdução.

No capítulo 1, Introdução, apresentando a importância do uso destes materiais alternativos na substituição do cimento nas estruturas de concreto.

No capítulo 2, Revisão da literatura, é feita uma abordagem dos aspectos relacionados à ação de íons cloretos, com ênfase nos processos de penetração de cloretos. Além disso, são discutidas propriedades de concretos como mecanismo de transporte no concreto, absorção de água por capilaridade e difusão e migração. Generalidades sobre a cinza de lodo de estação de tratamento de água, cinza de casca de arroz e escória de alto forno também são verificadas nesse capítulo.

No capítulo 3, Materiais e métodos, identificam-se quais são as variáveis desta pesquisa, a caracterização dos materiais envolvidos, a dosagem dos concretos e os ensaios a serem realizados, com a respectiva metodologia aplicada.

No capítulo 4, Análise e discussão dos resultados, são apresentados e debatidos os resultados dos ensaios realizados, analisando-os de forma a atender os objetivos traçados.

No capítulo 5, Conclusões e considerações finais, para finalizar, são destacados os resultados encontrados na pesquisa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são revistos temas referentes ao tratamento de água, lodos gerados pelas ETA's, adições minerais, à ação dos íons cloreto, os mecanismos de transporte, corrosão das armaduras e os fatores que influenciam a penetração dos íons cloreto no concreto.

Também se aborda a influência das adições minerais nas propriedades do concreto, como a CLETA, EAF E CCA, objetos de estudo na presente pesquisa.

2.1 SISTEMA DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Com o crescimento populacional, o aumento do consumo, agrava e ocasiona o aumento dos resíduos gerados. Embora existam muitos estudos, é cada vez mais necessário, em decorrência das graves conseqüências que tornam-se prejudiciais ao ambiente e a vida, estudos aprofundados para que não ocorra a descaracterização do meio natural e este não seja a única opção para o destino final dos resíduos gerados.

Essa maior carga de resíduos resulta da má qualidade da água exigindo maiores concentrações de produtos químicos nas Estações de Tratamento de Água (ETAs), gerando uma grande quantidade de resíduos. De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (SNIS,2015), 83,3% da população brasileira tem acesso a água tratada. Contudo, ainda 35 milhões de pessoas não são atendidas por este serviço. Segundo Di Bernardo et al (2012), o número de Estações de Tratamento de Água (ETAs) em operação no Brasil em 2008 era em torno de 6040, localizadas em 5564 municípios. Do total desses municípios 37,7% geravam lodo de ETA e cerca de 67,4% dispunham seus resíduos em rios, geralmente sem qualquer tipo de tratamento. Por isso a grande preocupação com o destino desse material que vem sendo descartado em cursos d'água, ocasionando a degradação dos recursos hídricos.

As características físicas, químicas, biológicas e radiológicas de águas naturais variam em relação aos processos que ocorrem no corpo hídrico e na bacia hidrológica. Esses processos estão relacionados com a capacidade de dissolver diversas substâncias e transportar materiais em suspensão, o que acarreta na alteração de sua composição. Como consequência, a mesma pode se tornar um

veículo transmissor de patologias, causando prejuízos ao homem. Assim, as substâncias dissolvidas e em suspensão na água bruta devem ser removidas, atendendo certos limites para que possa ser destinada ao consumo público (ALVES, 2010; LIBÂNIO, 2010).

A Portaria do Ministério da Saúde nº 2914, de 12 de dezembro de 2011, no seu capítulo IV, define que a água para consumo humano, é aquela que pode ser ingerida, usada no preparo e produção de alimentos e na higiene pessoal, independentemente da sua origem. Logo, as estações de tratamento de água (ETAs) possuem a função de transformar a água bruta inadequada ao consumo humano em água potável.

A NBR 12.216 (ABNT, 1992) descreve ETA como o conjunto de unidades destinado a adequar as características da água aos padrões de potabilidade, o qual deverá ser entregue para o consumo humano, através de um sistema de abastecimento de água. Este, por sua vez, consiste da instalação composta por um conjunto de obras civis, materiais e equipamentos, desde a zona de captação até as ligações prediais, destinadas à produção e ao fornecimento coletivo de água potável, por meio de rede de distribuição, segundo Portaria nº 2914/11 do Ministério da Saúde.

A Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010), que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, e o Decreto nº 7.404/2010, que a regulamenta, estabelecem que os resíduos sólidos não possam ser lançados em cursos d'água e que as ETAs são responsáveis pelo seu manejo e por informar sobre a possibilidade ou a viabilidade de aproveitamento destes, alertando sobre riscos recorrentes em seu manuseio ou descarte inadequado. Estas informações visam minimizar ou eliminar riscos e impactos à saúde humana e ao meio ambiente.

Em seu artigo 35, o Decreto nº 7.404/2010 afirma que:

“...na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deverá ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos...”, cabendo aos geradores destes resíduos a adoção de medidas adequadas.

Em 2011, foi publicada também a Portaria nº 2.914, que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, especificando que o lançamento nos corpos

d'água de efluentes de ETAs pode comprometer a qualidade destes, e dificultar o seu uso como fonte de abastecimento. Dessa forma, a preservação da qualidade da água das fontes de abastecimento e o destino de seus resíduos, têm grande importância ao se considerar o sistema de abastecimento como um todo.

Os principais processos envolvidos no tratamento da água são: coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção. Além desses processos de tratamento, são adicionados produtos químicos específicos em cada etapa de tratamento. No Brasil, existem cerca de 7.500 estações de tratamento de água chamadas de convencionais ou tradicionais (ACHON et al., 2013).

Reali et al. (2013) ressaltam que a etapa de coagulação envolve a aplicação de produtos químicos (coagulantes) aplicados para desestabilizar as partículas coloidais, que juntamente com precipitados formados pela reação dos coagulantes com a água e sólidos em suspensão formam agregados maiores (flocos) durante a floculação.

A floculação promove a colisão entre as partículas previamente desestabilizadas pela agitação lenta da água, proporcionando condições para a agregação e a formação de flocos com tamanho suficiente para serem removidos por sedimentação na etapa seguinte (REALI et al., 2013).

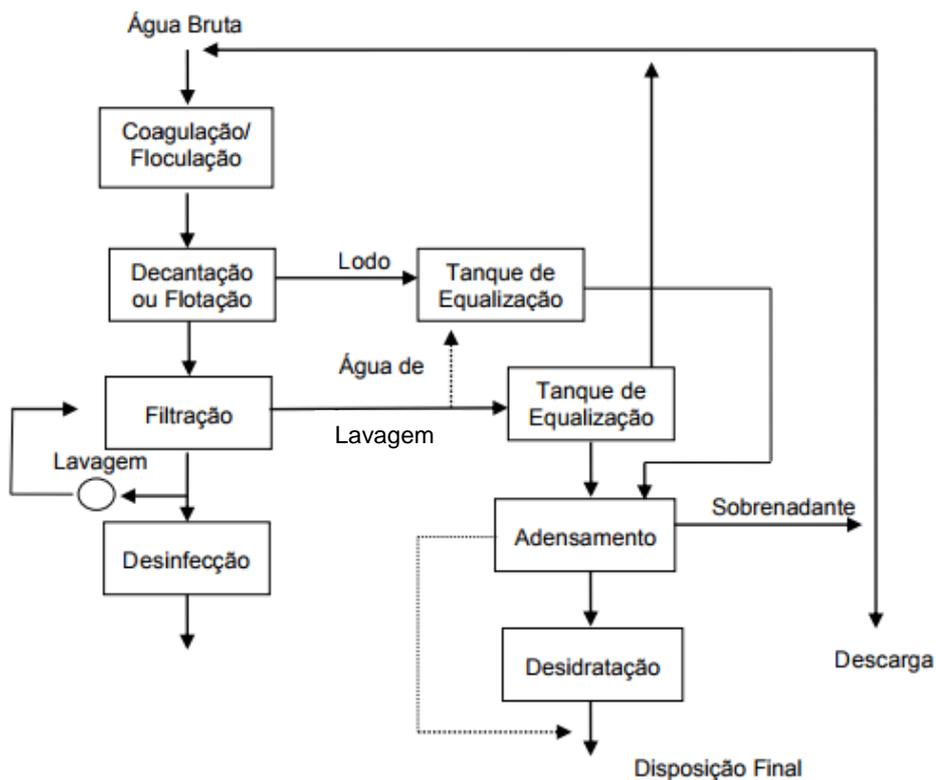
Sedimentação/Decantação: essa é uma técnica eficiente para remoção da matéria em suspensão, dependendo do tamanho e da densidade das partículas existentes e do tempo disponível para o processo. O escoamento da água ocorre de forma mais lenta, propiciando a sedimentação da maior parte dos flocos em suspensão, que se acumulam no fundo dessas unidades, de onde são descartados em forma de lodo. Caso a concentração de partículas mais leves seja excessiva, esse método sozinho não será eficiente e outros meios deverão ser empregados (REALI et al., 2013).

Para a filtração, normalmente se opta pela areia, antracito ou diatomita, materiais com granulometria fina. Nessa etapa ocorre a clarificação final da água, através da passagem da mesma em um leito granular das unidades de filtração (REALI et al., 2013).

Reali et al (2013) resalta que a última etapa de tratamento é a desinfecção. A mesma possui como objetivo a eliminação de organismos patogênicos, sendo normalmente realizada com cloro, flúor e cal hidratada. O cloro elimina os microrganismos nocivos à saúde, garantindo a qualidade da água nas redes de

distribuição e nos reservatórios. O flúor (ácido fluossilício) é adicionado à água, atendendo à Portaria do Ministério da Saúde, reduzindo a incidência das cáries dentárias. A cal hidratada corrige o pH da água, protegendo as canalizações das redes e das casas contra corrosão ou incrustação.

Figura 1 - Fluxograma de uma estação convencional com tratamento de lodos



Fonte: Adaptado de Richter (2001).

Na Figura 1, é apresentado um fluxograma geral, representando a cadeia de processos de uma ETA convencional descritas anteriormente.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DO LODO GERADO NA ETA

A classificação de resíduos envolve a análise do processo ou da atividade que lhes deu origem e de seus constituintes e características, e a identificação desses constituintes em listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. A identificação dos constituintes a serem avaliados na caracterização do resíduo, deve ser criteriosa e estabelecida de acordo com as

matérias-primas, os insumos e o processo que lhe deu origem, segundo a ABNT NBR 10004 (2004).

Para os efeitos dessa Norma, os resíduos são classificados em:

- *Resíduos Classe I* - caracterizados como perigosos, pois são aqueles que apresentam periculosidade. A periculosidade de um resíduo é em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, ou seja, apresentam riscos à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices, e ao meio ambiente (quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada), exigindo tratamento e disposição especiais em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
- *Resíduos classe II A* – resíduos não inertes, denominados não perigosos, podendo apresentar as seguintes propriedades:
 - ✓ Biodegradabilidade;
 - ✓ Combustibilidade ou solubilidade em água.
- *Resíduos classe II B* – resíduos inertes, são quaisquer resíduos que, quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Quaisquer resíduos que, quando amostrados de forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007 (2004), e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006 (2004), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor. O lodo de ETA é classificado, portanto, segundo a ABNT NBR 10004 (2004), como resíduo sólido, e também como Resíduo Classe II A – não inertes, devendo ser tratados e dispostos de acordo com os critérios desta norma.

Conforme Di Bernardo e Dantas (2005), o lodo de ETA pode causar riscos à saúde humana devido à presença de agentes patogênicos. Os mesmos autores alertam ainda quanto aos perigos devido à presença de metais pesados oriundos do

processo de tratamento da água. Dessa forma, se torna necessário o estudo da disposição final adequada do resíduo de ETA, com a finalidade de diminuir os impactos ambientais ocorridos por este lodo. A composição do lodo de ETA varia de acordo com as substâncias utilizadas no tratamento da água. O sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$), cloreto férrico ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), cloreto ferroso ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) e sulfato férrico ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) estão entre as principais substâncias químicas adotadas para o tratamento da água (FYTIANOS et al., 1998; ROSA et al., 2012). Essas substâncias geram um lodo rico em alumínio e ferro. Porém, o que interfere também nas características quantitativas e qualitativas do lodo é a qualidade da água bruta, dos produtos químicos utilizados no tratamento, das próprias condições de operação de cada unidade de tratamento e o tempo de permanência do lodo nos decantadores.

Entre as principais alternativas de disposição de lodos, pode-se incluir o lançamento na rede coletora, em lagoas com largo tempo de deposição, aplicação direta no solo, aterros sanitários e aproveitamento de subprodutos. A maior parte das companhias de tratamento de água dispõe o lodo em aterros (RICHTER, 2001).

A resolução nº 430, de 13 de maio de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) determina as condições, parâmetros, padrões e diretrizes para a gestão do lançamento de efluentes em corpos de água receptores, que devem ser cumpridas para o lançamento de efluentes de qualquer fonte poluidora. Tais condições impedem o lançamento, sem prévio tratamento, do lodo produzido nas ETA, devido à grande concentração de sólidos sedimentáveis presentes nesse resíduo. Portanto, esta legislação exige maiores cuidados com a disposição do lodo de tratamento do processo de potabilização da água.

Ao se minimizar a quantidade de resíduos, conseqüentemente os custos de tratamento e disposição serão menores. Desta forma, se diminui a quantidade de matéria-prima utilizada na produção e dos insumos de energia necessários, reduzindo, assim, a quantidade de material extraído do meio ambiente, os custos nas indústrias e os passivos e impactos ambientais (RICHTER, 2001).

2.3 ADIÇÕES MINERAIS

As adições minerais são materiais silicosos ou sílico-aluminosos que podem ser adicionados ao concreto em porcentagens pré-determinadas de substituição ao

cimento Portland. Com o emprego desses materiais, as indústrias reduzem a poluição atmosférica com a emissão de gás carbônico. O uso de adições minerais na indústria do cimento e do concreto, substituindo parcialmente o clínquer ou cimento, não só reduz o impacto ambiental causado pelos resíduos dispostos inadequadamente, mas também reduz o volume de extração de matérias-primas por parte da indústria da construção civil (DAL MOLIN, 2005).

De acordo com Dal Molin (2005), o setor da construção civil é o maior consumidor individual de recursos naturais, utilizando cerca de 20 e 50% do total de recursos naturais consumidos pela sociedade. A classificação das adições minerais para concreto são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 - Classificação das adições minerais para concreto.

Cimentantes	Escória granulada de alto-forno
Cimentantes e Pozolânicos	Cinza Volante com alto teor de cálcio (CaO 10%)
Superpozolanas	Sílica ativa, metacaulim, cinza de casca de arroz produzida por combustão controlada (predominantemente amorfa)
Pozolanas comuns	Cinza volante com baixo teor de cálcio (CaO<10%), argilas calcinadas, cinzas vulcânicas
Pozolanas pouco reativas	Escórias de alto-forno resfriadas lentamente, cinza de casca de arroz predominantemente cristalina
Fíler	Calcáreo, pó de quartzo, pó de pedra

Fonte: Adaptação de Mehta e Monteiro (2008).

A NBR 12653 (ABNT, 2014) define pozolanas como um material que, por si só, possui pouca ou nenhuma atividade cimentícia, mas, quando finamente dividido e na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades cimentantes. Três classes foram criadas para sua divisão: Classe N (pozolanas naturais, de origem vulcânica e pozolanas artificiais, subprodutos industriais provenientes de tratamento térmico); Classe C (cinzas volantes, resíduos provenientes da queima do carvão mineral em termelétricas); Classe E (demais pozolanas as quais se diferem das classes anteriores).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008) a descrição das reações pozolânicas e das propriedades dos cimentos Portland compostos, fica claro que os benefícios de engenharia a serem provavelmente derivados do emprego de aditivos minerais

no concreto incluem melhora da resistência à fissuração térmica devido ao calor de hidratação mais baixo, aumento das resistências e da impermeabilidade por refinamento dos poros, e (como resultado de redução da alcalinidade) uma durabilidade maior aos ataques químicos, tais como, águas sulfatadas e expansão álcali-agregado.

As adições mais conhecidas e estudadas visando à melhora no desempenho do concreto sob aspectos como resistência mecânica e durabilidade são: a cinza volante, a sílica ativa, o metacaulim e a escória de alto forno. Estas, por suas características próprias, podem aumentar a fixação de cloretos e/ou reduzir a permeabilidade do concreto (BALESTRA, 2017).

Sobre a cinza volante, Cheewaket et al. (2012), Shi et al. (2012) e Camacho et al. (2014) pontuam que este é um dos produtos obtidos a partir da combustão de carvão mineral para a produção de energia elétrica, sendo seu uso no concreto recorrente em várias partes do mundo. Segundos os autores, pesquisas na literatura apontam os efeitos positivos da adição de cinza volante através da maior capacidade de fixação química de cloretos devido a grande quantidade de aluminatos em sua composição.

Com relação à sílica ativa, esta é produto da manufatura de ligas ferro-silício. A sílica por sua vez tem como propriedade um refinamento de poros na microestrutura do concreto reduzindo a penetração dos cloretos (SHI et al., 2012; CAMACHO et al., 2014), além de ser uma adição bastante reativa, capaz de reagir com o hidróxido de cálcio presente na microestrutura do concreto para gerar gel C-S-H, um produto que contribui para a maior resistência à compressão do concreto.

O metacaulim e a sílica ativa consomem a portlandita e refinam a microestrutura de poros do concreto, além de aumentar a resistência na zona de interface agregado-matriz (Shi et al., 2012, Wang et al., 2014). Badogiannis et al. (2015) demonstraram que a incorporação de metacaulim diminui a quantidade de cloretos totais no concreto em todas as profundidades, quando exposto aos cloretos, comparado à um concreto sem essa adição. Tal fato se deve à diminuição do coeficiente de difusão dos cloretos ocasionado pelo metacaulim.

Os efeitos da escória de alto forno também se manifestam através do refinamento de poros e do aumento na capacidade de fixação química de cloretos devido à presença de aluminatos (SHI et al., 2012; MAES; DE BELIE, 2014; CAMACHO et al., 2014).

2.3.1 Lodo de ETA

Teixeira et al (2011) estudaram a viabilidade de incorporação de lodo de ETA na fabricação de tijolos cerâmicos, analisando os efeitos que o silte, areia e argila exercem perante as propriedades do corpo cerâmico. Os autores concluíram que a composição química do lodo é semelhante a matéria-prima original adotada para produção dos tijolos de cerâmica vermelha. Através de ensaios tecnológicos por sondas, a incorporação do resíduo de ETA na produção de tijolos cerâmicos foi viável. Porém, a concentração de lodo incorporada dependerá do tamanho dos grãos, da composição e distribuição químico e mineral, e das propriedades da matéria-prima, as quais se queira alcançar.

Richter (2001, p. 96) menciona também que “os principais componentes do cimento são CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 ”, encontrados também nos lodos de ETAs sendo passíveis de substituição das matérias primas na fabricação de cimento. Boulomytis (2007, p. 3) aborda a possibilidade de se usar esses materiais como matéria-prima no processo de produção do cimento, uma vez que, por meio da utilização deste lodo será possível reduzir o uso de recursos naturais normalmente empregados neste processo, sendo também considerada uma disposição adequada, levando em conta que o volume de lodo de ETA gerado no país se torna cada vez maior, a medida de que a população passar a receber água tratada para seu abastecimento.

A incorporação de lodo de ETA em matriz de concreto, segundo Cordeiro (1999), é uma prática ecologicamente correta de disposição final do resíduo, podendo trazer benefícios para as estruturas, como o aumento da resistência e durabilidade. Testes de resistência a compressão axial e absorção capilar foram realizados por Sales et al. (2004), em amostras de concreto com adição de lodo seco e resíduos de demolição em substituição aos agregados convencionais. Em se tratando especificamente do lodo, os autores analisaram os resíduos de três diferentes ETAs, concluindo a não influência da variação do tipo de lodo na resistência mecânica dos traços estudados. Ao substituir o agregado miúdo por lodo, os melhores resultados obtidos foram de 3% em se tratando das características mecânicas.

Ao avaliar concretos com percentuais de 3%, 5% e 7% de lodo de ETA a 110°C em relação ao peso do agregado miúdo, Batalha et al. (2009), obteve

resistências a compressão axial de 27,51 MPa, 26,82 MPa e 30,95 MPa, respectivamente. Batalha e Rocha (2013), após moagem de 16 horas e calcinação do lodo de ETA a 650°C, encontraram através de análise química Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3 , nas quantidades 54,9%, 27,5% e 12,3%, respectivamente, e partículas com diâmetro médio de 13 μm . Indicando ser possível a substituição de parte do cimento em produtos de argamassa por lodo calcinado.

Visando a reutilização do resíduo gerado pelas ETAs, Batalha e Rocha (2013), através de difração de raios X encontraram mineral argiloso, metacaulinita e quartzo. Pela análise de termogravimetria (TG), a cinza obteve perda de massa de 9,3% e na análise termogravimétrica diferencial (DTG) com temperatura de 800,82 °C ocorreu a quebra da metacaulinita pela formação da mulita primária. Logo concluíram que os componentes do lodo calcinado a 650°C fazem parte da composição do cimento Portland.

Lara et al. (2011) investigaram a influência de argila calcinada e moída em substituição ao cimento Portland (30%) na resistência à compressão, microestrutura e características de durabilidade de microconcretos. Observaram que, quando comparado em igualdade de substituição a um material inerte, os microconcretos compostos com argila calcinada apresentaram resistência à compressão 40% superior. A substituição parcial do cimento Portland por argila calcinada reduziu a porosidade capilar, a sorção e favoreceu a formação de produtos de hidratação estáveis como o hemicarbonato e monocarbonato.

Martirena et al. (2011) investigaram a possibilidade de uso como material pozolânico de uma argila com baixo teor de caulinita (<40%). Esses materiais são normalmente desconsiderados quando pozolanas altamente ativas como o metacaulim são disponíveis. Essa argila foi calcinada a temperatura de 600, 800 e 900° C e avaliada com relação a sua atividade pozolânica. O tratamento térmico induz a uma redução na superfície específica, associada com transformação mineralógica que ocorre. O material calcinado a 800°C apresenta melhor desempenho quando avaliado em termos de consumo de CH e resistência mecânica. O material calcinado a 900°C apresenta atividade pozolânica marginal no estado natural, mas se moído, recupera significativamente a sua reatividade. Os materiais estudados apresentam reatividade similar ao produto comercial conhecido como metacaulim. Dessa forma, o uso de uma argila de baixa qualidade para produção de pozolana não poder ser descartada em países em desenvolvimento.

Para Gastaldini et al (2015), a análise dos resultados da determinação da concentração de hidróxido de cálcio fixo por método de Chapelle - mostrou que os melhores resultados são obtidos com temperatura de calcinação de 700 C por 30 min. No entanto, esse valor é muito próximo ao obtido com temperatura de calcinação de 600° C durante 1 h, que requer menos energia. O valor resultante é mais do que o dobro do limite necessário para classificar um material com atividade pozolânica. Uma comparação no desempenho das misturas estudadas, usando a mesma concentração de CLETA, CCA e SA (sílica ativa) com a substituição do cimento, mostra que os valores obtidos com o uso de CELTA são maiores, confirmando a viabilidade de usar este material. A CCA e SA mostraram maiores resultados de hidróxido de cálcio fixado no teste de Chapelle quando comparado com a CLETA, o que indica que esse teste não pode ser usado para excluir a possibilidade de usar esta adição mineral.

Assim, a utilização da CLETA em concretos tem se justificado pelos benefícios ambientais com a destinação adequada para este resíduo.

2.3.2 Escória de alto forno

O ACI 116R define a escória granulada de alto forno como sendo um subproduto não metálico formado durante a fundição do minério de ferro em alto forno que, ao sofrer resfriamento brusco, se transforma em pequenas partículas compostas basicamente por silicatos e alumino-silicatos de cálcio. Devido ao seu alto teor de cálcio, as escórias, na presença de umidade, adquirem propriedades cimentantes.

Segundo Jacomino et al. (2002), para que a escória possua atividade hidráulica, ela deve apresenta-se no estado amorfo. Esta disposição química é obtida por um resfriamento rápido, na qual a escória líquida a 1500°C atinge a temperatura de 200°C evitando associações dos átomos segundo as próprias afinidades. Tal resfriamento é denominado de granulação, onde a escória em fusão cai sobre uma roda dentada que projeta pequenos grãos, resfriada através de jato d'água.

Segundo Neville (2013), a escória contém óxido de cálcio, sílica e alumina, mas não nas mesmas proporções que no cimento Portland, e sua composição pode

apresentar grandes variações. Algumas vezes esses cimentos são denominados cimento de escória.

A hidratação da escória se inicia quando a cal liberada na hidratação do cimento portland proporciona a alcalinidade adequada, sendo que a continuação da hidratação não depende da cal.

A ASTM C989-05 estabelece para a escória granulada de alto forno moída percentual máximo de 20% de grãos maiores que 45 μm . O aumento da finura do cimento portland acompanhado pela otimização de teor de SO_3 resulta em aumento da resistência.

A escória granulada pode ser moída na finura que se deseje, embora seja comumente moída a uma finura maior que aquela do cimento Portland, com o objetivo de obter maior atividade hidráulica nas primeiras idades.

Em conformidade às particularidades da escória, pode-se concluir que os efeitos benéficos oriundos do seu emprego no concreto são: liberação de calor mais lenta na hidratação, reduzindo o pico de temperatura (SIVASUNDARAM; MALHOTRA, 1992); melhora de consistência do concreto fresco estrutura mais compacta da pasta de cimento hidratada, resultando em maior durabilidade e aumento da resistência em idades mais avançadas.

Desta forma, seu emprego se justifica em obras de concreto-massa, nas quais há necessidade de redução do calor de hidratação, como em barragens, por exemplo.

Para ratificar os benefícios proporcionados pela utilização da escória no concreto, Roy (1992) comenta que estudos já provaram que pastas, argamassas e concretos preparados com quantidades substanciais de escória são cada vez mais reconhecidos por sua durabilidade e, em particular, por sua resistência à penetração de cloretos e difusão de vários agentes potencialmente agressivos, incluindo sulfatos e cloretos.

2.3.3 Cinza de casca de arroz

O arroz (*Oryza sativa* L) é um dos importantes produtos do agronegócio nacional. É consumido quase que diariamente pela ampla maioria da população e representa um volume expressivo da produção de grãos do país, sendo responsável

por significativa parcela da renda de um grande número de produtores rurais (MACHADO et al., 2006).

O cultivo do arroz teve início com a chegada de imigrantes alemães, em 1857, na Colônia de Santo Ângelo, atual cidade de Agudo, na Depressão Central do Rio Grande do Sul (PLANETA ARROZ, 2008).

Atualmente, o Estado do Rio Grande do Sul é responsável por mais de 65% da produção nacional de arroz, deve ter acréscimo de 3,7% na produção sobre a colheita anterior. É também o estado com a maior produtividade, de 7,5 t/ha (Ministério da Agricultura, 2013).

A casca de arroz é a carapaça produzida durante a operação de beneficiamento do arroz colhido (palha de arroz mais arroz em casca). Sendo volumosa, a casca apresenta um sério problema de acúmulo para as centrais beneficiadoras de arroz.

Cada tonelada de arroz em casca produz em torno de 200 kg de casca, o que por combustão não controlada em fornos industriais, geralmente contém uma grande proporção de minerais de sílica não reativos tais como a cristobalita e tridimita, e devem ser moídos em tamanhos de partículas muito finas, de modo a desenvolver atividade pozolânica. Por outro lado, uma cinza altamente pozolânica pode ser produzida por combustão controlada quando a sílica é mantida na forma não cristalina e em estrutura celular (MEHTA; MONTEIRO, 1994). O resíduo proveniente do beneficiamento do arroz na indústria tem sido utilizado para produção de energia gerada a partir da queima deste material, restando a cinza que tem como destino final, na maioria dos casos as lavouras ou a substituição parcial do cimento na construção civil.

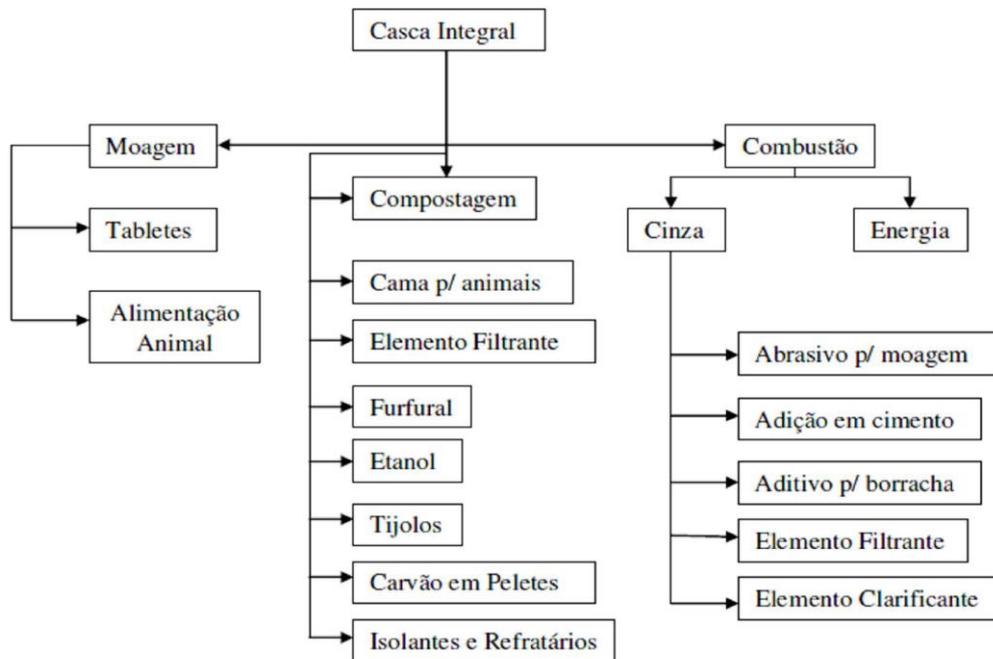
Da Silva (2009) considera que o aproveitamento industrial da casca de arroz, como matéria-prima, faz-se oportuno devido ao seu baixo custo, além de sua contribuição para diminuir os problemas ambientais.

Santos (2006), em seu estudo, ratificam que o uso comercial da CCA, além de diminuir o volume de resíduo disposto no meio ambiente, deixa de ser um problema e torna-se matéria-prima, aumentando a renda das beneficiadoras de arroz.

A Figura 2 aponta algumas opções de utilização para casca de arroz. Segundo Foletto et al. (2005), a cinza de casca de arroz, por possuir alto teor de sílica (>92%), torna-se um resíduo valorizado, no entanto, apenas se tiver alta

qualidade, a qual é mensurada pela alta superfície específica, pelo tamanho e pureza das partículas. Por serem compostas basicamente de sílica, a CCA pode ser utilizada como matéria-prima de diversos materiais em diferentes ramos industriais, como o da construção civil, o da cerâmica e de vidros (FOLETTTO et al., 2005).

Figura 2 - Principais usos da casca de arroz



Fonte: Da Silva (2009).

Tendo em vista o melhor desempenho do concreto com cinza frente à várias características, Mehta (1992) concluiu que o uso dessa adição mineral deve ser levado em conta não apenas pela questão ambiental e pelo baixo custo, mas também pelas questões de segurança e durabilidade.

2.4 AÇÃO DE ÍONS CLORETO

O ataque por cloretos ocorre devido ao fato de que o ponto de ação principal é a corrosão da armadura, e é somente em consequência da corrosão que o concreto circundante é danificado. A corrosão das armaduras é uma das principais causas da deterioração de estruturas de concreto armado em diversos locais (NEVILLE, 2016).

2.4.1 Mecanismos de transporte no concreto

Uma das maiores ameaças ao reforço de aço no concreto é o íon de cloreto. Os cloretos podem penetrar o concreto a partir do ambiente externo através de vários processos de transporte de massa. Eles também podem ser introduzidos como contaminantes em materiais constituintes ou como o cloreto de cálcio usado como ingrediente de aceleração. O uso desse composto não é mais permitido em concreto armado e protendido, como resultado de sua natureza corrosiva (DYER, 2015).

O transporte dos agentes agressivos no concreto é regido por mecanismos físico-químicos, mecanismos esses que dependem do fluxo da substância e de sua concentração, das condições ambientais, da velocidade de renovação dos agentes agressivos, da estrutura e dimensões dos poros, do grau de saturação dos poros e da temperatura. Os mecanismos de transporte mais importantes são a permeabilidade, a difusão, a absorção capilar e a migração, podendo ainda existir a combinação entre eles (DA SILVA, 2012).

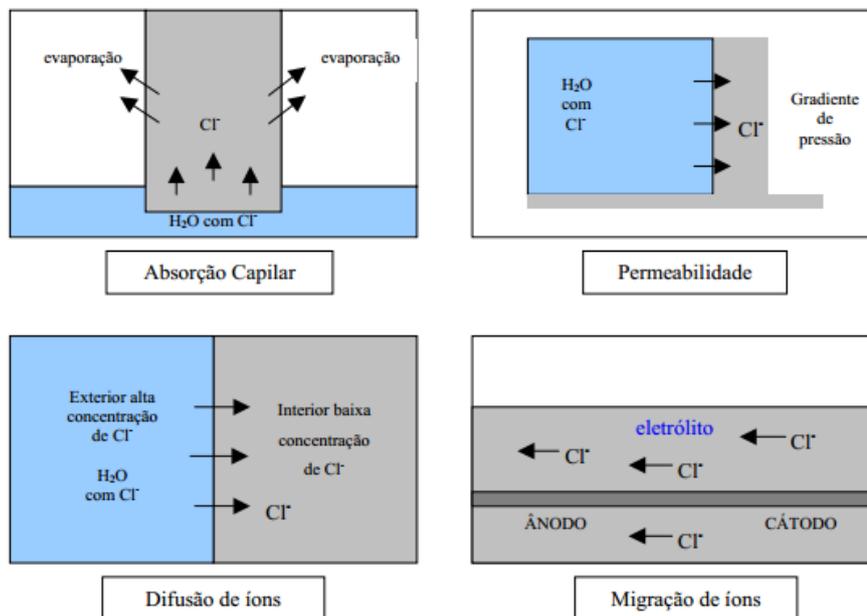
Uma das principais razões para o ingresso de cloretos no concreto ser de tanta preocupação para os engenheiros é a grande possibilidade dos cloretos entrarem em contato com as armaduras de reforço. No ambiente de construção, cloretos solúveis são mais comumente encontrados em duas fontes: água do mar e sais descongelantes em autoestradas. Os cloretos da água do mar ocorrem principalmente como cloreto de sódios, de magnésio, e de cálcio. O sal descongelante mais comum é o cloreto de sódio, mas também podem ser usados, o cloreto de magnésio e o de cálcio. A exposição ao ácido clorídrico também oferece uma fonte de íons cloreto, juntamente com a corrosão do próprio concreto (DYER, 2015).

Para Mehta e Monteiro (2008), a água é considerada o principal agente de destruição de materiais, pois é capaz de penetrar em poros extremamente finos, possui uma alta temperatura de evaporação e dissolve mais substâncias do que qualquer outro líquido, inclusive íons agressivos que podem causar a decomposição química de materiais sólidos.

O estudo da durabilidade das estruturas de concreto armado tem evoluído devido ao maior conhecimento dos mecanismos de transporte de líquidos e gases nos meios porosos, como o concreto (MEDEIROS et al., 2011).

Portanto, o conhecimento e entendimento dos mecanismos de transporte no concreto são de fundamental importância para obtermos um concreto durável e que atenda à vida útil estimada em projeto. A Figura 3 apresenta uma representação esquemática dos mecanismos de transporte de íons cloreto no concreto.

Figura 3 - Representação esquemática dos mecanismos de transporte de íons cloreto no concreto



Fonte: Adaptado de Helene (1993).

2.4.1.1 Permeabilidade e Durabilidade

A durabilidade do concreto é uma de suas propriedades mais importantes, pois é essencial que ele seja capaz de suportar as condições para as quais foi projetado durante a vida da estrutura.

A falta de durabilidade pode ser causada por agentes externos advindos do meio ou por agentes internos ao concreto. As causas podem ser classificadas como físicas, mecânicas, e químicas.

As causas físicas vêm da ação do congelamento e das diferenças entre as propriedades térmicas do agregado e da pasta de cimento, enquanto as causas mecânicas estão associadas principalmente à abrasão (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A distribuição granulométrica dos agregados tem influência na permeabilidade do concreto. Devem-se dosar os agregados de maneira a se obter uma mistura final de máxima compactidade, para conseguir os concretos menos permeáveis. Se a mistura final tiver uma distribuição descontínua, os concretos resultam permeáveis e de baixa trabalhabilidade (BAUER, 2000).

Permeabilidade é a facilidade com a qual os líquidos ou gases podem se movimentar através do concreto. Essa propriedade é de interesse para a estanqueidade de estruturas destinadas à contenção de líquidos e para o ataque químico (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Mehta e Monteiro (2008) relatam que a permeabilidade é um dos principais mecanismos de transporte que influenciam na deterioração do concreto, pois uma estrutura com alta permeabilidade fica mais suscetível ao ataque de agentes agressivos.

A permeabilidade é uma propriedade que depende principalmente da quantidade e tipo de aglomerante e adições minerais, relação a/ag e condições de cura, pois são fatores que governam a formação da porosidade no concreto (ISAIA, 1995).

2.4.1.2 Absorção Capilar

Este mecanismo de transporte de líquidos se dá através dos poros capilares devido à tensão superficial do líquido. A entrada depende de características do líquido, como viscosidade, densidade e tensão superficial. Também depende de fatores relacionados ao concreto quanto à estrutura da rede de poros e às condições de umidade.

Dyer (2015) afirma que, a ação capilar desempenha seu papel mais significativo em situações onde ocorrem umedecimento e secagem cíclicos. Tais situações incluem aquelas nas zonas atmosféricas, úmida e de maré de estruturas costeiras e marítimas e em ambientes de autoestradas. O processo de ação capilar é relativamente rápido e, portanto, desempenha um papel importante no início do mecanismo de ingresso. Além do mais, a repetição desse processo, onde umedecimento e secagem cíclicos ocorrem, leva os cloretos a serem depositados nos poros do concreto durante a secagem, seguidos de um novo suprimento de

cloretos durante o próximo período de umedecimento, potencialmente levando ao acúmulo de cloreto sob a superfície.

Segundo Helene (1993), a absorção não acontece em concretos saturados e para que ocorra é necessário que os poros estejam total ou parcialmente secos.

A entrada de íons cloreto pelo mecanismo de absorção capilar acontece quando estes estão dissolvidos em água. Conforme Santos (2000) é bastante comum quando o concreto é exposto a ciclos de molhagem e secagem, condição esta mais próxima à realidade das estruturas expostas ao ambiente externo.

Enquanto a permeabilidade trata de fluxo do líquido em um material saturado sob pressão, a absorção caracteriza o fluxo em materiais secos, mecanismo este mais próximo à realidade das estruturas (MISSAU, 2004).

Para Cascudo (1997), a absorção depende da interconexão e principalmente do diâmetro dos poros. O autor afirma que, quanto menor for o diâmetro, maior será a força de sucção capilar. Helene (1993) afirma que os fatores que controlam o diâmetro dos poros do concreto são a relação a/c, grau de hidratação e a composição do cimento (modificada com o uso de adições minerais). Uma das formas de controle da absorção capilar é o uso de aditivo incorporador de ar. Este permite a formação de pequenas bolhas de ar no interior do concreto que têm a função de interromper a rede de poros diminuindo assim a capilaridade do conjunto.

SPERB, 2003 afirma que a ocorrência da carbonatação provoca um decréscimo considerável na capacidade de absorção do concreto. Mesmo que a absorção não seja usada como uma forma de medir a qualidade do concreto, afirma-se que, dentre os concretos de boa qualidade, a absorção sempre esteja abaixo de 10% em massa (NEVILLE, 1997).

2.4.1.3 Migração e Difusão

Migração é o mecanismo de transporte no concreto que acontece quando há ocorrência de um campo elétrico, provocando a movimentação de carga elétrica pelos íons presentes (HELENE, 1993; FERREIRA, 1996; LOPES, 1999).

De acordo com Kulakowski (1994), este campo elétrico pode ser proveniente da existência de pilhas de corrosão eletroquímica ou de uma diferença de potencial gerada por uma fonte externa.

O transporte por difusão consiste no movimento de substâncias devido à diferença de concentração e o fluxo de substâncias gerado tende a equilibrar as concentrações (CEB, 1989; ANDRADE, 1992; LOPES, 1999).

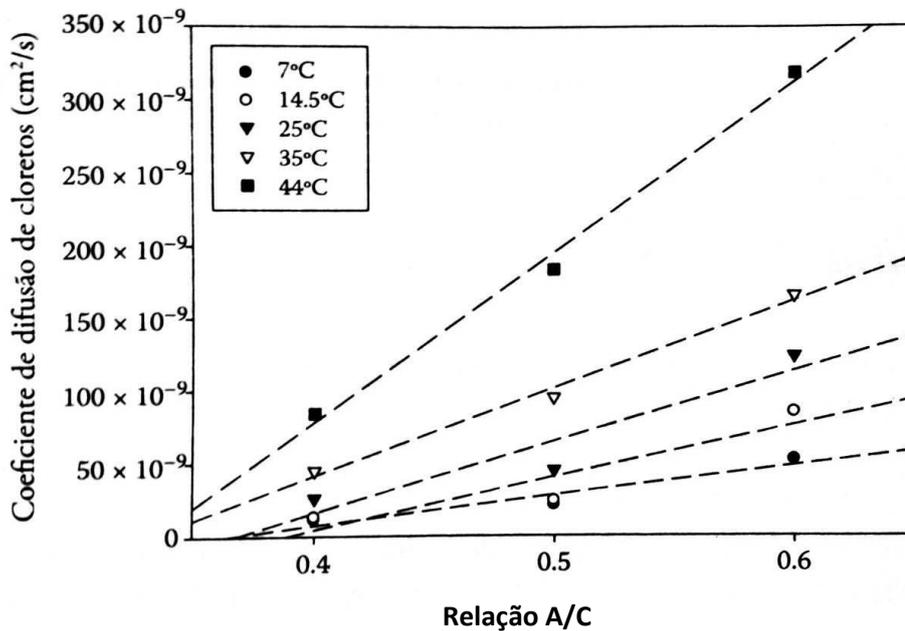
Conforme LIN (1990), quanto maior for o gradiente de concentração, mais intenso será o fenômeno. Além da difusão de gases, íons de caráter agressivo, particularmente cloretos e sulfatos, se deslocam por difusão na água dos poros.

É nessa água que ocorrem as reações com a pasta de cimento hidratada de modo que a difusão iônica é importante com relação ao ataque por sulfatos ao concreto e ao ataque de cloretos à armadura. No concreto constantemente imerso em água a difusão de íons é considerada dominante no transporte de cloretos (ZHANG et al., 1998; DHIR et al., 1998).

De acordo com Dyer (2015), na ausência de fissuras, a difusão do cloreto pelo concreto é muito mais dependente da natureza da porosidade. Um baixo coeficiente de difusão (e , conseqüentemente, uma baixa taxa de difusão) é obtida quando a fração do volume total de porosidade é baixa, sua constritividade é baixa e sua tortuosidade é alta. A constritividade é uma medida da extensão em que as alterações na largura dos poros juntamente com o seu comprimento dificultam a difusão de agentes químicos. A tortuosidade é uma medida da extensão em que um agente químico deve se desviar de uma rota direta quando se difunde do ponto A para o ponto B através da rede de poros do concreto.

O efeito de fração do volume de porosidade na difusão de cloretos no concreto é melhor ilustrado em termos da relação a/c . Como mostra na Figura 4 que plota o coeficiente de difusão de cloretos versus a relação a/c para pastas de cimento Portland endurecido. Similarmente, à medida que o grau de hidratação do cimento aumenta, o volume total de porosidade cai, reduzindo o coeficiente de difusão.

Figura 4 - Influência da relação a/c nos coeficientes de difusão de cloretos de pastas de cimento Portland endurecido



Fonte: De Page et al. (1981) e Dyer (2015).

Dyer (2015), afirma que conforme progride o ingresso de cloretos, o volume de porosidade declina na camada exterior do concreto. Isso se deve supostamente à formação do sal de Friedel nos poros.

O principal fator que influencia a taxa de difusão de cloretos é a presença de fissuras. A difusão por fissuras pode ser vista exatamente da mesma forma que a difusão pelos poros, embora a largura das fissuras possa ser de muitas vezes a dos poros na pasta de cimento endurecida. Assim, as fissuras apresentam um caminho relativamente desimpedido para os cloretos pelo cobrimento de concreto, e, portanto, o concreto fissurado apresenta coeficientes de difusão significativamente maiores que o material não danificado (DYER, 2015).

Os fatores ambientais que influenciam na difusão de cloretos são: a concentração de íons de cloreto, os cátions associados aos cloretos e a temperatura.

Neville (2016) ressalta que a difusão iônica é mais efetiva quando os poros da pasta de cimento endurecida estão saturados, mas ela também pode ocorrer em concretos parcialmente saturados. Da mesma forma que a permeabilidade, a difusão

é menor com relações água/cimento mais baixas, mas a influência da relação água/cimento na difusão é muito menos do que na permeabilidade.

A difusão através da água é quatro ordens de grandeza maior que a difusão através do ar, variando também com a idade porque o sistema de poros do concreto torna-se mais fechado com a evolução da hidratação do cimento (NEVILLE, 2016).

O problema do ataque por cloretos geralmente surge quando íons cloreto são provenientes do meio. Isso pode ser causado por sais descongelantes, água do mar em contato com o concreto, névoa marinha, entre outros (LIN, 1991).

Qualquer que seja a origem, os cloretos penetram no concreto pela movimentação da água contendo cloretos, bem como por difusão dos íons na água e por absorção. O ingresso prolongado e repetido pode, com o tempo, resultar em altas concentrações de íons cloreto junto à superfície do aço da armadura (NEVILLE, 1997).

O ingresso de cloretos é progressivo em concretos ora expostos à água do mar ora secos, pois o concreto seco vai sendo embebido por água do mar por absorção e, em certas condições, até a saturação.

Se as condições externas passarem a mais secas, inverte-se o movimento da água e ela evapora pelas extremidades dos poros capilares abertas ao ar. No entanto, é a água pura que se evapora, permanecendo os sais. Assim, aumenta a concentração salina da água nas proximidades da superfície do concreto.

O gradiente de concentração que se origina faz com que o sal da região superficial se desloque para as partes de menor concentração, através do transporte por difusão (NEVILLE, 1997). Como resultado deste processo a concentração de cloretos decresce da superfície para o interior do concreto (CEB, 1989).

O transporte de cloretos resultante do processo de difusão, quando se considera o período de iniciação, segundo Tuutti citado por Isaia (1995) depende dos seguintes parâmetros:

- Concentração diferencial de cloretos entre o ambiente e o concreto;
- Distância de transporte, dependente da espessura de cobrimento;
- Permeabilidade do concreto contra cloretos;
- Capacidade do concreto de fixar cloretos (conteúdo de álcalis do cimento);
- Concentração de cloretos na superfície do concreto.

2.5 CORROSÃO DAS ARMADURAS

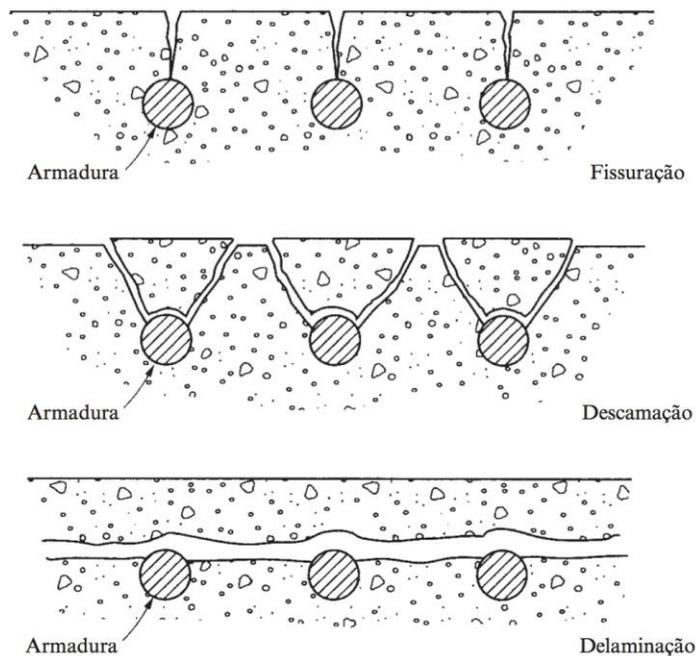
A corrosão das armaduras é a causa primordial de problemas no contexto dos edifícios. As manifestações se dão sob a forma de lascamentos e destacamentos de concreto em função das armaduras muito próximas da superfície, recobertas de produtos de corrosão e podendo gerar manchas ferruginosas. Esses eventos, em geral, não comprometem a estabilidade do edifício, contudo, produzem uma forte deterioração estética (LAURENS, 2014). Os autores ainda afirmam que a corrosão das armaduras é, neste caso, principalmente devida à carbonatação do concreto, já que, basicamente, a ação dos cloretos atinge apenas as estruturas do ambiente marinho ou expostas aos sais de degelo. Os fenômenos de corrosão podem ser relativamente rápidos, como nos casos de porosidade excessiva do material e/ou de espessura insuficiente do cobrimento (LAURENS, 2014).

Segundo Neville e Brooks (2013), a natureza fortemente alcalina do Ca(OH)_2 (pH na casa de 13) previne a corrosão da armadura pela formação de uma fina camada protetora na superfície do metal. Essa proteção é conhecida como passivação. Entretanto, caso o concreto seja permeável de modo que a carbonatação atinja o concreto em contato com o aço ou que soluções com cloretos possam penetrar até a armadura.

A camada passivadora de óxido de ferro é destruída quando o pH cai abaixo de 11,0; a carbonatação diminui o pH para cerca de 9,0. A formação de compostos ferrosos expansivos resulta em um aumento do volume em relação ao aço original, de modo que as tensões de expansão causam fissuração e lascamento do concreto (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Existem duas consequências da corrosão da armadura. A primeira é que os produtos da corrosão ocupam um volume, muitas vezes, maior do que o aço original, de modo que sua formação resulta em fissuração (caracteristicamente paralela à armadura), descamação e delaminação do concreto (Figura 5).

Figura 5 - Representação esquemática das deteriorações induzidas pela corrosão: fissuração, descamação e delaminação



Fonte: Neville (2016).

Isso facilita o ingresso de agentes agressivos na armadura, o que faz ocorrer um aumento da velocidade de corrosão. A segunda é que o progresso da corrosão no ânodo reduz a área da seção transversal do aço, diminuindo, assim, sua capacidade resistente. Em relação a isso, deve ser mencionado que a corrosão induzida por cloretos é altamente localizada em um pequeno ânodo, o que leva à corrosão puntiforme (corrosão por pites) (NEVILLE, 2016).

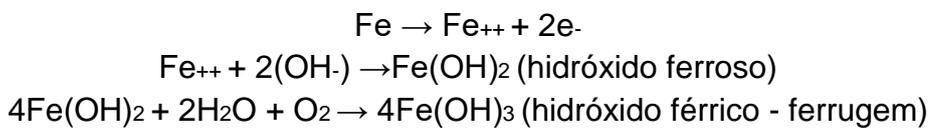
Neville (2016) ainda afirma que, quando o suprimento de oxigênio é severamente limitado, pode ocorrer a corrosão em baixa velocidade. Os produtos da corrosão, que são menos volumosos do que nas condições normais, podem se deslocar para os vazios do concreto sem o progressivo desenvolvimento da fissuração ou da descamação.

Para Cascudo (1997), o mecanismo de corrosão eletroquímica gera a formação de pilhas eletroquímicas, que podem estabelecer-se entre dois metais diferentes ou em regiões diferentes de um mesmo metal. Em resumo, na corrosão eletroquímica em meio aquoso, há a formação de íons metálicos e a liberação de elétrons na região anódica, na qual ocorre a oxidação do metal (região deteriorada), e, simultaneamente, há o consumo de todos esses elétrons na região catódica e a

redução dos íons do eletrólito, isto é, a neutralização dos íons de hidrogênio ou a formação de íons carregados negativamente.

O resultado da combinação dos produtos das reações anódicas e catódicas gera os produtos finais de corrosão (CASCUDO, 1997). As reações do processo corrosivo são bastante complexas e numerosas, porém podem ser apresentadas de maneira simplificada (ver Figura 6), da seguinte forma:

a) Nas regiões anódicas (corroídas):



b) Nas regiões catódicas (não corroídas):

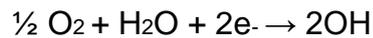
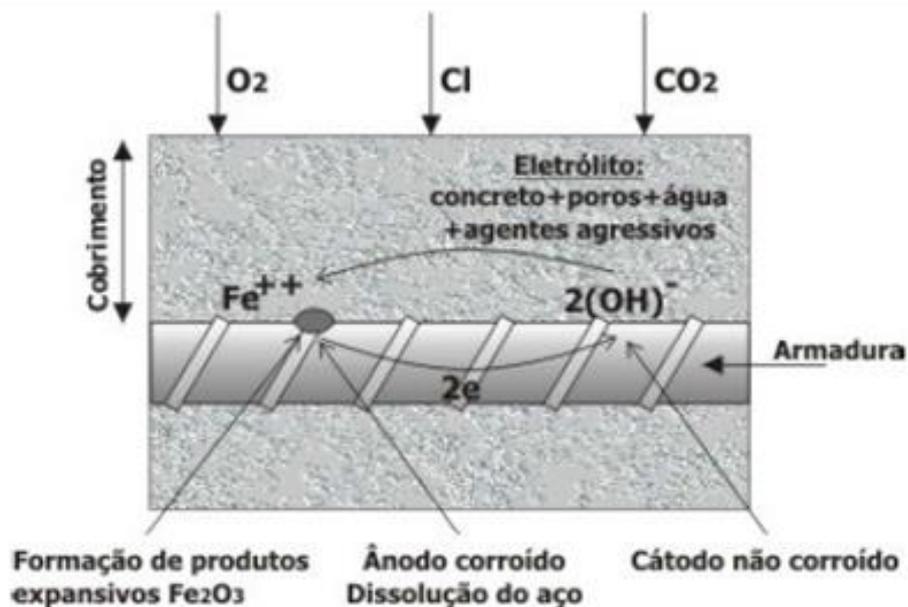


Figura 6 - Modelo da célula de corrosão no concreto



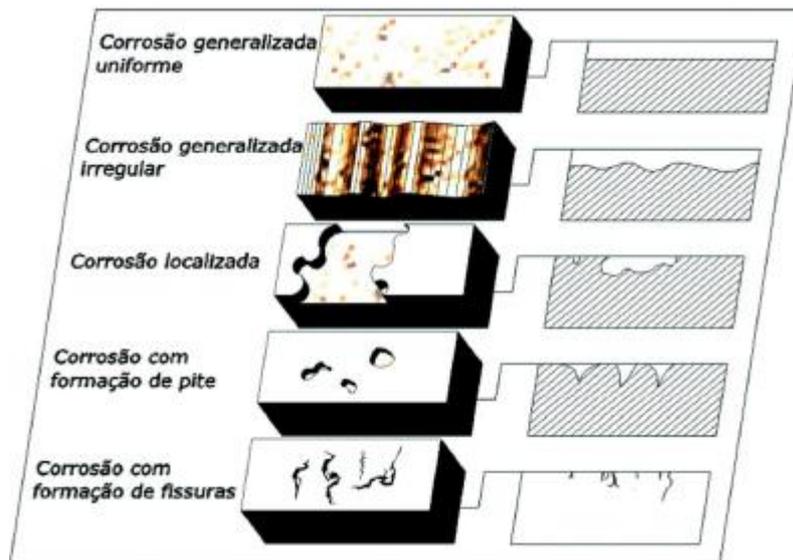
Fonte: Adaptado de Andrade (2001).

Segundo Neville (2013) o oxigênio é consumido, mas a água é regenerada e é necessária para a continuidade do processo. Portanto, não existe corrosão em uma atmosfera totalmente seca, provavelmente em umidade relativa menor que

40%. Da mesma forma, não ocorre corrosão expressiva em concreto totalmente imerso em água, exceto quando a água puder incorporar ar. Tem sido sugerido que a umidade relativa ótima para a corrosão está entre 70 e 80%. Em umidades relativas maiores, a difusão do oxigênio é consideravelmente reduzida e as condições ambientais ao longo do aço são mais uniformes.

Figueiredo e Meira (2011) mencionam que os íons cloreto penetram nos poros do concreto, juntamente com a água e o oxigênio, provocando desestabilizações pontuais na película passivadora da armadura. Assim, desencadeiam uma corrosão por pites, diferente da ocasionada pela carbonatação, que se faz generalizada. A Figura 7 apresenta os tipos de corrosão.

Figura 7 - Tipos de corrosão



Fonte: Figueiredo e Meira (2011).

Neville (2013) enfatiza que na presença de cloretos, bem como em sua ausência, a corrosão eletroquímica somente ocorre quando estão disponíveis água e oxigênio e somente este último consumido.

Mesmo com a presença de grandes quantidades de cloretos não existe corrosão em concreto seco. A corrosão de armadura por cloretos é pequena em concreto executado com cimento Portland comum (Tipo I ASTM) quando o total de íons cloreto é menor que 0,4% da massa de cimento.

Para o cimento em si, a BS 12:1996 especifica um limite de 0,1%. Os limites recomendados pelo ACI 318-2014 são dados no quadro 1:

Quadro 1 - Teor limite de cloreto para diversas normas

NORMA	PAÍS	ANO	TEOR DE CLORETOS RECOMENDADO
NBR 6118(ABNT)	BRASIL	2014	Não se reporta ao teor de cloretos.
ACI 318S-2014	USA	2014	≤0,15% em relação à massa de cimento, em ambiente com cloretos.
			≤0,3% em relação à massa de cimento, em ambiente natural.
			≤0,06% em relação à massa de cimento (concreto protendido).
CEB	Europa	1991	0,40% em relação à massa de cimento.
NP EM 206-1	Portugal	2007	
BS 8110:1	Inglaterra	1985	
JCSE-SP2	Japão	1986	≤0,60 kg/m ³ de concreto.
A NBR 6118 (ABNT, 2014) não se reporta ao teor de cloretos, mas enfatiza que não é permitido utilizar aditivos contendo cloretos em sua composição, tanto em estrutura de concreto armado, quanto em protendidas.			

Fonte: Figueiredo (20110).

Segundo Raharinaivo e Génin (1986), o teor de íons cloreto influencia diretamente a natureza dos produtos finais de corrosão, sendo a goetita, a lepidocrocita e a magnetita os principais produtos encontrados. Desses, apenas a magnetita não apresenta um volume tão grande de íons cloreto em sua formação (FIGUEIREDO, 2011).

Conforme Neville (1997) é difícil estabelecer um limite de penetração de íons cloreto abaixo do qual não exista corrosão. Os fatores que influenciam esse limite, muitas vezes, não são bem conhecidos.

Na prática, a prevenção deve ser feita pelo controle do ingresso de íons cloreto no concreto, através do cobrimento da armadura e da penetrabilidade do concreto de cobrimento.

De acordo com Balestra (2017), o conhecimento das variáveis que tangem a penetração de íons cloreto em estruturas de concreto armado é uma ferramenta importante a fim de determinar o tempo para que os cloretos atinjam a região das armaduras e desencadeiem um processo corrosivo, entretanto, muitos são os parâmetros ambientais e materiais envolvidos.

Desta forma, modelar a penetração de cloretos em estruturas de concreto apresenta-se como uma árdua tarefa que requer estudos regionalizados sobre o tema.

2.6 PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO

A penetração de íons cloreto no concreto requer a presença de uma fase líquida. Em meio saturado como, por exemplo, em estruturas imersas na água do mar, os cloretos penetram no concreto por difusão, regidos por um gradiente de concentração (entre a superfície contendo cloretos e o interior, que é isento desses íons). Quando a estrutura de concreto esta submetida a ciclos de molhagem e secagem (zona de maré, exposição à névoa salina ou aos sais de degelo), os cloretos podem penetrar no concreto por absorção capilar e migrar, com a fase líquida, por convecção para dentro da zona atingida pelos ciclos (BOUNY; LAURENS, 2014).

Os autores ainda esclarecem que os cloretos transportam-se, em seguida, por difusão nas zonas saturadas (ou nas zonas parcialmente saturadas nas quais o grau de conectividade da fase líquida permite). O fenômeno de convecção é muito importante por ser rápido.

A umidificação de um material seco com solução salina por um período de apenas um dia pode fazer com que os cloretos penetrem mais profundamente do que por vários meses, considerando o transporte exclusivamente por difusão em meio saturado (BOUNY; LAURENS, 2014).

Segundo Figueiredo (2011), os íons cloreto podem chegar até o interior do concreto por meio de distintas formas:

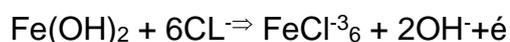
- Uso de aceleradores de pega que contêm CaCl₂;
- Impurezas dos agregados e da água de amassamento;
- Atmosfera marinha (maresia);
- Água do mar (estruturas off shore);
- Uso de sais de degelo; e
- Processos industriais (branqueamento da celulose e papel, por ex.)

Os íons cloreto podem ser encontrados no interior do concreto quimicamente combinado com as fases alumino-ferríticas para formar os cloroaluminatos, fisicamente adsorvidos na superfície dos poros capilares, e livres na solução dos poros do concreto (FIGUEIREDO, 2011).

Em comparação ao mecanismo induzido pela carbonatação, o mecanismo de corrosão eletroquímica em presença de cloretos é diferente tendo em vista que a corrosão não ocorre de forma generalizada, mas sim, na forma de pites.

Considerando o fato de que a velocidade de corrosão é, em geral, mais elevada na presença de cloretos, os mecanismos físico-químicos básicos não são ainda perfeitamente explicados. No entanto, parece que uma das consequências da presença dos íons cloro é a dissolução local da camada passiva e a migração desses íons através dela.

Segundo Dyer (2015), quando os íons cloreto atingem a superfície do reforço de aço, eles atuam para decompor a camada passiva na superfície e permitir que a corrosão progrida. Esse processo de “despassivação” quase certamente envolve a formação de complexos de cloreto com o ferro da camada passiva, tal como da seguinte maneira:



O complexo FeCl_6^{3-} é solúvel na solução dos poros do concreto, e, assim o material é removido da camada passiva, atuando para comprometer sua influência protetora. A despassivação tende a ocorrer em pontos localizados na superfície do aço. Para que a despassivação ocorra, e, portanto, para que a corrosão se inicie, uma concentração baixa de cloretos é suficiente.

2.6.1 Fatores que influenciam o ingresso de íons cloreto no concreto

Basicamente os parâmetros que influenciam a penetração dos íons cloreto no concreto são os mesmos envolvidos na penetração do CO_2 . Entretanto, esses parâmetros nem sempre influenciam da mesma forma (FIGUEIREDO, 2011).

Os cloretos podem estar presentes no concreto por terem sido incorporados à mistura por meio do uso de agregados contaminados – ou de água do mar ou água salobra – ou pelo uso de aditivos que contêm cloretos. Nenhum desses materiais deve ser admitido em concreto armado, e as normas, em geral, prescrevem limites rigorosos em relação ao teor de cloreto no concreto proveniente de qualquer fonte. Independentemente de sua origem externa, os cloretos penetram no concreto pelo transporte de água que contém os cloretos, bem como pela difusão dos íons na água e por absorção. O ingresso repetido ou prolongado pode, com o tempo resultar em uma elevada concentração de íons cloreto na superfície da armadura (NEVILLE, 2016).

2.6.2 Fatores climáticos

Nepomuceno (2005) afirma que a degradação das estruturas de concreto armado se dá pela penetração de substâncias na forma de gases, vapores e líquidos, através dos poros e fissuras. A umidade relativa, periodicidade das chuvas, orientação dos ventos, temperatura e concentrações de substâncias agressivas presentes no meio, etc., além das características dos materiais constituintes do concreto e de seus poros, são fatores importantes na interação entre o meio ambiente e o concreto. Para Lima (2005), ainda que o concreto tenha sido devidamente especificado e executado, faz-se necessário conhecer o meio ambiente e sua interação (do ponto de vista físico e químico) com a estrutura, cuja vida útil pode ser significativamente reduzida devido à influência ambiental.

Por isso, faz-se necessário seguir as especificações mínimas recomendadas pela Norma Brasileira (NBR) 6118 quanto ao concreto (ABNT, 2014) para assegurar a durabilidade das estruturas de concreto armado.

Lima (2011) esclarece que a temperatura alta do ambiente, aliada à baixa umidade relativa deste, acelera a retração plástica do concreto, e, conseqüentemente, gera fissuras que degradam o concreto, pois permitem a penetração de oxigênio e umidade, podendo dar origem à corrosão das armaduras.

A umidade relativa do ambiente tem papel fundamental na penetração dos íons cloreto no concreto, pois a umidade dos poros do concreto tende a estar em equilíbrio com o meio e os agentes agressivos são influenciados pela umidade interna do concreto.

Por exemplo, de acordo com Neville (1997), a difusão de gases como CO₂ e O₂, praticamente não ocorre em concretos saturados e, em concretos com poros quase secos, a migração e a difusão de íons, como sulfatos e cloretos, é prejudicada.

2.6.3 Condições de exposição

As estruturas de concreto devem ser concebidas de forma a fornecer condições de uso e segurança às pessoas, durante sua vida de serviço. Quando se trata de vida de serviço de uma estrutura de concreto, a condição ambiental a que essa estrutura está exposta torna-se tão importantes quanto suas propriedades

mecânicas (LIMA, 2005). Temperatura, umidade relativa, vento, poluição, agressividade da água, entre outros, são elementos que têm influência na vida útil das estruturas de concreto (LIMA, 2005).

Os conceitos de caracterização dos diferentes ambientes em contato com as estruturas foram introduzidos, no Brasil, por Helene (1986), que os classificou em ambiente marinho, ambiente rural, ambiente urbano, entre outros (LIMA, 2005).

De acordo com Lima (2005), o ambiente marinho é o que mais vem sendo estudado, devido ao alto grau de agressividade que propicia. Estruturas marítimas estão expostas à ação simultânea de processos de deterioração física e química. O concreto, nesse ambiente, pode deteriorar-se devido a efeitos combinados da ação química dos constituintes da água do mar sobre os produtos de hidratação do cimento, da pressão de cristalização dos sais dentro do concreto, da ação do congelamento em climas frios, da corrosão da armadura e da erosão física pela ação das ondas e objetos flutuantes (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) contempla uma classificação de agressividade ambiental de acordo com o meio em que a estrutura está inserida (Quadro 2).

Quadro 2 - Classes de agressividade ambiental

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	Elevado
		Respingos de maré	
<p>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).</p> <p>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.</p> <p>3) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.</p>			

Fonte: ABNT (2014).

A NBR 6118 (ABNT, 2007) ainda contém os Quadros 3 e 4, em que apresenta, respectivamente, aspectos relativos aos concretos mais adequados a cada classe de agressividade ambiental e às espessuras de cobrimento.

Quadro 3 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10 \text{ mm}$

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV ³
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje ²	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido ¹	Todos	30	35	45	55

¹) Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

²) Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7.4.7.5, respeitando um cobrimento nominal $\geq 15\text{mm}$.

³) Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal $\geq 45\text{mm}$.

Fonte: ABNT, 2014.

Quadro 4 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq \text{C20}$	$\geq \text{C25}$	$\geq \text{C30}$	$\geq \text{C40}$
	CP	$\geq \text{C25}$	$\geq \text{C30}$	$\geq \text{C35}$	$\geq \text{C40}$

NOTAS

1) O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

2) CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

3) CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: ABNT (2014).

2.6.3.1 Fatores inerentes ao concreto

A resistência do concreto à penetração de agentes agressivos, determinada por fatores inerentes ao concreto, depende, dentre outros fatores, da composição, do tipo e da quantidade de cimento, além da relação a/ag.

A quantidade de C₃A do cimento determina a capacidade de combinação com os íons cloreto. Portanto, pode-se concluir que mais íons cloreto ficam retidos quanto mais altos for o teor de C₃A do cimento e, quanto maior for o consumo de cimento na mistura (NEVILLE, 1997). Logo, menos íons cloreto ficam livres para atacar a armadura. Somente os cloretos livres estão disponíveis para despassivar a armadura e deflagar a corrosão, embora os combinados possam reverter-se em livres por carbonatação ou por outras situações (ISAIA, 1995).

Segundo Lapa (2008), o tipo de cimento utilizado influencia a concentração de cloros, tendo aqueles com teores mais elevados de C₃A o desempenho superior aos cimentos com baixos teores de C₃A. Relação a/c, adensamento e cura são fatores significativos que influenciam a qualidade do concreto e têm relação direta com a penetração de cloretos. As fissuras no concreto favorecem a penetração dos cloretos, sendo que velocidade depende da abertura das fissuras e da qualidade do concreto. (Tabela 2).

Tabela 2 - Acréscimo de tempo para iniciar a corrosão em função do teor de C₃A

Teor de C ₃ A	% de cloretos livres	Acréscimo de tempo para iniciar a corrosão
2%	86%	Referência
9%	58%	1,75 vezes
11%	51%	1,93 vezes
14%	33%	2,45 vezes

Fonte: Figueiredo e Meira (2011).

Outro fator importante é a relação água/cimento que influencia na porosidade, na forma, no volume e na distribuição dos tamanhos dos poros, controlando assim, a penetração dos íons cloretos. Foi verificado que a velocidade de difusão de cloreto aumenta de quatro a cinco vezes com um aumento da relação água/cimento de 0,4 a 0,6 (FIGUEIREDO, 2011).

2.6.3.2 Influência da cura na resistência à penetração de cloretos

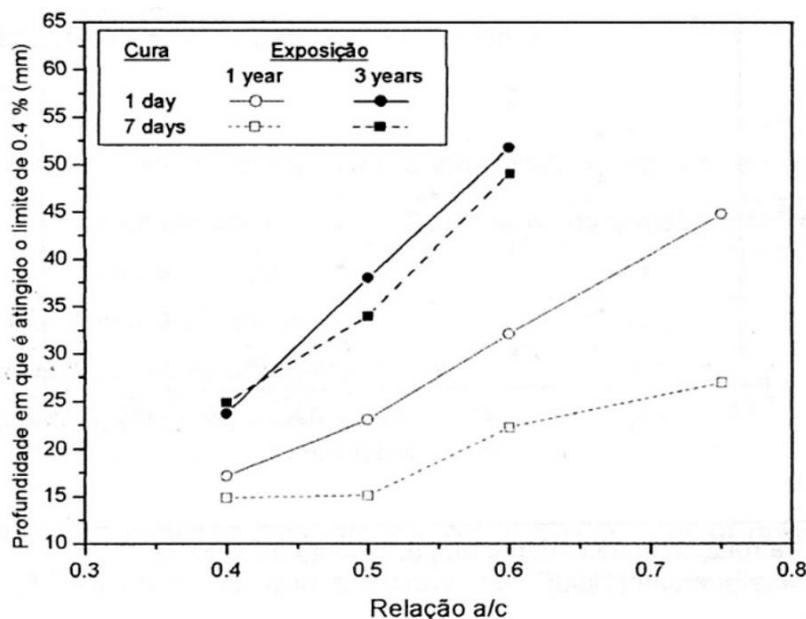
Isaia (1995) pesquisou a penetração de cloretos em concretos com adições minerais e observou que a cura úmida desempenha função preponderante no desenvolvimento do grau de hidratação e na formação dos poros grandes e pequenos, contínuos e descontínuos. Assim, a penetração de cloretos através da camada de cobrimento também é governada pelo modo que foi realizada a maturação do concreto, pelo período que esteve em contato com a umidade, nas idades iniciais, especialmente, quando são empregadas adições minerais.

Aïctin (1998) observou que a falta de uma cura úmida adequada do concreto pode ser um fator crítico para a durabilidade do concreto perante os agentes agressivos do meio, entre eles, o cloreto.

Segundo Song et al. (2008) e Meira et al. (2014), além da relação a/c , a cura do concreto também está relacionada à porosidade do mesmo, regulando assim a disponibilidade de água e oxigênio para ocorrência do processo corrosivo, além da facilidade de penetração do agente agressivo. Pereira et al. (2013) e Arya et al. (2014) pontuam que quanto maior o período de cura, menor a absorção de água devido à melhora propiciada pela microestrutura do concreto.

A Figura 8 apresenta o efeito favorável da cura na profundidade limite do concreto.

Figura 8 - Efeito da cura e da relação a/c na profundidade de alcance dos cloretos



Fonte: Figueiredo (2011).

De acordo com Battagin et al. (2002), a cura tem como principais funções hidratar o cimento, garantindo que as reações de hidratação ocorram e evitar, ao máximo, a retração do concreto.

Estas funções, se mal executadas, acabam por favorecer a entrada de agentes agressivos. Portanto, os autores julgam fundamental que concretos convencionais que possuem relações a/ag maiores do que as de concretos de alto desempenho tenham uma cura adequada como pré-requisito à obtenção de uma estrutura durável.

Battagin et al. (2002) apresentam, em seu trabalho, uma recomendação do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) com relação ao tempo mínimo de cura de acordo com o tipo de cimento e com a relação a/c (Tabela 3).

Tabela 3 - Período de cura mínima

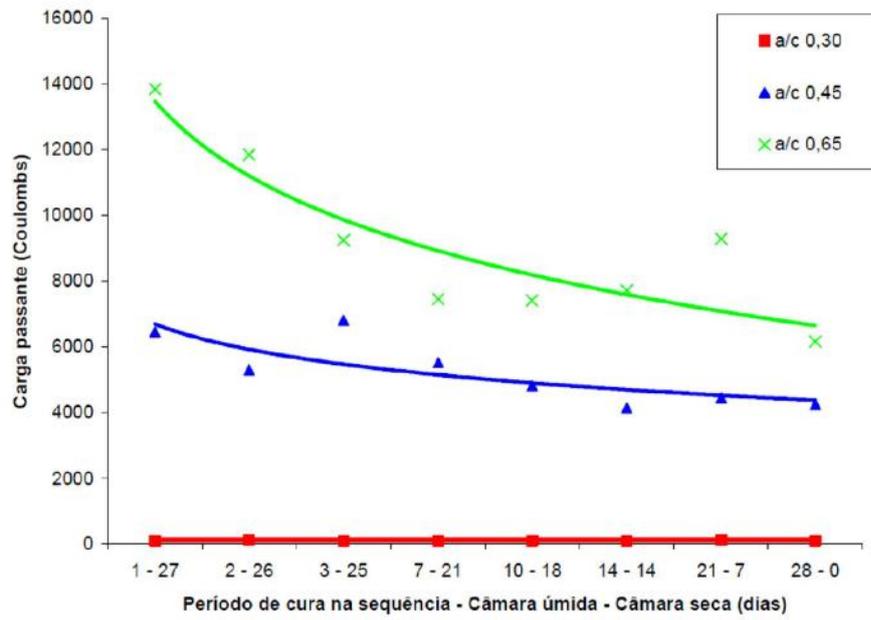
Tipo de cimento	Fator a/c			
	0,35	0,55	0,65	0,70
CP I e II – 32	2 dias	3 dias	7 dias	10 dias
CP IV – 32	2 dias	3 dias	7 dias	10 dias
CP III – 32	2 dias	5 dias	7 dias	10 dias
CP I e II - 40	2 dias	3 dias	5 dias	5 dias
CP V - ARI	2 dias	3 dias	5 dias	5 dias

Fonte: adaptado de Battagin et al. (2002).

Battagin et al. (2002), ao investigarem a influência dos vários ciclos de cura úmida e seca em concretos com relação a/c de 0,30, 0,45 e 0,65 na resistência à penetração de cloretos, observaram que, quanto maior o período de cura úmida, maior a resistência à penetração de íons cloreto. Essa influência foi mais expressiva para as relações de 0,45 e 0,65, conforme ilustra a Figura 9

Os autores ainda ressaltam que, apesar de o aumento dos ciclos de cura úmida influenciar positivamente na resistência à penetração de cloretos, o fator preponderante e mais significativo foi a relação a/c.

Figura 9 - Influência dos ciclos de cura na penetração de íons cloreto



Fonte: Battagin et al. (2002).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este Capítulo aborda como foi realizado todo o processo experimental da pesquisa a fim de atingir os objetivos propostos, sendo a metodologia para o desenvolvimento da pesquisa de cunho quantitativo, exploratório e experimental. A pesquisa foi realizada no município de Santa Maria - RS, com os experimentos executados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), anexo ao Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). De modo a atingir os objetivos propostos, foram realizados os seguintes ensaios:

- a) Teste rápido de penetração de cloretos (TRPC) (ASTM C1202:2005): carga total passante (Q);
- b) Ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata (EPCANP – método proposto pela AASHTO T259): coeficiente de difusão de cloretos;
- c) Resistência à compressão axial (ABNT NBR 5738:2003 e ABNT NBR 5739:2007);

Para verificar a influência do teor da Cinza de Lodo de Estação de Tratamento de Água (CLETA), Cinza de Casca de Arroz (CCA) e Escória de Alto Forno (EAF) nas propriedades do concreto relacionadas a este estudo, foram utilizadas misturas com teores variados de CLETA, CCA e EAF, em substituição parcial ao cimento Portland CPV-ARI, onde, todas as misturas foram investigadas nas relações água/aglomerante 0,35, 0,50 e 0,65.

As variáveis utilizadas na pesquisa foram:

- *Variáveis independentes:* aquelas que alteram as propriedades do material cimentante e influenciam a relação sólido/espaco da pasta e seu grau de compactidade. São elas:
 - a) Adições minerais: CLETA, EAF, CCA;
 - b) Teor de substituição: 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de CLETA, 5% EAF e 20% CLETA, 10% de EAF e 20% CLETA, 5% de CCA e 5% EAF e 15% CLETA;

- c) Relação água/aglomerante (a/ag): 0,35; 0,50; 0,65;
 - d) Período de cura úmida: três e sete dias;
 - e) Idade de realização dos ensaios: 28 e 91 dias de penetração de cloretos pelo TRPC, e 7, 14, 28, 56 e 91 dias penetração de cloretos pelo EPCANP.
- *Variáveis dependentes*: aquelas que são influenciadas pelas variáveis independentes. São elas:
 - d) Teste rápido de penetração de cloretos (TRPC) (ASTM C1202:2005): carga total passante (Q);
 - e) Ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata (EPCANP – método proposto pela AASHTO T259): coeficiente de difusão de cloretos;
 - f) Resistência à compressão axial (ABNT NBR 5738:2003 e ABNT NBR 5739:2007);

3.1 MATERIAIS E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA

O material para a pesquisa foi proveniente da Estação de Tratamento de Água (ETA), do município de Venâncio Aires, RS, onde o abastecimento é feito pela CORSAN, atendendo 16.557 habitantes. 98% da água distribuída é proveniente da ETA do Arroio Castelhana, (Prefeitura Municipal).

O material foi coletado no mês de setembro de 2012, quando foi realizada a limpeza dos leitos de secagem da ETA. Essa coleta foi realizada em uma só vez. Foram coletados em média 4 m³, transportado até o município de Santa Maria, RS, e depositado na UFSM, junto ao LMCC, como na Figura 10.

Figura 10 - Lodo de ETA proveniente do município de Venâncio Aires, RS.



Os materiais utilizados na investigação experimental do concreto foram:

- Cimento Portland de Alta Resistencia Inicial (CPV-ARI) em conformidade com a ABNT NBR 5733 (1991);
- Cinza de lodo de ETA, procedente da ETA do município de Venâncio Aires, RS;
- Cinza de casca de arroz: proveniente da geradora de energia elétrica, localizada no Estado do Rio Grande do Sul. A cinza de casca de arroz foi moída na indústria de origem, segundo Mostardeiro Neto (2011);
- Escória de alto forno: procedente da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST), Serra/ES, utilizada nas condições recebidas, conforme Veiga (2011);
- Areia: proveniente do município de Santa Maria/RS, constituindo-se de areia natural, quartzosa, previamente lavada, seca em estufa e peneirada na peneira #6,3 mm;
- Brita: proveniente do município de Itaara/RS, constituído de pedra britada de rocha diabásica, previamente lavada, seca em estufa e submetida a peneiramento na peneira #19,0 mm;

- Água: proveniente da rede de abastecimento da Universidade Federal de Santa Maria.
- Aditivo: com o objetivo de manter a igualdade de consistência entre as diversas misturas investigadas, ($100 \pm 10\text{mm}$), foi utilizado aditivo plastificante do tipo pega normal, Muraplast FK 100 ou similar, livre de cloretos. Quando a dosagem recomendada pelo fabricante não foi suficiente para atingir a consistência desejada, fez-se necessário o uso de um aditivo superplastificante à base de policarboxilatos, com teor de cloretos $< 0,1\%$.

3.2 CARACTERIZAÇÕES DOS MATERIAIS

3.2.1 Aglomerantes

Foi utilizado cimento Portland de alta resistência inicial, CPV-ARI, fabricado nacionalmente, em conformidade com a norma ABNT NBR 5733:1991. O lodo de estação de tratamento de água é proveniente de Venâncio Aires e é um resíduo proveniente da Estação de Tratamento de Água (ETA) da mesma cidade (HENGGEN, 2014). Depois de calcinado a 600°C por 1 hora e moído por 2 horas em moinho de esferas de aço o lodo de ETA é transformado em cinza de lodo de ETA e está pronto para ser usado em substituição ao cimento. A cinza de casca de arroz empregada é proveniente de geradora de energia elétrica, localizada no estado do Rio Grande do Sul, cuja finalidade principal da casca de arroz é de gerar energia. A cinza de casca de arroz foi moída na indústria de origem segundo Mostardeiro Neto (2011). A escória de alto forno provem da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST), Tubarão – ES, utilizada nas condições recebidas, conforme Veiga (2011).

Quanto a distribuição de tamanho das partículas do cimento Portland - CPV. Os resultados da análise de tamanho de partículas constata-se que $d(0,1) = 3,672 \mu\text{m}$, $d(0,5) = 14,103 \mu\text{m}$ e $d(0,9) = 38,812 \mu\text{m}$, ou seja, 10%, 50% e 90% das partículas apresentam diâmetro de partículas inferiores a $3,672 \mu\text{m}$, $14,103 \mu\text{m}$ e $38,8121 \mu\text{m}$ respectivamente.

Na Tabela 4 são apresentadas as características físico-químicas dos aglomerantes, segundo Hengen (2014), Mostardeiro Neto (2011) e Veiga (2011), empregados neste trabalho.

Tabela 4 - Características físico-químicas dos aglomerantes

Composição Química	Porcentagem em massa dos materiais (%)			
	CPV-ARI	CLETA	CCA	EAF
CaO	62,9	0,57	0,83	44,50
SiO ₂	20,4	66,2	88,12	33,84
Al ₂ O ₃	4,37	17,7	0,56	10,35
Fe ₂ O ₃	2,64	8,76	0,15	0,67
SO ₃	2,20	-	0,10	-
MgO	2,70	0,96	0,49	7,99
K ₂ O	0,95	1,16	1,60	0,40
MnO	< 0,10	0,13	-	-
Na ₂ O	0,13	0,32	0,21	0,20
TiO ₂	0,29	0,86	-	-
P ₂ O ₅	< 0,10	0,33	-	-
Carbono grafítico	-	-	3,69	-
Perda ao fogo	3,16	3,37	5,88	0,00
Massa específica (kg/dm ³)	3,13	2,56	2,13	2,92
Área específica BET (m ² /g)	1,14	-	-	-
Finura #0,075 mm	0,82	-	-	-

3.2.2 Lodo de ETA e CLETA

A determinação da composição química do lodo foi realizada por análise quantitativa em amostra fundida com tetraborato de lítio anidro, por comparação com materiais certificados de referência na calibração de Rochas TBL, em espectrômetro por fluorescência de raios X AxiosAdvanced, marca PANalytical. A perda ao fogo foi efetuada a 1050°C por 1 hora. Na tabela 5 são apresentadas as características físico-químicas do lodo, in natura e calcinado a 600 °C.

Tabela 5 - Características físico-químicas do lodo de estação de tratamento de água in natura e calcinado a 600°C por 1 hora

Características Físicas	L	L 600
Massa específica (g/cm ³)		2,56
Superfície específica BET (m ² /g)	-	-
Composição Química		
SiO ₂	52,0	66,2
Al ₂ O ₃	20,1	17,7
Fe ₂ O ₃	9,95	8,76
CaO	0,63	0,57
MgO	1,13	0,96
SO ₃	-	-
Na ₂ O	0,34	0,32
K ₂ O	1,05	1,16
MnO	0,15	0,13
TiO ₂	0,99	0,86
P ₂ O ₅	0,38	0,33
Perda ao fogo	13,2	3,37

Da análise da tabela 5 constata-se que a soma dos constituintes SiO₂+ Al₂O₃ + Fe₂O₃ é de 82,05% para o lodo in natura e de 92,66% para o lodo calcinado, ou seja, atende ao mínimo exigido pela norma ABNT NBR 13683:14 que especifica um valor de 70%.

Essa mesma norma especifica um teor de perda ao fogo ≤10% e um teor de álcalis disponíveis ≤ 1,5%. No caso do lodo in natura esses valores foram respectivamente de 13,2% e 1,39% e para o lodo calcinado de 3,37% e 1,48%. Dessa forma verifica-se que o lodo calcinado atende a essas duas exigências.

Para a identificação das fases cristalinas o estudo foi efetuado pelo método do pó, mediante o emprego de difratômetro de raios X, marca PANalytical, modelo X'PertPRO com detector X'Celerator.

A identificação das fases cristalinas foi obtida por comparação do difratograma da amostra com os bancos de dados PDF2 do ICDD - International Centre for Diffraction Data (2003) e PAN-ICSD – PANalytical Inorganic Crystal Structure Database (2007). Os resultados obtidos estão listados na tabela 6 para o lodo in natura e tabela 7 para o lodo calcinado a 600°C.

Na Figura 11 (a e b) são apresentados os difratogramas do lodo in natura e após calcinação a 600°C por 1 hora. Da análise desses difratogramas, observa-se no lodo in natura a presença dos minerais: quartzo, caulinita, hematita, anordita e sanidina. No lodo calcinado observa-se a presença dos minerais: quartzo, hematita, ortoclásio, albita e muscovita, não se constatando mais a presença de caulinita, Tabelas 6 e 7.

Figura 11 - Difratograma de raios-X da amostra de lodo: A) in natura e B) calcinada a 600°C.

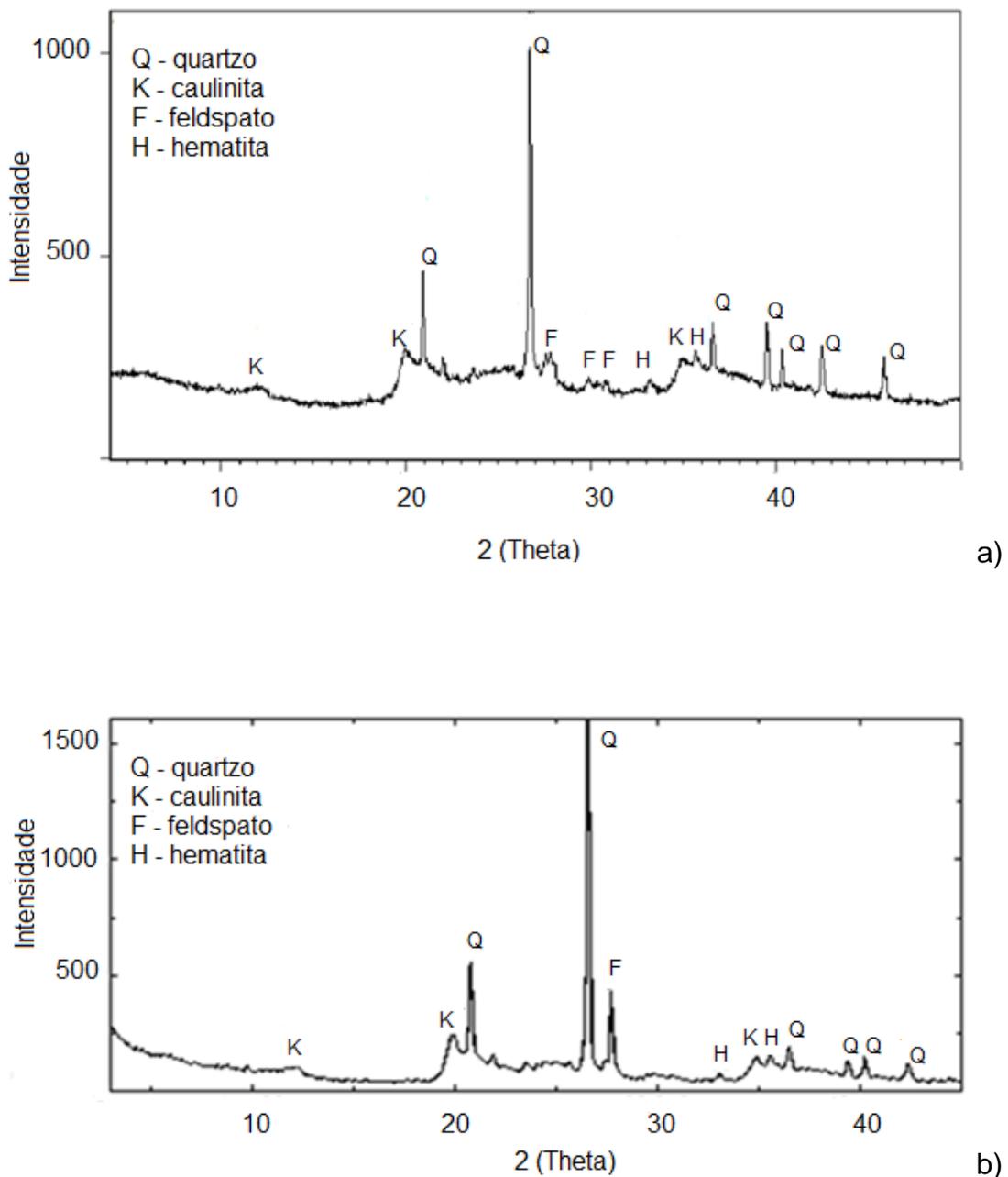


Tabela 6 - Composição mineralógica do lodo in natura

Nome do composto	Fórmula química
Quartzo	SiO ₂
Caulinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Hematita	Fe ₂ O ₃
Anordita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈
Sanidina	KAlSi ₃ O ₈

Tabela 7 - Composição mineralógica do lodo calcinado a 600°C por 1 hora

Nome do composto	Fórmula química
Quartzo	SiO ₂
Hematita	Fe ₂ O ₃
Ortoclásio	KS ₃ AlO ₈
Albita	Na(AlSi ₃ O ₈)
Muscovita	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂

3.2.3 Agregados

Para obtenção das características físicas dos agregados, foram realizados ensaios conforme as seguintes normas:

- ABNT NBR NM 26:(2009): Agregados – Amostragem;
- ABNT NBR NM 52:(2009): Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente;
- ABNT NBR NM 53:(2009): Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água;
- ABNT NBR NM 248:(2003): Agregados – Determinação da composição granulométrica;
- ABNT NBR 7809:(2006): Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro.
- ABNT NBR NM 45:(2006): Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios;

O agregado miúdo utilizado nesta pesquisa, é proveniente do município de Santa Maria/RS, constitui-se de areia natural, quartzosa, submetida a lavagem para

retirada de impurezas, seca em estufa e peneirada na peneira #6,3 mm, sendo armazenada em baias fechadas, até a data das moldagens.

O agregado graúdo constituído de pedra britada de rocha diabásica, proveniente do município de Itaara/RS, sendo submetida a peneiramento na peneira #19,0 mm, lavado e seco à temperatura ambiente para remoção da umidade, e armazenado em baias fechadas para utilização.

Na tabela 8 são apresentadas as características físicas dos agregados utilizados na pesquisa. E nas Figuras 12 e 13 são mostradas as curvas granulométricas dos agregados.

Tabela 8 - Características físicas dos agregados

Grandezas físicas	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Modulo de finura	1.85	6.92
Dimensão máxima característica (mm)	1.2	19.0
Massa específica (kg/dm ³)	2.65	2.48
Massa unitária solta (kg/dm ³)	1.62	1.38
Absorção de água (%)	-	2.01
Índice de forma	-	2.23

Figura 12 - Curva granulométrica do agregado miúdo

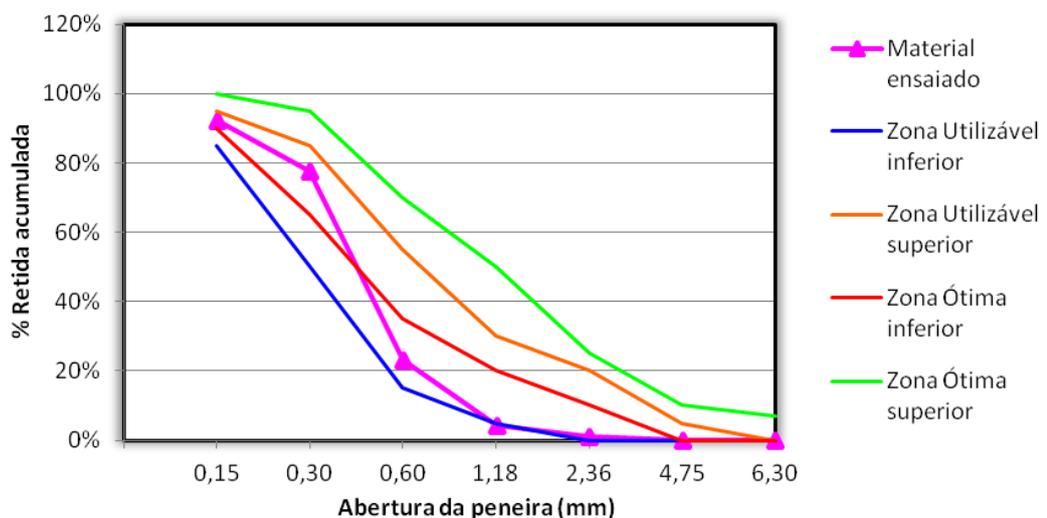
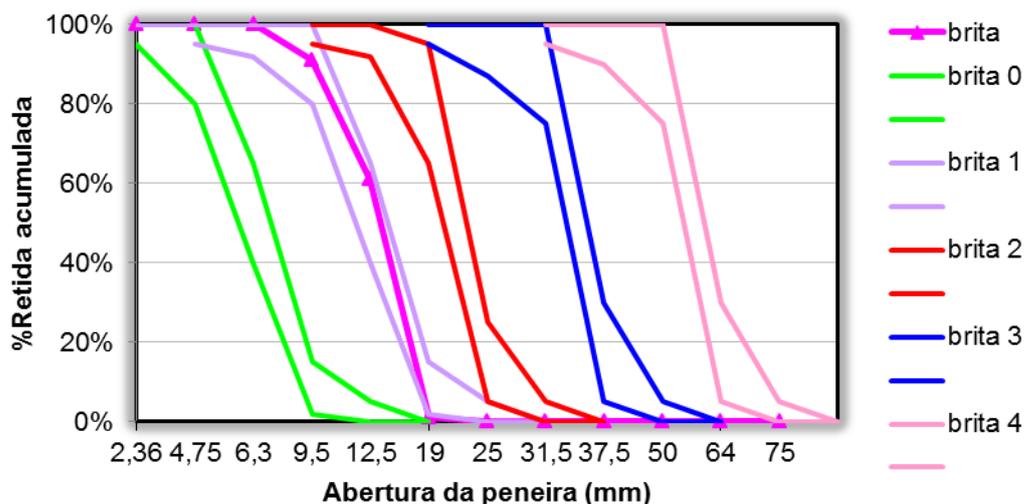


Figura 13 - Curva granulométrica do agregado graúdo



3.2.4 Aditivos

De modo a se obter a consistência desejada nas misturas investigadas, 100 ± 10 mm, utilizou-se aditivo plastificante e superplastificante. O aditivo superplastificante foi usado em conjunto com o aditivo plastificante apenas nos casos em que a consistência determinada não foi obtida após a dosagem máxima de aditivo plastificante, ou seja, 1,0%.

O aditivo plastificante adotado foi do tipo multifuncional, de pega normal, Muraplast FK 100, livre de cloretos. O aditivo superplastificante empregado foi à base de policarboxilatos, com teor de cloretos $< 0,1\%$, as propriedades físico-químicas dos aditivos são apresentadas na tabela 9. Antes do início da moldagem, foram realizadas pré-moldagens com o objetivo de verificar os teores de aditivos plastificante e superplastificante que foram utilizados na moldagem final.

Tabela 9 - Propriedades físico-químicas dos aditivos utilizados na pesquisa

	Plastificante	Super Plastificante
Estado físico	Líquido	Líquido
Cor	Marrom	Marrom
Odor	Característico	Característico
Densidade	1,20 g/ cm ³	1,09 +- 0,02 g/ cm ³
Dosagem %	0,1 a 1,0 do peso em cimento	0,2 a 5,0 do peso em cimento

3.2.5 Água

A água utilizada na moldagem dos corpos-de-prova foi proveniente da rede que abastece a Universidade Federal de Santa Maria. Para a elaboração das soluções de cloreto de sódio e de nitrato de prata, ambas utilizadas no ensaio de penetração de íons cloreto, foi utilizada água destilada e deionizada respectivamente.

3.3 DOSAGEM DOS CONCRETOS

A dosagem do concreto foi realizada de acordo com os procedimentos propostos por Helene e Terzian (1992). Foram moldadas dez misturas, sendo uma composta apenas por cimento e outras nove com teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de substituição parcial de cimento por CLETA, além de misturas compostas com 5% de EAF e 20% de CLETA, 10% de EAF e 20% de CLETA e 5% de CCA, 5% de EAF e 15% de CLETA em substituição parcial do cimento, conforme nomenclatura e tabela 10 abaixo:

- REF (100% de cimento);
- 5 L, 10 L, 15 L, 20 L, 25 L, 30 L (5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de cinza de lodo de estação de tratamento de água);
- 5 EAF (5% de escória de alto forno mais 20% de cinza de lodo de estação de tratamento de água);
- 10 EAF (10% de escória de alto forno mais 20% de cinza de lodo de estação de tratamento de água); e,
- 5 CCA (5% de cinza de casca de arroz, 5% de escória de alto forno e 15% de cinza de lodo de estação de tratamento de água).

Tabela 10 - Proporções das adições minerais em cada mistura de aglomerante

(continua)

Nomenclatura das misturas	Proporção dos materiais (% do total de aglomerantes)			
	Cimento CPV-ARI	Cinza de lodo de ETA	EAF	CCA
REF	100	-	-	-
5CLETA	95	5	-	-

(conclusão)				
10CLETA	90	10	-	-
15CLETA	85	15	-	-
20CLETA	80	20	-	-
25CLETA	75	25	-	-
30CLETA	70	30	-	-
5EAF20CLETA	75	20	5	-
10EAF20CLETA	70	20	10	-
5CCA5EAF15CLETA	80	15	5	5

A previsão do comportamento de cada mistura foi realizada por meio do cálculo das constantes A e B da expressão $f_c = A/Bx$ (curva de Abrams) para cada idade de ensaio.

Para poder compor a curva de Abrams de cada mistura, foram necessários no mínimo três pontos. Desta forma, foram estabelecidas três relações água/aglomerante, 0,35, 0,50 e 0,65, com proporções de aglomerante para agregados (m) determinados para cada relação a/agl, em massa, em função do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone, de acordo com a NBR NM 67:1998 que foram obtidos, para as relações a/agl 0,35, 0,50 e 0,65 os valores de 1:3,51; 1:5,00 e 1:6,51, respectivamente.

Devido à menor massa específica da CLETA, da CCA e da EAF, em relação ao cimento e ao conseqüente aumento no volume de pasta quando o cimento é substituído por esses materiais, foi feita correção na quantidade de areia, para manter o teor de argamassa seca em 51%, em massa, conforme obtido experimentalmente. Os teores de aditivos utilizados, definidos no ensaio de consistência, assim como o consumo de materiais dos experimentos, apresentam-se na tabela 11.

Tabela 11 - Consumo de materiais por metro cúbico de concreto

(continua)											
Mistura	Relação a/agl	Ag	Cim	CLETA	CCA	EAF	Areia	Brita	Água	Adit. Plast.	Adit. Superp.
REF	0.35	488	488	-	-	-	634	1077	171	1.46	-
	0.50	359	359	-	-	-	740	1057	180	-	-
	0.65	284	284	-	-	-	804	1045	185	-	-

(conclusão)											
5 L	0.35	488	464	24	-	-	625	1080	171	1.95	-
	0.50	359	341	18	-	-	737	1057	180	-	-
	0.65	284	270	14	-	-	799	1046	185	-	-
10 L	0.35	486	439	49	-	-	624	1078	141	4.88	1.46
	0.50	359	324	36	-	-	733	1057	180	-	-
	0.65	284	256	28	-	-	798	1045	185	-	-
15 L	0.35	488	415	73	-	-	619	1078	171	4.88	1.95
	0.50	359	306	54	-	-	730	1057	180	0.38	-
	0.65	284	241	43	-	-	795	1045	485	-	-
20 L	0.35	488	390	98	-	-	615	1078	171	4.88	2.19
	0.50	359	287	72	-	-	729	1056	180	1.08	-
	0.65	284	227	57	-	-	795	1044	184	-	-
25 L	0.35	488	366	122	-	-	610	1078	171	4.88	2.44
	0.50	359	269	90	-	-	725	1056	180	1.44	-
	0.65	284	213	71	-	-	792	1044	184	-	-
30 L	0.35	487	341	146	-	-	609	1076	170	4.87	3.17
	0.50	359	251	108	-	-	722	1056	180	3.23	-
	0.65	284	199	85	-	-	789	1044	184	0.71	-
5 EAF	0.35	487	366	97	24	-	614	1077	171	4.87	2.92
	0.50	359	269	72	18	-	728	1055	179	3.23	-
	0.65	284	213	57	14	-	794	1044	184	1.7	-
10 EAF	0.35	487	341	97	49	-	614	1076	170	4.87	2.44
	0.50	359	251	72	36	-	728	1055	179	2.87	-
	0.65	284	199	57	28	-	794	1043	184	1.42	-
5 CCA	0.35	487	366	73	24	24	609	1077	171	4.87	2.19
	0.50	359	269	54	18	18	725	1055	179	3.23	-
	0.65	284	213	43	14	14	791	1044	184	1.13	-

a/agl: relação água/aglomerante; agl: aglomerante; cim: cimento Portland CPV-ARI; adit. Plast: aditivo plastificante; Adit. Superp: aditivo superplastificante.

O agregado graúdo permanecerá constante para as misturas de mesma relação a/agl, enquanto que foi feita uma compensação no teor de agregado miúdo para manter o volume de argamassa constante e igual ao da mistura de referência, nas misturas com adições minerais (devido à menor massa específica das adições minerais em relação ao cimento).

3.4 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS-DE-PROVA

Foram moldados, para cada relação água/aglomerante das misturas utilizadas, corpos-de-prova cilíndricos para os ensaios de Teste rápido de penetração de cloretos (TRPC) – ASTM C1202, e corpos-de-prova prismáticos para o ensaio de penetração de íons cloreto por aspersão de Nitrato de Prata. De acordo com a tabela 12, as idades de ensaios, dimensões de corpo de prova e quantidade dos mesmos.

Tabela 12 - Idade de ensaio, dimensão dos corpos-de-prova e número de camadas (adensamento)

Ensaio	Tipo de cura	Idade de ensaio (dias)	Dimensão dos corpos de prova (cm)	Vibração (camadas)
Resistência à compressão	Úmida 3 e 7 dias	7, 28 e 91 28 e 91	Ø 10x20	2
Penetração de íons cloreto (EPCANP)	3 e 7 dias	7, 28 e 91	Ø 10x10x28,5	2
Penetração de íons Cloreto (ASTM C1202)	3 e 7 dias	7, 14, 28, 56 e 91	Ø 10x20	2

Os corpos-de-prova do ensaio de resistência à compressão axial e de penetração de cloretos foram adensados em mesa vibratória, em duas camadas.

A conferência do resultado da consistência de cada mistura, 100 ± 10 mm, foi realizada através do ensaio de abatimento do tronco de cone, segundo a NBR NM 67:1998, em que se verificaram os valores pré-determinados.

Durante a moldagem de cada mistura, para que fossem evitadas variações na temperatura da massa de concreto e a mesma permanecesse constante independente da temperatura do ambiente, foi utilizada a fórmula de Metha e Monteiro (1994), equação 1, que considera a massa e a temperatura de todos os elementos constituintes da mistura (aglomerantes, agregados e água):

$$T = \frac{0,22. (T_m. M_n + T_c. M_c) + T_a. M_a}{0,22. (M_m + M_c) + M_a} \quad (1)$$

Onde:

T = Temperatura da massa de concreto (°F);

T_m = Temperatura dos agregados (°F);

Tc = Temperatura do aglomerante (°F);

Ta = Temperatura da água (°F);

Mm = Massa dos agregados (kg);

Mc = Massa do aglomerante (kg); e

Ma = Massa de água (kg).

As temperaturas foram medidas com o uso de termômetro digital. Com a fórmula acima, foi possível encontrar a temperatura da água utilizada em cada mistura, em função da temperatura do ambiente e dos materiais, de modo a obter a temperatura da massa de concreto aproximadamente constante em $19 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Após a moldagem, os corpos-de-prova foram mantidos nos moldes por 24 horas, onde receberam cobertura superficial a fim de evitar a perda de água por evaporação. A desmoldagem ocorreu após este período, e foi seguida da identificação e encaminhamento de cada corpo-de-prova à câmara úmida.

Os corpos-de-prova destinados a penetração de íons cloreto e a resistência a compressão foram curados em câmara úmida em períodos de 3 e 7 dias, permanecendo em ambiente de laboratório até a data dos ensaios. O segundo tipo de cura referente a resistência a compressão foi permanecer em câmara úmida em períodos de 7, 28 e 91 dias até a data dos ensaios.

3.5 ENSAIOS

3.5.1 Teste rápido de penetração de cloretos (TRPC) – ASTM C1202

O ensaio de Teste Rápido de Penetração de Cloretos foi realizado de acordo com a norma ASTM C1202, que consiste em verificar a carga passante através de uma amostra de concreto fixa entre duas células de acrílico, uma preenchida com solução de NaCl e a outra com NaOH. A resistência à penetração de cloretos foi associada à carga passante.

Para o ensaio, utilizou-se dois corpos de prova, de dimensões $\phi 10 \times 20 \text{cm}$, para cada período de cura (três e sete dias) e para cada relação a/ag (0,35; 0,50; 0,65), sendo ensaiados aos 28 e 91 dias, ou seja, no total foram 12 corpos de prova por mistura. Estes foram serrados nas dimensões $10 \times 5,1 \text{cm}$ para formarem duas amostras cilíndricas, impermeabilizados lateralmente com resina epóxi e passaram

pelo processo de vácuo para que os poros da amostra fiquem completamente saturados.

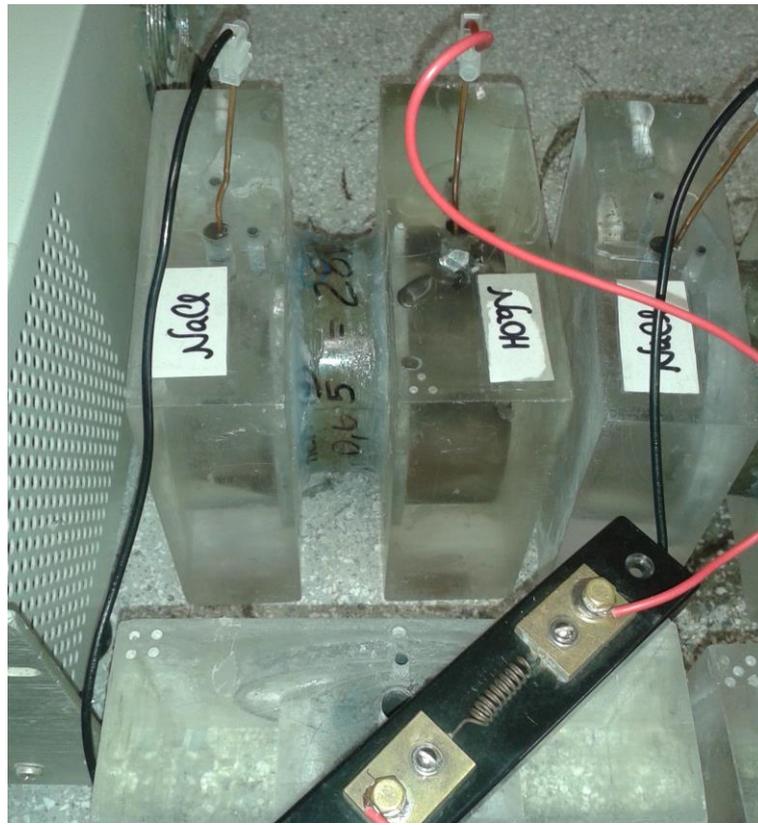
A amostra foi colocada nas células de acrílico, em que uma é preenchida com solução de 3% de NaCl e a outra com 0,3N de NaOH. A este sistema aplicou-se uma diferença de potencial de 60 Volts por seis horas e foram realizadas leituras a cada 30 minutos. A diferença de potencial faz com que os íons cloreto migrem da solução de NaCl para a de NaOH. Quanto maior a carga total passante (Q) menor é a resistência do concreto à penetração de cloretos. De acordo com a tabela 13, a ASTM C1202 permite classificar o concreto quanto à penetração de íons cloretos. A Figura 14 mostra como foi montado o corpo de prova entre as células de acrílico.

Tabela 13 - Classificação dos cloretos segundo a penetração de cloretos

PENETRAÇÃO DE CLORETOS	CARGA TOTAL PASSANTE (COULOMB)
Alta	>4000
Moderada	De 2000 a 4000
Baixa	De 1000 a 2000
Muito baixa	De 100 a 1000
Desprezível	<100

Fonte: ASTM C1202

Figura 14 - Corpo de prova entre as células de acrílico



O método da ASTM C1202, *Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, publicado em 1991, é o mais empregado atualmente, devido ao fato de ser um ensaio rápido (FIGUEIREDO, 2005).

Apesar de o teste medir a condutividade elétrica do concreto e não medir diretamente a permeabilidade do mesmo apresenta uma boa correlação de resultados quando comparado com outros métodos (WHITING, 1981 apud HAMILTON III, 2007). De acordo com Neville (1997), o ensaio pode ser importante para comparação e escolha do tipo de concreto mais adequado para determinada situação no que diz respeito à resistência à penetração de cloretos.

Segundo Figueiredo (2005), a principal crítica, quanto a este ensaio, é referente à elevada diferença de potencial empregada, pois, em concretos com alta condutividade elétrica, a corrente passante pode elevar a temperatura do sistema e distorcer os resultados, sendo necessário monitorar a temperatura da solução ao longo do ensaio.

3.5.2 Ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata (EPCANP)

O ensaio de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata consistiu em preparar os corpos de prova, após a cura úmida, considerando-se os seguintes aspectos:

- a) Dois corpos de prova (100 mm x 100 mm x 400 mm) de cada relação a/ag, de cada mistura e de cada período de cura úmida, foram cortados em pedaços de 53mm de espessura, totalizando 17 fatias para cada mistura, sendo três fatias de cada período de cura úmida (três e sete dias) e de cada relação a/ag para cada um dos cinco períodos do ensaio (7, 14, 28, 56 e 91 dias);
- b) Todas as fatias foram impermeabilizadas, em quatro das seis faces, com três demãos de verniz poliuretano, permitindo, assim, que somente duas faces paralelas (100 mm x 53 mm) ficassem sujeitas à penetração de íons cloreto (Figura 15);
- c) Após a impermeabilização, as fatias foram imersas em um reservatório com solução salina na proporção de 31,94g de NaCl para cada litro de água destilada (Figura 16);
- d) Os períodos de imersão foram de 7, 14, 28, 56 e 91 dias;
- e) Ao atingir cada idade de ensaio, três fatias de cada relação a/ag foram retiradas do reservatório e lavadas com água potável e, após, rompidas na direção de penetração dos íons cloreto;
- f) Para a percepção visual e registro fotográfico da região de penetração de íons cloreto, foi aspergida solução de nitrato de prata (17g de AgNO₃ para cada litro de água deionizada), após a secagem da solução e assim visualizado a penetração de íons cloreto (Figura 18);
- g) Para a determinação da profundidade de penetração de íons cloreto foi determinado por meio de uma fotografia digitalizada, com o auxílio do programa computacional AutoCAD.

Figura 15 - Corpos de prova fatiado, preparados para imersão no tanque



Fonte: Foto do Acervo da autora (outubro, 2014).

Figura 16 - Corpos de prova fatiados, imersos no tanque



Fonte: Foto do Acervo da autora (outubro, 2014)

Foram estabelecidas as médias de penetração para cada prazo de submersão. Os resultados deste ensaio foram obtidos com base no coeficiente angular da equação(2) de regressão linear, proposta por Bakker (1988), chamado coeficiente de penetração (k).

$$x = a + k(t)^{1/2} \quad (2)$$

Onde:

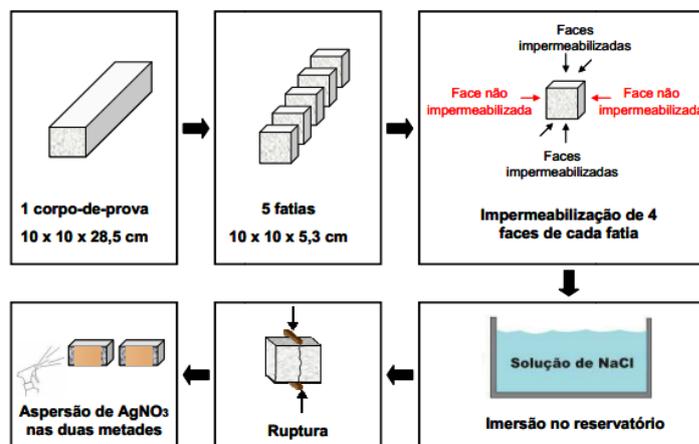
X é a profundidade de penetração (mm);

a é o ponto de intersecção da reta com o eixo y (no gráfico profundidade de penetração x tempo^{1/2});

k é o coeficiente de penetração;

t é o tempo (semanas).

Figura 17 - Demonstração de penetração de íons Cloreto



Fonte: Da Silva (2012).

Figura 18 - Corpo de prova com penetração de íons cloreto



Fonte: Foto do Acervo da autora (Novembro, 2014).

3.5.3 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial das misturas investigadas foi realizado de acordo com as normas ABNT NBR 5738:2003 e ABNT NBR 5739:2007. Foram moldados 20 corpos-de-prova cilíndricos $\varnothing 10 \times 20$ cm para cada mistura e relação a/agl, sendo 4 para cada idade de ensaio. Os corpos-de-prova foram curados em câmara úmida por 3 e 7 dias. Após o período de cura úmida os concretos como período de cura de três e sete dias foram retirados da cura após este período e conservados em ambiente de laboratório até as idades de ensaio, 28 e 91 dias. Os corpos-de-prova de 7, 28 e 91 dias foram mantidos em cura úmida até as idades de ensaios. Antes do ensaio, houve capeamento dos corpos-de-prova com enxofre, com posterior rompimento dos mesmos em prensa hidráulica.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados dos ensaios de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata (EPCANPs) e pelo método da norma ASTM C1202, de todas as misturas analisadas.

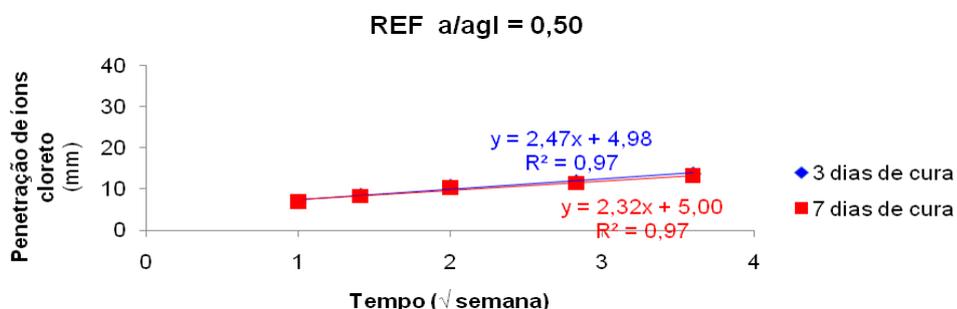
Os resultados foram analisados e discutidos frente à influência que a variação do tipo e do teor de adição, a relação água/aglomerante (a/agl) e o tempo de cura úmida exercem sobre a resistência dos concretos estudados à penetração de cloretos.

4.1 ANÁLISES DOS RESULTADOS DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS – EPCANP

O método colorimétrico de aspersão de nitrato de prata é prático e de fácil aplicação, permitindo medir a profundidade de penetração do cloreto livre no concreto. Portanto, por sua praticidade, contribui para a identificação, na estrutura de concreto armado, da existência ou não de íons cloreto, podendo, assim, auxiliar as técnicas de reparos a serem aplicadas (CARVALHO; MOTA; MONTEIRO, 2011).

Os valores das profundidades médias de penetração (aos 7, 14, 28, 56 e 91 dias) das misturas investigadas, neste ensaio, foram plotados no gráfico em função do tempo de imersão (Figura 19), sendo o coeficiente de penetração de cloretos representado pelo coeficiente angular da reta.

Figura 19 - Gráfico para obtenção dos coeficientes k



Neste estudo, considerou-se a constante “a” da equação (valor que intercepta o eixo das ordenadas) diferente de zero. Essa consideração corrige a equação, conforme proposto por Wee et al. (2000) sem alterar os resultados quanto

às propriedades das misturas. Esta constante é um artefato para o melhor ajuste da curva, e não um indicador de propriedades da mistura. Os valores dos coeficientes obtidos para cada mistura estudada, por meio do EPCANP são apresentados na tabela 14.

Tabela 14 - Coeficiente de Penetração K das misturas, de acordo com a relação a/agl e período de cura úmida

Mistura	a/agl	k (mm/ $\sqrt{\text{semana}}$)	
		Cura	
		3 dias	7 dias
REF	0,35	2,74	2,47
	0,50	3,44	3,42
	0,65	4,00	3,95
5C	0,35	2,06	1,91
	0,50	2,42	2,41
	0,65	3,55	3,29
10C	0,35	1,98	1,89
	0,50	2,39	2,30
	0,65	3,09	2,89
15C	0,35	1,90	1,87
	0,50	2,30	2,24
	0,65	3,00	2,80
20C	0,35	1,84	1,78
	0,50	2,25	2,02
	0,65	2,92	2,75
25C	0,35	1,79	1,63
	0,50	2,15	1,98
	0,65	2,74	2,70
30C	0,35	1,72	1,36
	0,50	2,01	1,85
	0,65	2,68	2,63
5E	0,35	1,94	1,92
	0,50	2,48	2,39
	0,65	3,03	2,59
10E	0,35	1,83	1,79
	0,50	2,42	2,34
	0,65	2,80	2,75
5CCA	0,35	1,92	1,90
	0,50	2,22	2,19
	0,65	3,10	2,77

As medidas que transformaram a microestrutura do concreto (como diferenças no tempo de cura, adoção ou não de adição mineral, relação a/ag etc.) tenderam a diminuir a inclinação da reta $y = a + k\sqrt{t}$ quando melhoraram a resistência dos concretos à penetração de cloretos (tendência observada também por Wee, et. al. 2000). Assim, a análise comparativa de ganho ou perda de resistência à penetração de cloretos foi realizada sobre a variação no índice k . Dessa forma, observa-se na tabela acima, que o maior valor de K , ou seja, a mistura com maior penetração de cloreto é a REF, como o esperado. E a mistura 30C foi a que apresentou menor penetração de cloreto.

4.1.1 Influência da relação água/aglomerante e teor de substituição do cimento pelas adições minerais

São apresentados, graficamente e respectivamente, nas Figuras 20 e 21, os coeficientes de penetração das misturas investigadas, submetidas a período de cura úmida de 3 e 7 dias. Relações a/agl mais baixas proporcionam menor valor de porosidade capilar, influenciando a penetração de íons cloretos no concreto.

Figura 19 - Coeficiente de Penetração de Cloretos de acordo com a relação a/agl e período de cura - 3 dias

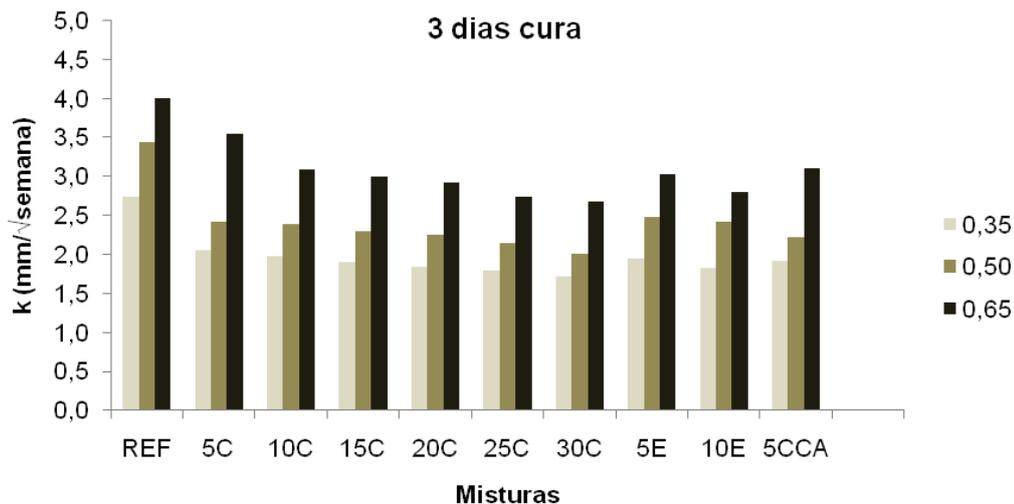
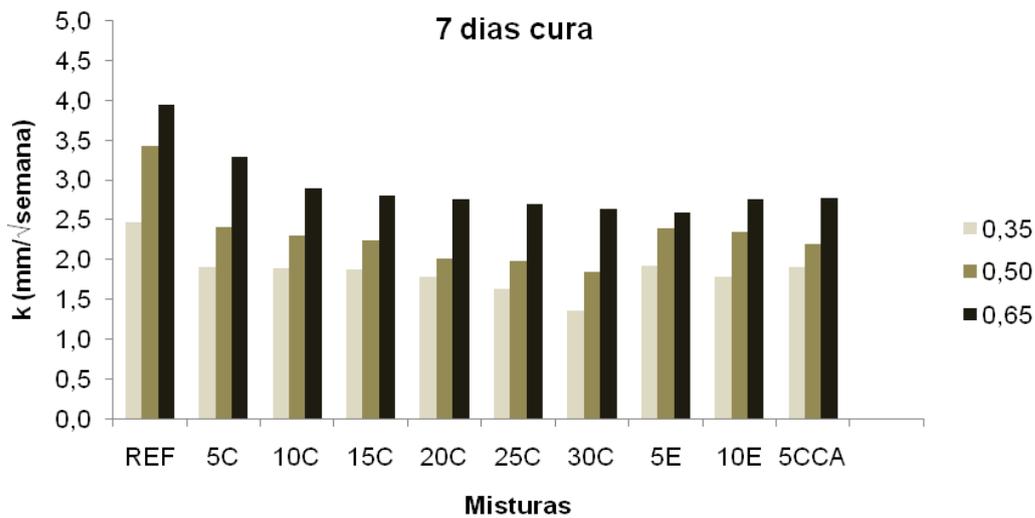


Figura 20 - Coeficiente de Penetração de Cloretos de acordo com a relação a/agl e período de cura - 7 dias



Analisando a relação entre a mistura 30C com a REF, para a cura úmida de 3 dias, as relações a/agl 0,35, 0,50 e 0,65 obtiveram 62,8%, 58,4% e 67%, respectivamente, de diferença. Para a cura úmida de 7 dias, as relações a/agl 0,35, 0,50 e 0,65 obtiveram a diferença de 55,1%, 54,1% e 66,6%, respectivamente. Logo, nota-se que o coeficiente de penetração nas misturas estudadas obteve maior redução, quanto maior a relação a/agl e maior teor de adição mineral. Assim, as misturas ternárias e quaternárias apresentaram maiores reduções no índice de penetração, pois constatou-se uma predominância do efeito de refinamento dos poros na microestrutura, que será maior conforme maior for o teor de substituição do cimento pelas adições minerais.

Tabela 15 - Índice de penetração de íons cloreto em relação à REF

(continua)

Mistura	a/agl	Índice de penetração (%)	
		Cura	
		3 dias	7 dias
REF	0,35	100	100
	0,50	100	100
	0,65	100	100
5C	0,35	75	77
	0,50	70	70
	0,65	89	83
10C	0,35	72	77
	0,50	69	67
	0,65	77	73

			(conclusão)
15C	0,35	69	76
	0,50	67	65
	0,65	75	71
20C	0,35	67	72
	0,50	65	59
	0,65	73	70
25C	0,35	65	66
	0,50	63	58
	0,65	69	68
30C	0,35	63	55
	0,50	58	54
	0,65	67	67
5E	0,35	71	78
	0,50	72	70
	0,65	76	66
10E	0,35	67	72
	0,50	70	68
	0,65	70	70
5CCA	0,35	70	77
	0,50	65	64
	0,65	78	70

O bom desempenho do concreto frente à penetração de íons cloreto depende tanto das alterações da microestrutura da mistura quanto da quantidade de aluminatos do aglomerante, principalmente da combinação desses fatores.

De acordo com Taffese e Sistonen (2017), o emprego de materiais complementares de cimento em misturas de concreto desempenha um papel no controle do ingresso de cloreto em idade posterior. Esses efeitos são devidos à mudança de propriedade contínua da zona de transição interfacial (ITZ) e à capacidade de ligação do concreto. Na presença da ITZ, onde a pasta de cimento na proximidade do agregado apresenta menor teor de cimento e maior porosidade em comparação com a pasta de cimento em regiões distantes do agregado, há maior facilidade do transporte de cloreto no concreto. A ITZ cobre uma parcela substancial do volume total de pasta de cimento e é controlada pela distribuição de tamanho do agregado. Isso pode explicar a importância da distribuição do tamanho do agregado na propriedade de transporte de cloreto no concreto. Os autores argumentaram que o aumento do conteúdo de agregado produz mais ITZ, mas isso é contrariado pela diminuição da porosidade total, uma vez que mais pasta é substituída por partículas de agregado não poroso.

Dellinghausen (2008) investigou a influência do tipo do cimento, branco ou cinza, do teor de escória e do prazo de cura na retração total e no coeficiente de penetração de cloretos. Constatou que o aumento do teor de escória resultou em

decréscimo nos valores de resistência à compressão, de retração e de penetração de cloretos para os dois cimentos investigados. A diminuição no período de cura resultou em maiores valores de retração e de penetração de cloretos, tanto no concreto branco quanto no cinza, independentemente do teor de escória utilizado.

Neville (2016) afirma que, os materiais cimentícios como a cinza volante, a escória granulada de alto-forno e a sílica ativa, quando adequadamente dosados na mistura, reduzem significativamente a penetrabilidade do concreto e aumentam sua resistividade, reduzindo, assim, a velocidade da corrosão. Em relação à sílica ativa seu efeito positivo se dá pelo refinamento da estrutura de poros da pasta de cimento endurecida, o que aumenta a resistividade, embora cause alguma redução no pH da água de poros, em virtude da reação com o Ca(OH)_2 .

Da Silva (2012) investigou a influência do prazo de cura (3 e 7 dias) e do teor de carbono grafítico na CCA (0,4% e 3,6%) na resistência à penetração de íons cloretos. Verificou aumento na penetração de cloretos com o aumento no teor de substituição independente do tipo de CCA, assim como com o aumento da relação a/agl. Contudo, a CCA de menor teor de carbono grafítico apresentou, no geral, os menores valores de índice K. O aumento no prazo de cura resultou em reduções na penetração de cloretos que não ultrapassaram 6%.

Ocorrem interações entre os cloretos e a matriz cimentícia, à medida que estes atravessam a camada de cobrimento do concreto. Neste sentido, ao adentrarem o concreto, uma parte dos cloretos é capturada pelas fases aluminato encontradas na pasta de cimento formando sais (Sal de Friedel e Sal de Kuzel); esse processo é denominado fixação química dos cloretos. Esta fixação implica em uma redução da quantidade de cloretos passíveis de se movimentar através da rede de poros do concreto, denominados cloretos livres, e chegar à região das armaduras propiciando condições para o estabelecimento do processo corrosivo (YUAN et al., 2009).

O equivalente alcalino também exerce influência sobre a capacidade de fixação de cloretos do concreto. O conteúdo de álcalis parece ter um efeito inibidor sobre a capacidade de fixação de cloretos. Este fato, no entanto, é encoberto por uma acentuada elevação da concentração de OH^- na solução dos poros, causando uma diminuição da relação Cl^-/OH^- (CSIZMADIA et al., 2001).

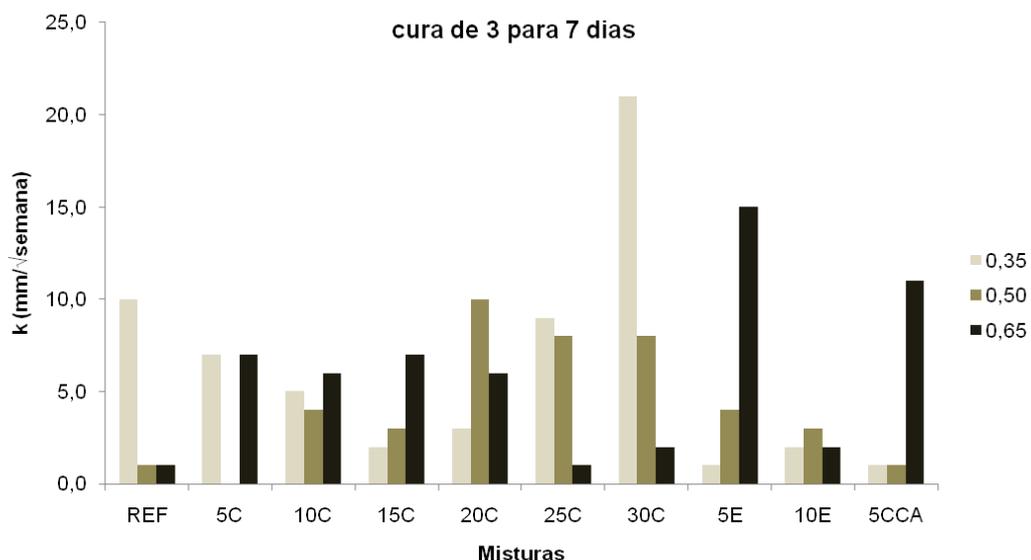
Com esses resultados, pode-se analisar a influência do teor de substituição das adições minerais no concreto e verificar o benefício que o aumento desse teor

proporciona à resistência à penetração de íons cloreto, independentemente da relação a/agl e do período de cura úmida.

4.1.2 Influência do período de cura úmida

Na Figura 21, apresenta-se a redução do coeficiente de penetração de cloretos devido ao aumento do prazo de cura, em porcentagem. Como esperado, para todas as misturas estudadas, houve diminuição do valor de k conforme o aumento do período de cura de três para sete dias.

Figura 21 - Influência do período de cura úmida sobre o coeficiente de penetração k



A redução do coeficiente variou de 0% a 21% e as misturas que foram menos sensíveis ao aumento do período de cura foram as de 5CCA (a/agl 0,35 e 0,50), 5E (a/agl 0,35), 25C (a/agl 0,65), pois apresentaram menos de 2% de redução. Já a mistura 30C, foi a que apresentou a maior diminuição do coeficiente k quando o período de cura úmida passou de três para sete dias de 21% para a relação a/agl 0,35.

Apenas quatro misturas apresentaram reduções maiores do que 10%, dentre todas as relações a/agl estudadas. São elas: REF (a/agl 0,35) com redução de 10%, 20C (a/agl 0,50) com redução de 10%, 30C (a/agl 0,35) com redução de 21%, e 5E (a/agl 0,65) com redução de 15%.

4.2 ANÁLISES DOS RESULTADOS DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS – ASTM C1202

Neste tópico são apresentados os resultados dos ensaios de penetração de cloretos das misturas investigadas, aos 28 e 91 dias, submetidos à cura úmida pelo período de 3 e 7 dias, segundo o método de ensaio proposto pela ASTM C 1202, e exposto no capítulo de metodologia. Esta norma apresenta uma classificação dos concretos segundo a resistência à penetração de cloretos: alta (> 4000 C); moderada (2000 – 4000 C); baixa (1000 – 2000 C); muito baixa (100 – 1000C) e desprezível (< 100C). Essa classificação consta nos gráficos apresentados de modo a permitir uma rápida classificação das misturas de acordo com a referida norma.

São discutidos: a influência da relação água/aglomerante, do teor de substituição de cimento por CLETA; o período de cura; da influência de misturas ternárias e quaternárias; a profundidade de penetração de cloreto após o ensaio por aspersão de nitrato de prata; a correlação carga passante versus resistência à compressão para mesmas relações água/aglomerante e, por último, a análise dos resultados de carga passante em igualdade de resistência à compressão. Para tanto foram calculadas as equações do tipo $Q = C/D^{a/agl}$ (tabela 1) a partir dos valores de carga passante e as respectivas relações a/agl para cada mistura investigada, assim como foram calculados coeficientes de determinação (r^2). Dessa forma, foi possível calcular os valores de carga passante em igualdade de resistência à compressão, tabela 9.

Na tabela 19, apresenta-se a classificação dos concretos segundo a penetração de cloretos, de acordo com a ASTM C1202. A classificação foi feita a partir da carga total passante obtida no ensaio TRPC.

Shi (2012), através de uma revisão de resultados publicados, relatou que fatores que têm grande influência sobre a condutividade elétrica do concreto (parâmetro medido pelo ensaio da ASTM C1202) pouco contribuem para o transporte de íons cloreto. Pela análise individual dos componentes do concreto, o autor afirmou que:

a) O uso de materiais cimentícios suplementares pode alterar significativamente a solução dos poros do concreto, porque incorporam muitos álcalis nos produtos hidratados, resultando na alteração química da solução dos poros;

b) O aumento do volume de agregado no concreto tem um efeito diluente de íons condutivos e álcalis que podem ser adsorvidos na sua superfície, diminuindo a condutividade. Certos tipos de agregados podem, também, liberar íons na solução dos poros que a tornam mais condutiva.

c) A composição do cimento também tem grande influência sobre a solução dos poros do concreto.

Wee, Suryavanshi e Tin (2000) relataram que a avaliação da penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata é influenciada pela estrutura de poros, pela capacidade de fixação de cloretos nas fases do cimento (C_3A e C_4AF) e, também, pela dupla camada elétrica formada nas paredes dos poros. Já o ensaio da ASTM C1202, além de ser controlado pela microestrutura, também depende da condutividade elétrica da solução dos poros. Assim, o rebaixamento da condutividade da solução dos poros (devido à diminuição dos íons OH^-) sugere maior ganho de resistência à penetração de cloretos quando se aumenta o grau de hidratação do que realmente acontece. Os autores ainda sugerem que, durante o ensaio acelerado, o teste rápido de penetração de cloretos (TRPC), o impulso gerado pelo campo elétrico externo deverá impedir, ou diminuir a interação química entre os cloretos e o concreto (como fixação de cloretos e dupla camada elétrica).

Segundo Bryant Junior (2009), especificações baseadas no ensaio da ASTM C 1202 são muito comuns na indústria da construção nos Estados Unidos. O autor ainda cita que o Departamento de Transporte da Virgínia está conduzindo um programa para usar a ASTM C 1202 como especificação de desempenho, e a Autoridade Portuária de Nova York e Nova Jersey usa a ASTM C1202 em suas especificações de desempenho de concretos.

Da análise geral dos resultados obtidos, constatou-se grande variabilidade dos valores de carga passante entre as várias misturas investigadas.

4.2.1 Influência da relação água/aglomerante

Independentemente da relação a/ag, do período de cura e da idade de ensaio, a REF apresentou os maiores valores de carga total passante, conforme pode ser visto nas Figuras 22, 23, 24 e 25, sendo classificada como o concreto de menor resistência à penetração de cloretos, dentre todos os analisados.

Tabela 16 - Resultados de carga total passante aos 28 dias

Mistura	Período de cura (dias)	Carga total passante (Coulombs)					
		a/ag			Coeficientes ^A		
		0.35	0.50	0.65	C	D	r ²
REF	3	2153	3536	5232	1405,30	0,4440	0,9954
	7	2135	2907	4620	1414,40	0,3860	0,9868
5C	3	1959	2940	4207	1347,50	0,3822	0,9987
	7	1887	2804	4184	1266,40	0,3981	1,0000
10C	3	1902	2756	3827	1350,40	0,3496	0,9988
	7	1841	2239	3430	1297,90	0,3111	0,9561
15C	3	1892	2265	3594	1309,80	0,3208	0,9396
	7	1399	1870	3093	909,07	0,3967	0,9765
20C	3	1379	1899	3244	867,37	0,4277	0,9793
	7	1274	1577	2709	827,24	0,3772	0,9408
25C	3	1197	1821	2875	767,60	0,4381	0,9994
	7	1092	1470	2669	664,51	0,4468	0,9640
30C	3	1125	1708	2830	699,05	0,4612	0,9970
	7	929	1461	2506	557,51	0,4962	0,9975
5EAF	3	1765	2427	4250	1092,50	0,4394	0,9754
	7	1649	2271	3821	1047,70	0,4202	0,9814
10EAF	3	1653	2623	3571	1153,70	0,3851	0,9870
	7	1477	1552	3420	857,93	0,4198	0,7941
5CCA	3	1886	2857	4320	1246,50	0,4144	1,0000
	7	1617	1975	3914	958,79	0,4420	0,9092

A: Coeficientes C e D das equações exponenciais que relacionam a Carga Total Passante (Q) e a relação a/ag x, dada pela expressão $Q = C/D^x$, em Coulombs, para cada mistura testada.

Tabela 17 - Resultados de carga total passante aos 91 dias

(continua)

Mistura	Período de cura (dias)	Carga total passante (Coulombs)					
		a/ag			Coeficientes ^A		
		0.35	0.50	0.65	C	D	r ²
REF	3	1294	2242	4836	645,36	0,6592	0,9909
	7	1688	1699	4314	904,98	0,4692	0,7552
5C	3	1368	2485	3472	897,09	0,4657	0,9742
	7	1119	2218	3194	698,56	0,5244	0,9700
10C	3	1112	2220	3246	685,53	0,5356	0,9726
	7	1083	1878	2781	693,86	0,4715	0,9907

								(conclusão)
15C	3	1106	1540	3446	578,94	0,5682	0,9451	
	7	1058	1326	2430	655,28	0,4158	0,9349	
20C	3	736	1426	2818	374,90	0,6713	0,9999	
	7	629	1072	2207	325,39	0,6276	0,9925	
25C	3	612	1457	2248	343,26	0,6505	0,9643	
	7	592	1057	1991	319,94	0,6064	0,9994	
30C	3	541	1675	2117	317,53	0,6822	0,8743	
	7	541	1375	2117	297,31	0,6822	0,9569	
5EAF	3	565	1037	1857	312,93	0,5949	0,9999	
	7	848	1458	2633	477,32	0,5665	0,9994	
10EAF	3	862	1646	2520	523,06	0,5364	0,9861	
	7	699	1244	2386	373,65	0,6139	0,9988	
5CCA	3	774	1832	2815	436,16	0,6456	0,9640	
	7	585	1741	2514	318,34	0,7290	0,9242	

A: Coeficientes C e D das equações exponenciais que relacionam a Carga Total Passante (Q) e a relação a/ag x, dada pela expressão $Q = C/Dx$, em Coulombs, para cada mistura testada.

Tabela 18 - Classificação dos concretos segundo a penetração de cloretos

Penetração de cloretos	Carga Total Passante (Coulomb)
alta	>4000
moderada	de 2000 a 4000
baixa	de 1000 a 2000
muito baixa	de 100 a 1000
desprezível	<100

Fonte: ASTM C1202 (2005).

Figura 22 - Carga total passante das misturas investigadas aos 28 dias de idade – 3 dias de cura

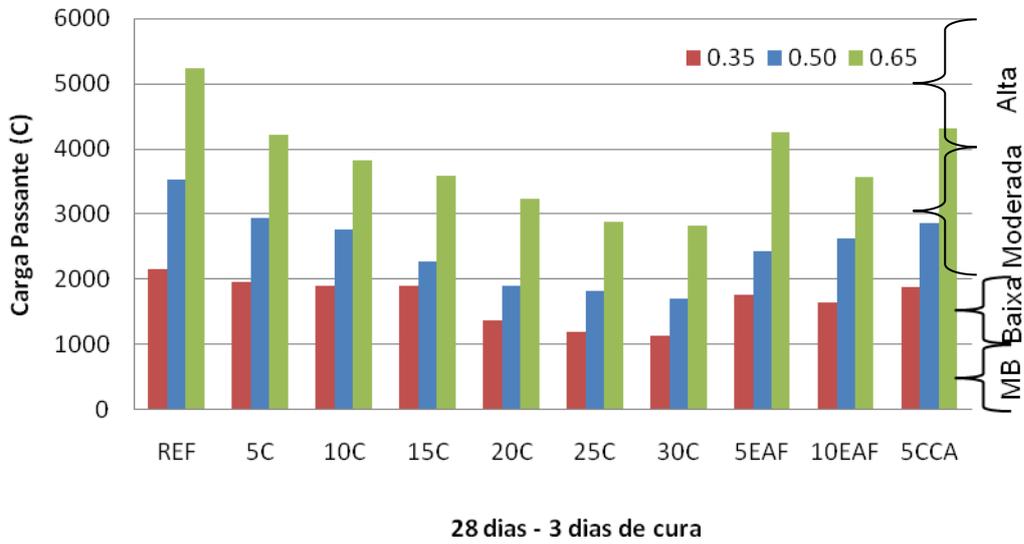


Figura 23 - Carga total passante das misturas investigadas aos 28 dias de idade – 7 dias de cura

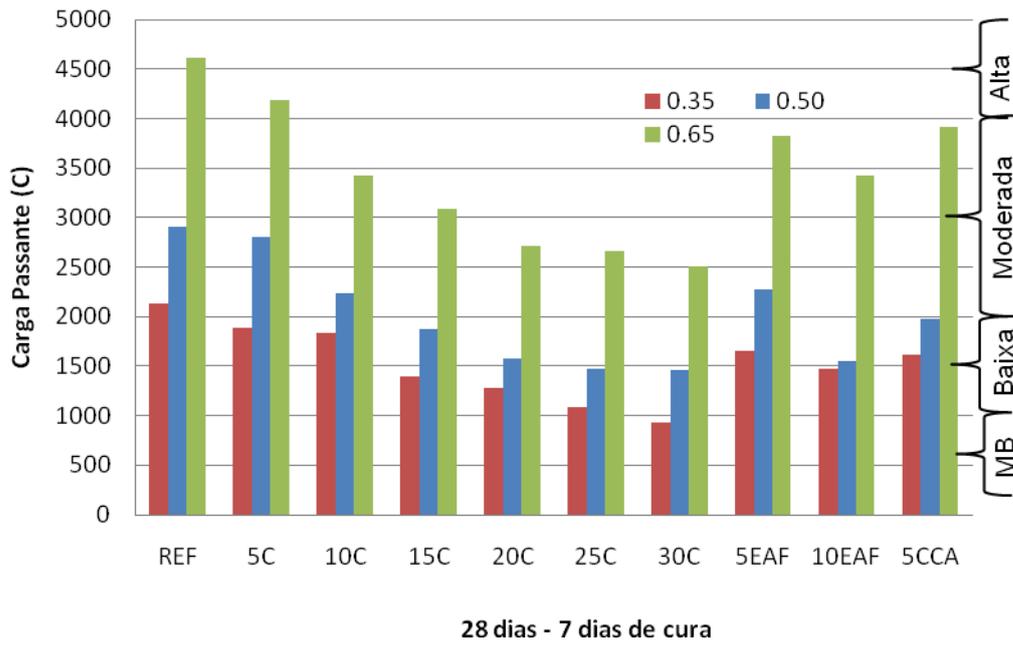


Figura 24 - Carga total passante das misturas investigadas segundo aos 91 dias de idade – 7 dias de cura

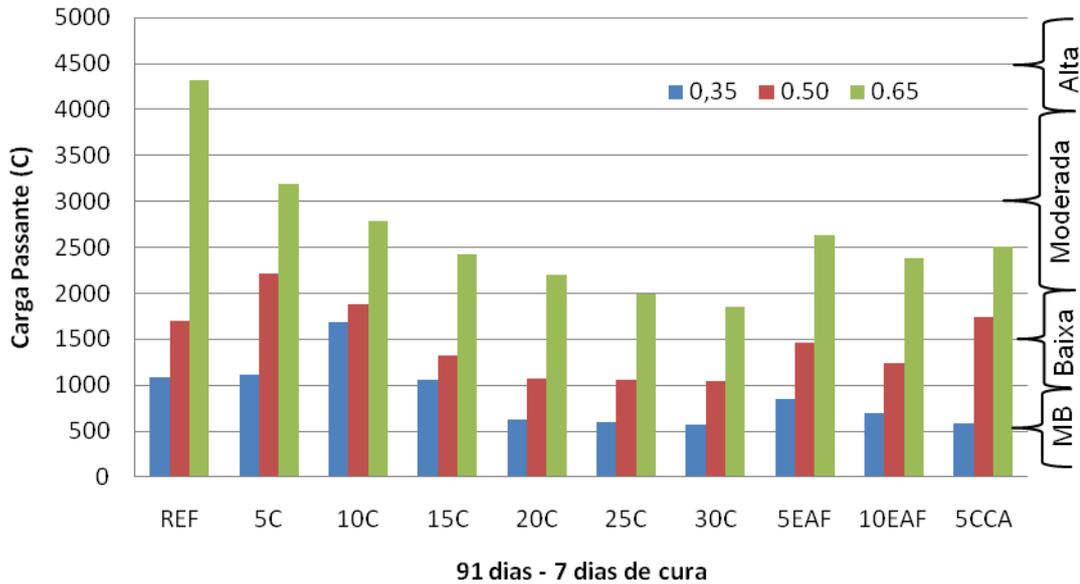
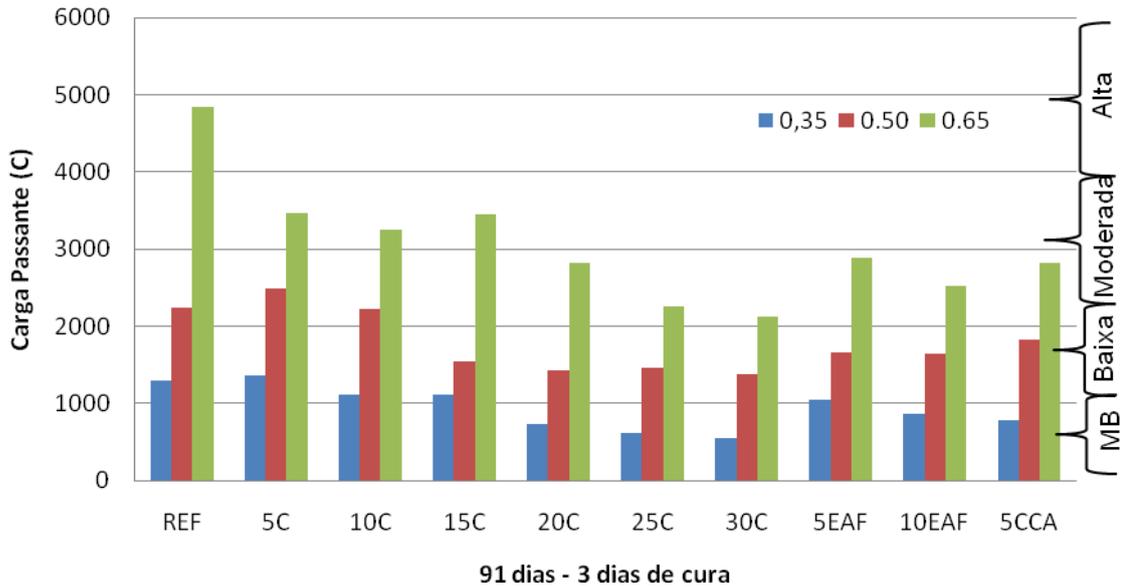


Figura 25 - Carga total passante das misturas investigadas aos 91 dias de idade – 3 dias de cura



Em todas as misturas investigadas, a redução da relação a/agl reduziu o valor da carga total passante, tornando o concreto menos permeável e, conseqüentemente, aumentando a resistência deste à penetração de cloretos, como esperado. Esse comportamento também foi observado por, Battagin et al. (2002), Gastaldini e Isaia (2005), Saciloto (2005), Crauss (2010), Zamberlan (2013) e outros. Para Battagin et al. (2002), a cura influencia a penetrabilidade do concreto aos íons cloreto, porém, a relação a/agl é a mais preponderante nesse aspecto.

Analisando a tabela 20, para a idade de ensaio de 28 dias e de cura úmida de três e sete dias, percebe-se que os resultados com menor carga passante foram para 30% CLETA para todas as relações a/agl. Confrontando-se com a tabela de classificação da norma ASTM C 1202 verifica-se que esta mistura se classifica como muito baixa, baixa e moderada resistência à penetração de cloretos para as relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65, respectivamente.

Quando comparada à mistura de referência, a mistura composta com 30% de CLETA apresentou reduções na penetração de cloretos, considerando cura úmida e relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65 de 52%, 48% e 54%, respectivamente. Para o prazo de cura de 7 dias essa mesma mistura, nas mesmas relações a/ag, apresentou reduções na penetração de cloretos de 44%, 50% e 54% respectivamente.

Para a idade de 91 dias e cura úmida de 3 e 7 dias, constata-se semelhança de comportamento àquele de 28 dias, ou seja, as menores cargas passantes foram para mistura com teor de substituição de 30%, para todas as três relações água/aglomerante, classificando-se como muito baixa, baixa e moderada, respectivamente

Já a classificação da mistura REF, apresentou modificações. Para a cura úmida de 3 dias e relações 0,35, 0,50 e 0,65 classificaram-se como baixa, moderada e alta, respectivamente. Para a cura úmida de 7 dias e relações de 0,35, 0,50 enquadrou-se como baixa penetração de cloretos para ambas. Já para a relação a/ag 0,65 a classificação do concreto foi como alta penetração de cloretos.

Dos resultados obtidos, foi possível constatar a influência da quantidade de água da mistura na penetrabilidade do concreto e, conseqüentemente, na resistência à penetração de cloretos, pois, em todas as misturas investigadas, quanto maior a relação a/ag utilizada maior foi o valor de carga total passante encontrado e menor a resistência à penetração de íons cloreto.

4.2.2 Influência do teor de substituição do cimento pelas adições minerais

O valor da carga total passante, obtida no TRPC, é diretamente influenciado pelas alterações na microestrutura da pasta e na composição química da solução aquosa dos poros, provocadas pelas reações pozolânicas (SHI; 2012). A descontinuidade e a tortuosidade da rede de poros dificultam a passagem dos íons cloreto e as alterações na composição química da solução de poros modificam a

condutividade elétrica do concreto. Fatos que sofrem influência direta da quantidade de adição mineral utilizada na mistura.

Neste tópico, será discutido isoladamente quanto o teor de substituição de cimento pelas adições minerais influência na redução da carga total passante. Nas tabelas 23 e 24, pode-se observar a porcentagem de redução da carga passante de cada mistura em relação à REF para os dois períodos de cura e três relações a/agl estudados.

Tabela 19 - Influência do teor de substituição na redução da carga passante aos 28 dias para três e sete dias de cura úmida

Mistura	a/agl	Redução de carga passante (%)	
		Cura	
		3 dias	7 dias
REF	0,35	0	0
	0,50	0	0
	0,65	0	0
5C	0,35	91	88
	0,50	83	96
	0,65	80	91
10C	0,35	88	86
	0,50	78	77
	0,65	73	74
15C	0,35	88	66
	0,50	64	64
	0,65	69	67
20C	0,35	64	60
	0,50	54	54
	0,65	62	59
25C	0,35	56	51
	0,50	51	51
	0,65	55	58
30C	0,35	52	44
	0,50	48	50
	0,65	54	54
5E	0,35	82	77
	0,50	69	78
	0,65	81	83
10E	0,35	77	69
	0,50	74	53
	0,65	68	74
5CCA	0,35	88	76
	0,50	81	68
	0,65	83	85

Tabela 20 - Influência do teor de substituição na redução da carga passante aos 91 dias para três e sete dias de cura úmida

Mistura	a/agl	Redução de carga passante (%)	
		Cura	
		3 dias	7 dias
REF	0,35	0	0
	0,50	0	0
	0,65	0	0
5C	0,35	106	66
	0,50	111	131
	0,65	72	74
10C	0,35	86	64
	0,50	99	111
	0,65	67	64
15C	0,35	85	63
	0,50	69	78
	0,65	71	56
20C	0,35	57	37
	0,50	64	63
	0,65	58	51
25C	0,35	47	35
	0,50	65	62
	0,65	46	46
30C	0,35	42	33
	0,50	61	61
	0,65	44	43
5E	0,35	81	50
	0,50	74	86
	0,65	59	61
10E	0,35	67	41
	0,50	73	73
	0,65	52	55
5CCA	0,35	60	35
	0,50	82	102
	0,65	58	58

É notável o bom desempenho das adições minerais investigadas quando se aumenta o teor de substituição nas misturas, independentemente do período de cura úmida. Analisando a tabela 20, para a idade de ensaio de 28 dias e de cura úmida de três e sete dias, percebe-se que os resultados com menor carga passante foram para 30% de CLETA. Para relação a/agl de 0,35, sendo que este reduziu 52% para 3 dias, e 44% para 7 dias quando comparado a mistura de REF. Para a relação a/agl

0,50 reduziram 48% e 50% 3 e 7 dias de cura úmida, respectivamente. E para a relação a/agl 0,65 de 3 e 7 dias com redução de 54%, para ambos dias de cura úmida.

No ensaio realizado aos 91 dias, todas as adições minerais mantiveram o mesmo comportamento em relação ao ensaio de 28 dias, para os períodos de cura úmida de três e sete dias, como pode ser observado na tabela 21. Percebe-se que os resultados com menor carga passante foram para 30% em todas as relações a/agl. Para a relação de 0,35 para 3 e 7 dias, com redução 42% e 33%, respectivamente. Para a relação de 0,50 para 3 e 7 dias, com redução 61% para ambas idades de cura úmida. E para a relação 0,65, com 3 e 7 dias de cura úmida, apresentou redução de 44% e 43%, respectivamente, quando comparados com a mistura REF.

Percebe-se com o aumento do teor de substituição, maiores reduções no valor da carga total passante, o que indica melhoria na qualidade dos concretos que contêm adições minerais.

4.2.3 Influência do período de cura úmida

Ao analisar o efeito do prolongamento do período de cura úmida de três para sete dias, observou-se uma diminuição do valor da carga passante obtida no ensaio ASTM C1202 nas misturas e relações a/ag investidas, como esperado. Na tabela 25, apresenta-se, em porcentagem, a influência que o aumento do período de cura teve sobre as misturas investigadas, para os ensaios de 28 e 91 dias.

Tabela 21 - Influência do período de cura úmida sobre a redução da carga passante para ensaio de 28 dias

Mistura	a/agl	Redução da carga passante(%)
		Cura de 3 para 7 dias
REF	0,35	1
	0,5	18
	0,65	12
5C	0,35	4
	0,5	5
	0,65	1

(continua)

(conclusão)

10C	0,35	3
	0,5	19
	0,65	10
15C	0,35	26
	0,5	17
	0,65	14
20C	0,35	8
	0,5	17
	0,65	16
25C	0,35	9
	0,5	19
	0,65	7
30C	0,35	17
	0,5	14
	0,65	11
5E	0,35	7
	0,5	6
	0,65	10
10E	0,35	11
	0,5	41
	0,65	4
5CCA	0,35	14
	0,5	31
	0,65	9

Tabela 22 - Influência do período de cura úmida sobre a redução da carga passante para ensaio de 91 dias

(continua)

Mistura	a/agl	Redução da carga passante(%)
		Cura de 3 para 7 dias
REF	0,35	-30
	0,5	24
	0,65	11
5C	0,35	18
	0,5	11
	0,65	8
10C	0,35	3
	0,5	15
	0,65	14
15C	0,35	4
	0,5	14
	0,65	29

(conclusão)		
20C	0,35	15
	0,5	25
	0,65	22
25C	0,35	3
	0,5	27
	0,65	11
30C	0,35	-4
	0,5	25
	0,65	12
5E	0,35	19
	0,5	12
	0,65	8
10E	0,35	19
	0,5	24
	0,65	5
5CCA	0,35	24
	0,5	5
	0,65	11

No ensaio ASTM C1202, realizado aos 28 dias, o aumento do período de cura úmida de três para sete dias resultou em reduções da carga passante que variam de 1% na mistura 5C e relação a/ag 0,65 até 41% na mistura 10E e relação a/ag 0,50.

Para a relação a/ag de 0,35, as reduções mais significativas ocorreram com as misturas de 15C (26%) e 30C (17%), ocupando a classe dos concretos com baixa penetração de cloretos, segundo critério de classificação proposto pela ASTM C1202.

Na relação a/ag de 0,50, a mistura 10E obteve uma redução de 41% da carga passante, o que possibilitou a passagem desta mistura da classe moderada para baixa penetração de cloretos. As misturas 15C, 20C, 25C, 30C, 10EAF, e 5CCA, respectivamente, também passaram a ocupar a classe de baixa penetração de cloretos.

Para a relação 0,65, os decréscimos mais expressivos foram nas misturas 15C, e 20C com porcentagem de redução de 14% e 16%, respectivamente. Porém, as misturas mencionadas mantiveram-se na classe de moderada penetração de cloretos.

No ensaio realizado aos 91 dias, o aumento do período de cura ocasionou decréscimos de carga passante que variaram de 3% para a mistura 10C e 25C (a/ag 0,35) até 29% para a mistura 15C (a/ag 0,65).

Na relação a/agl 0,35, as reduções mais significativas foram da 5E, 10E e 5CCA, com porcentagens de 19%, 19% e 24%, respectivamente.

Para a/agl 0,50, as misturas REF, 20C, 25C e 10E apresentaram decréscimos de carga passante acima dos 20%, sendo que apenas o REF e o 10C mudaram da classe moderada para baixa. E para a relação a/ag de 0,65, as reduções mais expressivas da carga passante, acima de 20%, ocorreram nas misturas 15C e 20C. Contudo, apenas as misturas 25C e 30C obtiveram, respectivamente, mudança de classe moderada para baixa.

Analisando os resultados obtidos no ensaio proposto pela ASTM C1202, observou-se não haver uma tendência geral para o valor percentual da redução quando se aumenta o teor de adição mineral ou da relação a/ag, sendo essa redução característica de cada mistura ou relação a/ag. Apenas percebeu-se, que, ao se prolongar o período de cura úmida de três para sete dias, as misturas compostas com CLETA mostraram-se mais sensíveis, apresentando decréscimos percentuais superiores na maioria dos casos.

Com isto, percebeu-se a influência que a cura exerce sobre o concreto em relação à capacidade de resistir ao ataque de íons agressivos, pois o referido aumento do período de cura proporcionou decréscimos de carga passante que ultrapassaram 40% em alguns casos, melhorando sensivelmente a qualidade dos concretos investigados.

4.2.4 Determinação da profundidade de penetração nas misturas submetidas ao ensaio TRPC (ASTM C1202).

Ao término do ensaio acelerado de penetração de cloretos, os corpos de prova foram rompidos ao meio por compressão diametral e receberam, nas faces rompidas, um jato de solução de nitrato de prata (0,1 M) com o objetivo de medir a profundidade de penetração de cloretos pelo método colorimétrico. Nas Figuras 26, 27, 28 e 29 são apresentados, em gráficos os resultados da correlação entre carga passante e profundidade de penetração aos 28 e 91 dias de ensaio para os dois períodos de cura úmida analisados.

De acordo com estes gráficos e com os coeficientes de correlação (R^2), observou-se a grande dependência entre estas duas grandezas, onde os resultados obtidos pelo teste colorimétrico, realizado após o ensaio acelerado, apresentaram

tendência semelhante aos da carga passante, evidenciando a forte correlação existente entre as duas grandezas.

Figura 26 - Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 para o período de cura de três dias aos 28 dias

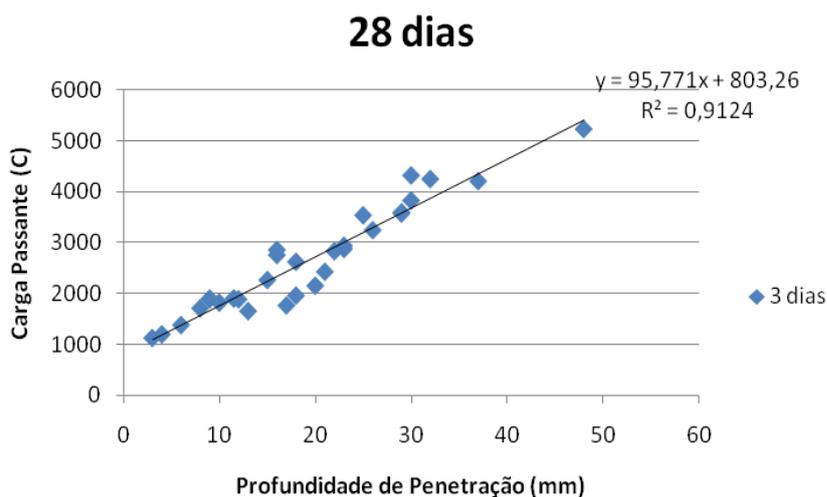


Figura 27 - Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 para o período de cura de sete dias aos 28 dias

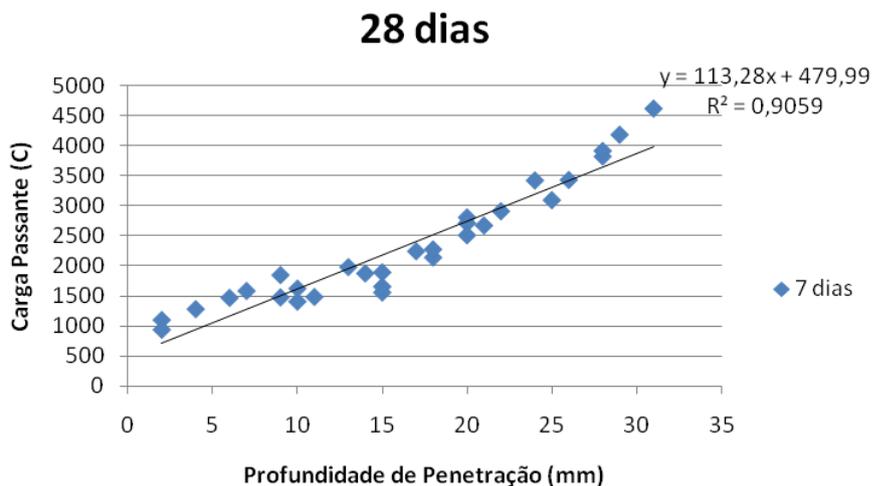


Figura 28 - Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 para o período de cura de três dias aos 91 dias

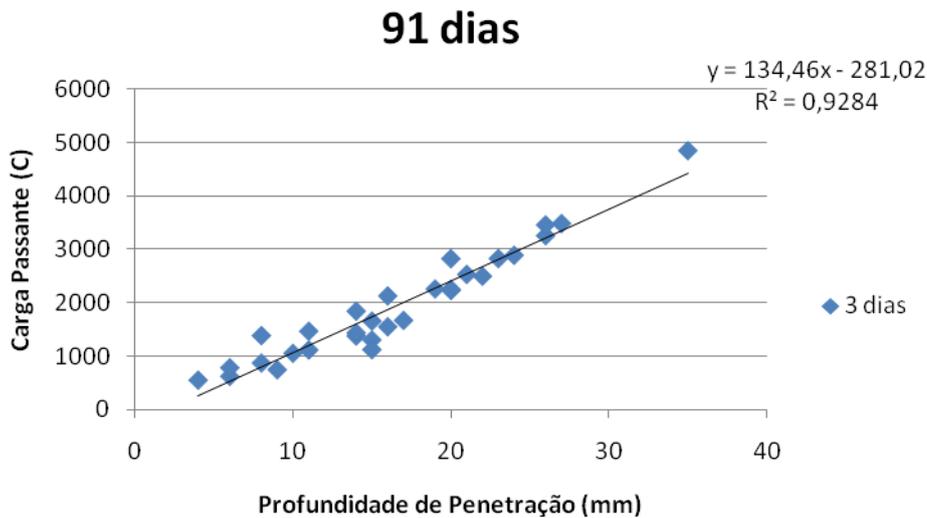
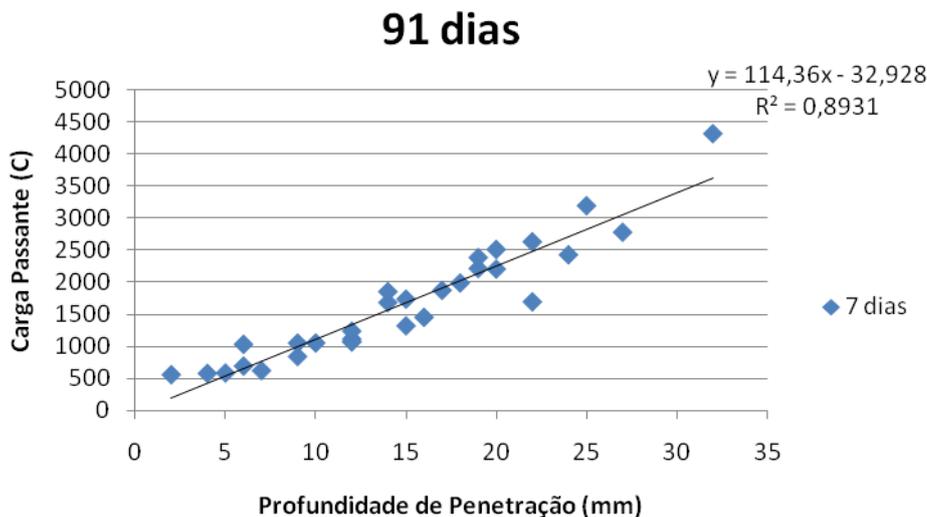


Figura 29 - Correlação entre carga passante e profundidade de penetração após ensaio ASTM C1202 para o período de cura de sete dias aos 91 dias



4.2.5 Comparação entre carga passante e resistência à compressão

Nesta pesquisa, a carga passante foi analisada em três níveis de resistência à compressão (35MPa, 45MPa e 55MPa), nas idades de 28 e 91 dias. Os níveis de resistência à compressão (f_{cj}) foram determinados a partir da equação 3, aplicando-se os valores de f_{ck} (30MPa, 40MPa e 50MPa) e do desvio padrão ($sd = 3,5$ MPa).

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,165.sd \quad (3)$$

Na tabela 22 são apresentadas as resistências médias obtidas no ensaio de compressão axial.

Tabela 22 - Resistências médias obtidas no ensaio de resistência à compressão axial

Mistura	Rel. a/agl	Resistência à compressão axial (Mpa)			
		28 dias		91 dias	
		3 dias	7 dias	3 dias	7 dias
REF	0,35	49,8	56,4	58,4	61,8
	0,50	40,6	44,8	46,2	47,4
	0,65	30,1	33,4	35,1	36,3
5L	0,35	53,0	73,2	59,4	74,3
	0,50	41,7	52,6	48,9	53,5
	0,65	32,7	37,8	40,2	42,6
10L	0,35	68,0	70,5	73,5	75,6
	0,50	50,0	52,7	54,1	58,0
	0,65	37,7	39,1	42,7	44,1
15L	0,35	64,7	69,2	76,9	82,3
	0,50	50,8	52,5	52,9	54,4
	0,65	31,7	37,1	35,6	41,0
20L	0,35	69,2	73,9	76,4	79,0
	0,50	49,6	54,2	53,0	57,8
	0,65	37,8	41,8	42,7	45,4
25L	0,35	66,8	74,1	72,4	84,1
	0,50	54,4	59,7	55,2	58,3
	0,65	34,1	35,8	41,6	42,7
30L	0,35	66,5	67,9	74,5	77,4
	0,50	46,9	47,5	50,8	54,9
	0,65	33,1	34,4	36,7	37,3
5EAF	0,35	75,4	81,1	80,4	85,1
	0,50	52,6	56,6	57,0	60,6
	0,65	35,9	39,0	38,4	42,4
10EAF	0,35	63,1	65,0	65,5	69,7
	0,50	46,5	54,4	52,0	57,2
	0,65	27,9	32,2	32,8	36,1
5CCA	0,35	63,3	75,4	69,3	81,6
	0,50	48,7	51,4	53,8	57,3
	0,65	33,4	35,8	37,8	39,4

Da análise dos resultados constata-se que todas as misturas apresentaram, como esperado, aumento nos valores de resistência à compressão axial com a diminuição da relação a/agl e aumento do grau de hidratação, ou seja, aumento da idade.

A substituição parcial do cimento por cinza de lodo de ETA resultou em aumento nos valores de resistência à compressão axial quando comparado ao concreto de referência, 100% cimento Portland, tanto aos 3 como aos 7 dias de cura.

As Figuras 30, 31 apresentam gráficos de cada mistura. Cada gráfico é composto por três pontos (cada ponto corresponde a uma relação a/ag), que correlacionam os valores encontrados para carga passante com valores de resistência à compressão.

Figura 30 - Carga passante versus resistência à compressão – 28 dias - três dias de cura

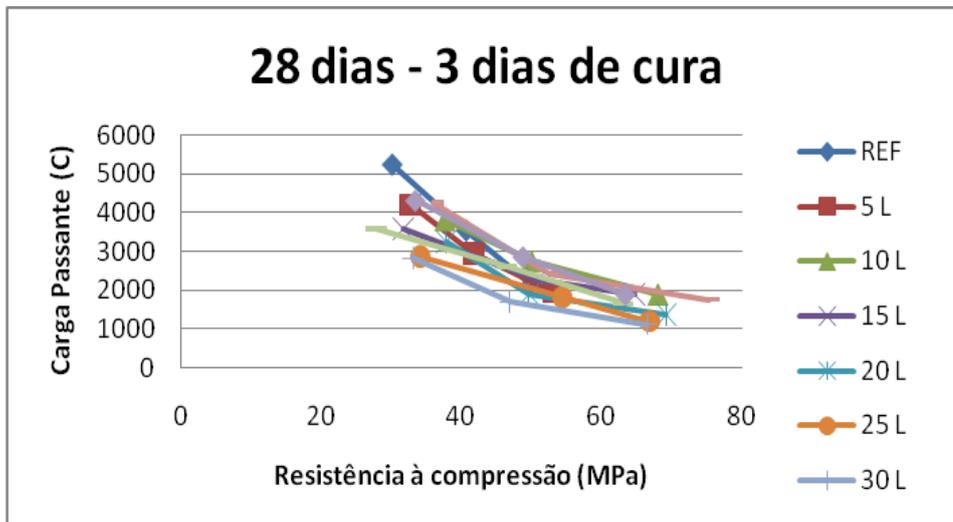


Figura 31 - Carga passante versus resistência à compressão – 28 dias - sete dias de cura

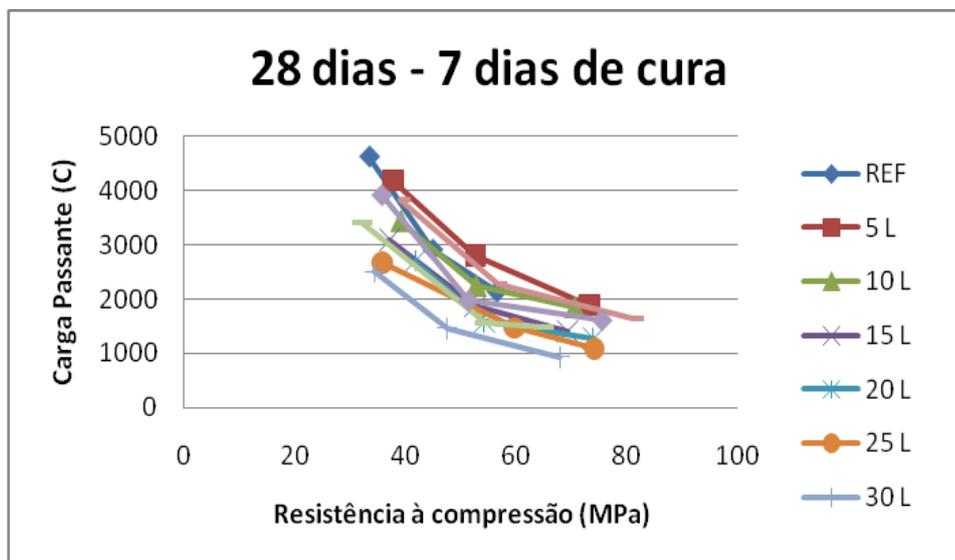


Figura 32 - Carga passante versus resistência à compressão – 91 dias - 3 dias de cura

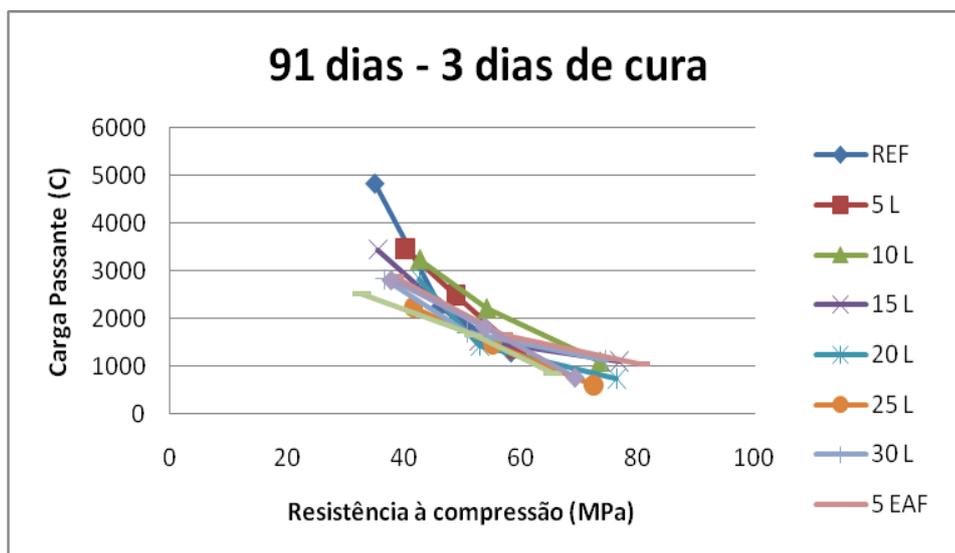
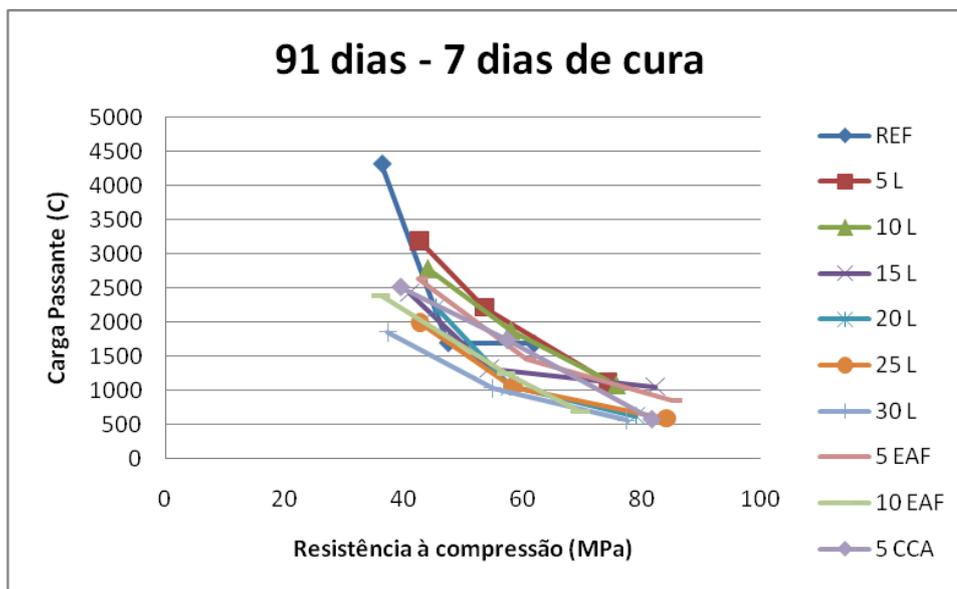


Figura 33 - Carga passante versus resistência à compressão – 91 dias - 7 dias de cura



De acordo com os resultados apresentados, observa-se uma relação inversa entre a carga passante e a resistência à compressão do concreto, ou seja, quanto maior o valor da resistência mecânica, menor foi o valor da carga passante. Isso se justifica pelo fato dos concretos de maior resistência mecânica serem menos porosos, e, portanto mais resistentes à penetração de íons agressivos, como os cloretos.

4.2.6 Análise dos resultados em igualdade de resistência

Desse modo, neste tópico analisaram-se as variações da carga passante e do coeficiente de difusão de cloretos para as diversas misturas investigadas, em três níveis de resistência à compressão: 35 MPa, 45MPa e 55MPa, e os valores de a/a_{gl} foram aplicados às equações $k = C/D^{a/ag}$, cujos coeficientes são apresentados na tabela 23.

Tabela 23 - Coeficiente de difusão de cloretos para os níveis de resistências de 35 MPa, 45 MPa e 50 MPa, e períodos de cura investigados

Mistura	Resistência (fc)	Relação a/agl		Coeficiente (mm/ $\sqrt{\text{sem}}$)	
		3 dias	7 dias	3 dias	7 dias
REF	35	0,57	0,63	2,35	2,41
	45	0,42	0,49	2,24	2,31
	55	0,3	0,37	2,16	2,24
5L	35	0,61	0,69	2,45	2,27
	45	0,45	0,57	2,32	2,26
	55	0,33	0,48	2,21	2,25
10L	35	0,69	0,71	2,37	2,4
	45	0,56	0,58	2,33	2,35
	55	0,46	0,48	2,29	2,32
15L	35	0,63	0,68	2,15	2,32
	45	0,52	0,56	2,15	2,29
	55	0,44	0,47	2,16	2,27
20L	35	0,68	0,74	2,35	2,48
	45	0,56	0,61	2,31	2,42
	55	0,46	0,5	2,28	2,37
25L	35	0,6	0,79	2,22	2,17
	45	0,49	0,69	2,21	2,18
	55	0,4	0,61	2,21	2,19
30L	35	0,65	0,61	2,16	2,19
	45	0,54	0,49	2,16	2,19
	55	0,45	0,41	2,17	2,19
5EAF	35	0,82	0,82	2,13	2,17
	45	0,72	0,72	2,14	2,19
	55	0,64	0,64	2,15	2,2
10 EAF	35	0,92	0,68	1,91	2,17
	45	0,83	0,57	1,94	2,17
	55	0,76	0,48	1,96	2,18
5 CCA	35	0,47	0,82	2,21	2,12
	45	0,35	0,72	2,19	2,13
	55	0,25	0,64	2,18	2,15

Observa-se, pela análise da tabela 23, que as menores relações a/agl, independente do nível de resistência, foram obtidas para a mistura REF, com 3 dias

de cura, enquanto os maiores valores foram obtidos para a mistura 10EAF, com 3 dias de cura.

A incorporação de CLETA ao concreto resulta no aumento da resistência mecânica deste. Sendo assim, concretos com maiores teores de CLETA atingiram um determinado nível de resistência com uma relação a/agl mais alta, resultando em uma maior porosidade. Além disso, a reação pozolânica, resultado da adição de CLETA, diminui a reserva alcalina do concreto, justificando a diminuição de penetração de cloretos nas misturas com maiores teores de CLETA.

Para melhor analisar a viabilidade da utilização dos concretos com adição de CLETA, foi estimado o tempo necessário para que os íons cloreto penetrem na camada de cobertura de 25mm, denominado de tempo de penetração (t_p), e atinjam a superfície do aço. Com isso, tem-se um parâmetro de comparação entre as misturas estudadas e uma noção sobre o comportamento da difusão dos cloretos nos concretos.

Para o cálculo do t_p , foram utilizados os resultados dos coeficientes k (para 35, 45 e 55 MPa), e o valor de cobertura de 25mm retirado da NBR 6118 (2014) (para viga/pilar nas diferentes classes de agressividade ambiental), como apresentado na tabela 24, e foram aplicados à equação de Bakker. (apresentada no capítulo 3).

Tabela 24 - T_p (em anos) necessário para os íons cloreto atingirem a espessura de 25mm na camada de passivação do aço, para os níveis de resistência de 35 MPa, 45 Mpa e 50 Mpa

(continua)

Nível de resistência	Mistura	Kc (mm/ $\sqrt{\text{semana}}$)				Tempo (anos)			
		28 dias		91 dias		28 dias		91 dias	
		3	7	3	7	3	7	3	7
35 MPa	REF	2,35	2,41	2,48	2,46	113	108	102	104
	5L	2,45	2,27	3,06	2,52	104	122	67	98
	10L	2,37	2,4	2,56	2,61	111	108	95	92
	15L	2,15	2,32	2,12	2,25	136	116	139	124
	20L	2,35	2,48	2,46	2,58	113	101	103	94
	25L	2,22	2,17	2,52	2,3	127	133	98	119
	30L	2,16	2,19	2,19	2,18	134	130	130	132
	5EAF	2,13	2,17	2,18	2,27	138	132	132	121
	10EAF	1,91	2,17	2,18	2,27	171	133	131	121
	5CCA	2,21	2,12	2,36	2,2	128	139	112	129

(conclusão)									
45 MPa	REF	2,24	2,31	2,37	2,37	125	117	112	112
	5L	2,32	2,26	2,74	2,45	117	123	83	104
	10L	2,33	2,35	2,48	2,52	115	113	102	98
	15L	2,15	2,29	2,14	2,25	135	119	136	124
	20L	2,31	2,42	2,41	2,51	117	107	108	99
	25L	2,21	2,18	2,45	2,29	128	131	104	119
	30L	2,16	2,19	2,2	2,19	133	130	130	130
	5EAF	2,14	2,19	2,19	2,27	136	131	130	121
	10EAF	1,94	2,17	2,18	2,26	166	132	131	123
	5CCA	2,19	2,13	2,32	2,21	130	137	116	128
55 MPa	REF	2,16	2,24	2,28	2,3	135	125	120	118
	5L	2,21	2,25	2,51	2,39	127	124	99	109
	10L	2,29	2,32	2,41	2,45	119	116	107	104
	15L	2,16	2,27	2,16	2,25	134	122	134	124
	20L	2,28	2,37	2,36	2,45	120	111	112	104
	25L	2,21	2,19	2,39	2,29	128	130	109	119
	30L	2,17	2,19	2,2	2,2	133	131	129	129
	5EAF	2,15	2,2	2,21	2,27	135	129	128	121
	10EAF	1,96	2,18	2,18	2,25	162	132	131	124
	5CCA	2,18	2,15	2,29	2,22	132	136	119	127

Com a análise dos resultados, percebeu-se que a mistura de 5L e 10L apresentaram os menores tempos de penetração (tp) para os três níveis de resistência, ou seja, possuem os menores tempos em anos para atingirem a profundidade de 25 mm. Para os três níveis de resistência, as misturas 15L, 25L, 30L, 5 EAF, e 10EAF apresentaram os maiores valores de tp , ou seja, têm o melhor desempenho frente às outras misturas.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve o objetivo de analisar a viabilidade do uso de cinza de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA), cinza de casca de arroz e escória de alto forno, como substituições ao cimento Portland, comparando-o com o concreto sem adições como referência, em propriedades ligadas à durabilidade, como, penetração de íons cloreto.

As substituições do cimento Portland por CLETA variaram de 0 a 30%, havendo ainda misturas ternárias de 20% CLETA e 5% EAF, 20% CLETA e 10% EAF; e quaternária, 15% CLETA, 5% EAF e 5% CCA. Foram testadas dez misturas aglomerantes, nas relações água/aglomerante (a/agl) 0,35, 0,50 e 0,65 com períodos de cura úmida de 3 e 7 dias.

Para atingir os objetivos traçados, foram realizados ensaios de penetração de cloretos, aos 28 e 91 dias, através do Teste Rápido de Penetração de Cloretos (TRPC – ASTM C1202), e aos 7, 14, 28, 56 e 91 dias, através do Ensaio de Penetração de Cloretos por Aspersão de Nitrato de Prata (EPCANP). Dessa forma, buscou-se alcançar os objetivos estabelecidos e entender os efeitos das adições minerais investigadas frente à penetração de cloretos no concreto.

Pelo EPCANP foi constatado que o coeficiente k é inversamente proporcional à relação a/agl e ao período de cura do concreto. Existe uma grande amplitude no valor de k entre as diferentes misturas estudadas. Verificou-se menor valor de coeficiente k para cura úmida de 7 dias. Isto pode ser explicado pelo fato do concreto ter adquirido uma maior compacidade e, com isso, uma maior resistência à penetração de cloretos.

Em relação às substituições utilizadas, a mistura de referência (REF) e aquelas compostas com 5% a 30% de cinza de lodo de ETA apresentaram reduções médias, no índice k , a variação de 0 a 21%. Para misturas ternárias e quaternárias as reduções médias variaram de 0% a 15%. Ou seja, a mistura 30C apresentou menor índice de penetração de cloretos.

Verificou-se que o coeficiente de penetração nas misturas investigadas foi maior tanto quanto a quantidade de água na mistura. Esse fato pode ser atribuído à maior porosidade e à formação de redes interconectadas de poros capilares em concretos com elevadas relações a/agl .

As misturas 5E, 10E e 5CCA apresentaram resultados semelhantes às misturas 15C, 20C e 25C, respectivamente. Sendo assim, percebe-se que as misturas ternárias e quartenárias estudadas apresentaram bons desempenhos para a maior resistência do concreto.

Com base nos resultados obtidos no TRPC, percebeu-se que a redução da relação a/agl , a substituição do cimento pelas adições minerais, o aumento do período de cura e a idade de ensaio reduziram os valores da carga total passante (Q). A REF foi a que apresentou os maiores valores de carga passante dentre todas as misturas investigadas, independentemente da relação a/agl e do período de cura. Já o menor valor de carga passante, entre as adições estudadas, foi a de maior teor de substituição de CLETA, 30C.

Segundo os critérios da ASTM C1202, para ensaio realizado aos 28 dias, apenas a REF de relação a/agl 0,50 e 0,65 para 3 dias de cura e 0,65 para 7 dias, 5C, 5EAF e 5CCA de relação 0,65 e cura de 3, foram classificadas como de alta penetração de cloretos. Para o ensaio aos 91 dias, também foi assim classificada apenas a REF de relação a/agl 0,65 para ambos os períodos de cura. A mistura 30C por apresentar o menor índice de penetração, classificou-se como baixa para a/agl 0,35 e 0,50 e moderada para a/agl 0,65 de cura 3 dias. E para a cura úmida de 7 dias apresentaram-se como muito baixa para a/agl 0,35, baixa para a/agl 0,50 e moderada para a/agl 0,65.

A profundidade (mm) da penetração de cloreto, obtidos pelo teste colorimétrico, apresentaram resultados semelhantes aos da carga passante, quanto maior a percentagem de CLETA, menor a penetração de cloretos no concreto.

Pode-se verificar que tanto a carga passante quanto o coeficiente de difusão de cloretos se relacionam de forma inversa com a resistência à compressão axial do concreto. Ou seja, quanto maior a resistência à compressão da mistura em questão, menor serão os valores de Q e k . Para uma mesma mistura, o coeficiente de difusão de cloretos e a carga passante são diretamente proporcionais. A elevação da carga passante de determinada mistura é acompanhada pelo aumento no seu coeficiente de difusão.

E para o cálculo do tp , com cobrimento de 25mm, percebeu-se que a mistura de 5C e 10C apresentaram os menores tempos de penetração (tp) para os três

níveis de resistência, e os maiores valores de t_p apresentaram nas misturas 30C, 5 EAF, e 10EAF.

Portanto, o concreto com a incorporação de CLETA obteve o melhor desempenho frente à penetração de cloretos, para ambos os ensaios, e sua utilização se torna viável em concretos com adição de até 30% de CLETA.

Além de melhorar propriedades de durabilidade das estruturas, o uso dessas adições promove um benefício ambiental diminuindo o uso de cimento e dando importância econômica a um resíduo que antes seria escoado, ou seja, que não poderia mais efetuar nenhuma função, e agora passou a ser recuperado. Assim, concedendo sequência ao ciclo de vida dos materiais.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12216**: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8 p.
- _____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos-classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10007**: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 21 p.
- _____. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- _____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- _____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão em corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- _____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. **NBR 7809**: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio.. Rio de Janeiro, 2006. 3 p.
- _____. **NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- _____. **NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6 p.
- _____. **NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.
- _____. **NBR 10006**: procedimentos para obtenção de solubilização de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2006. 3 p.
- ACHON, C. L.; SOARES, L. V.; MEGDA, C. R. Impactos ambientais causados pelo lançamento in natura de lodos provenientes de estações de tratamento de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23, 2005, Campo Grande, MS. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária, 2005.
- ADORNA, D. L. **Carbonatação acelerada em concretos com adição de cinzas de lodo de estação de tratamento de água**. 2016. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
- ALMUSALLAM, A. A. Effect of environmental conditions on the properties of fresh and hardened concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 23, p. 353-361, 2001.

ALVES, C. **Tratamento de Águas de Abastecimento**. Publindústria, 3. ed. Porto, 2010.

AMARAL, F. D. **Resistividade elétrica e absorção capilar de concretos compostos com cinza de lodo de eta**. 2015, 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1202**: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, 2012. 7 p.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: Pini, 1992.

ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão das armaduras: iniciação por cloretos**. 2001. 277f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, Porto Alegre, 2001.

ANTOLINI, M. B. **Retração total e penetração de cloretos em concretos compostos por cinza de lodo de ETA e outras adições minerais**. 2015. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

ARYA, C. et al. Chloride penetration in concrete subject to wet-dry cycling: influence of moisture content. **Structures and Building**, v. 167, n. SB2, p. 94-107, 2014.

BALESTRA, C. E. T. et al. Parâmetros ambientais e materiais que afetam a penetração de cloretos em estruturas de concreto – Estudo de caso da Ilha dos Arvoredos. **Reec: Revista Eletrônica de Engenharia Civil**. v. 13, n. 1, p. 270-282, jan./jun. 2017. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/reec/article/view/43054>. Acessado em: 20 abr. 2017.

BAROGHEL-BOUNY, V.; CAPRA, B.; LAURENS, S. A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento. CASCUDO, O.; CARASEK H. (Coord.). **Durabilidade do concreto**: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. IBRACON, 2014.

BASHEER, P. M .A. Monitoring electrical resistance of concretes containing alternative cementitious materials to assess their resistance to chloride penetration. **Cement & Concrete Composites**, v. 24, p. 4371-449, 2002.

BATALHA, C. T.; ROCHA, F. S. Avaliação das propriedades das argamassas com substituição parcial de cimento por cinza de lodo da estação de tratamento de água da cidade de Manaus. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56, 2014, Natal - RN. **Anais...** Natal: IBRACON, 2014.

BATALHA, C. T.; ROCHA, F. S. Caracterização do lodo calcinado das estações de tratamento de água da cidade de Manaus. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 55, 2013, Gramado - RS. **Anais...** Gramado: IBRACON, 2013.

BATALHA, C. T. et al. Utilização do lodo de Estação de Tratamento de Água como adição ao concreto de cimento Portland. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 51, 2009, Curitiba - PR. **Anais...** Curitiba: IBRACON, 2009.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia.** IBRACON, 2011.

BAUER, R. J. F. et al *Influência dos endurecedores de superfícies sobre a* BERTOLINI, L. **Materiais de construção: patologia, reabilitação e prevenção.** São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

BOULOMYTIS, V. T. G. Estudo da utilização de lodo de ETA como material combustível durante o processo de produção do cimento. **1º Fórum Internacional de Resíduos Sólidos.** Porto Alegre. 2007

BRASIL. **Decreto Nº 7.404** de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm >. Acesso em: 23 maio 2013.

_____. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos; altera a Lei 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm >. Acesso em: 21 maio 2013.

_____. Portaria nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade de água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Ministério da Saúde,** Poder Executivo, Brasília, DF, 14 dez. 2011. Capítulo IV.

BRYANT JR., J. W.; WEYERS, R. E.; GARZA, J. M. In-place resistivity of bridge deck concrete mixtures. **ACI Materials Journal,** Title nº106-M14, mar.-abr., 2009.

CAMACHO, J. B. et al. The influence of ion chloride on concretes made with sulfate-resistant cements and mineral admixtures. **Construction and Building Materials,** v. 70, p. 483-493, 2014.

CARVALHO, J. R.; MOTA, A. C. M.; MONTEIRO, E. C. B. Avaliação da presença de cloretos livres em pasta de concreto executadas com cimento CP II Z – 32, através do método colorimétrico de aspersão de nitrato de prata. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y XIII CONGRESSO DE CONTROL DE CALIDAD EM LA CONSTRUCCIÓN-CONPAT, 11., 13., v. 1, 2011. Antigua Guatemala-Guatemala. **Anales...** Antigua Guatemala: Conpat, 2011. Trabajo 201BR, p. 167-174, 2011.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas.** São Paulo: Pini; Goiânia: UFG, 1997.

CASCUDO, O; CARESEK, H. **Ação da Carbonatação no Concreto – Concreto: Ciência e Tecnologia,** , IBRACON, São Paulo, v. I, 2011.

CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE. **CO₂ and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry**. 2013. Disponível em: <http://www.wbcdcement.org/pdf/tf1_co2%20protocol%20v3.pdf>. Acessado em: 15 de novembro de 2017.

CHEEWAKET, T. et al. **Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year results under marine site**. *Construction and Building Materials*, v. 37, p. 693-698, 2012.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acomp. safra bras. grãos**, v. 1 - Safra 2013/14, n. 3 - Terceiro Levantamento, Brasília, p. 1-72, dez. 2013.

CONAMA. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução nº 430**, de 13 de maio de 2011. Diário Oficial da República Federativa do Brasil nº 92, Brasília (DF); 16 maio de 2011.

CONCRETO. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e CONGRESO DE CONTROL DE CALIDAD EM LA CONSTRUCCIÓN-CONPAT**, 11., Conpat, 2011. Trabajo 201BR, p. 167-174, 2011.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO; R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete. **Materials and Structures**, v. 42, p. 983-92, 2009.

CORDEIRO, J. S. Importância do Tratamento e Disposição Final Adequado dos Lodos de ETAs. In: REALI, M. A. P. **Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final do Lodo de ETA**. Rio de Janeiro: ABES/PROSAB, 1999. p 1-18.

CORSAN. COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO. **Regulamento dos serviços de água e esgoto da Corsan**. 2009.

CSIZMADIA, J.; BALÁZS, G.; TAMÁS, F. D. Chloride ion binding capacity of aluminoferrites. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 31, p. 577-588, 2001.

DA SILVA, M. **Retração Total e Penetração de cloretos em concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

DAL MOLIN, D. C. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia** / ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2011. 1 v.

_____. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações** / ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. 2 v.

DELLINGHAUSEN, L. M. **Retração total e penetração de cloretos em concretos com cimento Portland branco e escória de alto forno**. 2009, 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

DI BERNARDO et al. **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento e Água**. 2012. São Paulo: LDiBe, 2012. 530 p.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2. ed. São Carlos, Rima, 2005.

DYER, T. **Durabilidade do Concreto**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda., 2015.

FERREIRA, A. A. **Influência da temperatura de queima da cinza de casca de arroz na pozolanicidade e microestrutura do concreto**. Seminário da disciplina de novos materiais, Escola de Engenharia, curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1996.

FIGUEIREDO, E. P. **Concreto: Ciência e Tecnologia** / ed. G.C. Isaia. São Paulo:IBRACON, 2011. 1 v.

FYTIANOS, K.; VOUNDRIAS, E.; RAIKOS, N. **Modelling of phosphorus removal from aqueous and wastewater samples using ferric ion**. Environmental Pollution, v. 101, n.1, p. 123 -130, 1998.

GARTNER, E. **Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements**. Cem Concr Res 2004;34(9):1489–98.

GASTALDINI, A. L. G. et al. Influence of the use of rice husk ash on the electrical resistivity of concrete: a technical and economic feasibility study. **Construction and Build Materials**, v. 23, p. 3411-9, 2009.

HELENE, P. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. São Paulo, 1993, 271 p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

HENGEN, M. F. **Caracterização de cinza de lodo de ETA para uso no concreto - (resistência à compressão axial)**. Santa Maria, 2014, 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

HOPPE, T. F. **Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. Santa Maria, 2005, 147 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

HUNTZINGER, D.N; EATMON, T.D. A life-cycle assessment of cement manufacturing: comparing traditional process with alternative technologies. **J Clean Prod.**, v. 17, n. 7, p. 668-675, 2009.

ISAIA, G. C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concretos de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. São Paulo, 1995. 280p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1995.

ISAIA, G. C.; **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2011. 573p.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. Effects on durability of HPC with very high levels of mineral additions and hydrated lime. In: IV INTERNATIONAL ACI/CANMET CONFERENCE ON QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES AND RECENT ADVANCES IN CONCRETE MATERIALS AND TESTING. American Concrete Institute. 08-05, 2005. **Anais...** Coimbra: American Concrete Institute, 2005. Paper XII.03, p. 741-760, 2005.

JACOMINO, V. M. F. et al. **Controle ambiental das indústrias de produção de ferrogusa em altos-fornos a carvão vegetal**. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002. 302 p. ISBN: 85-88669-0566.

KULAKOWSKI, M. P.; PEREIRA, F. M.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete. **Construction and building materials**, v. 23, p. 1189-1195, 2009.

LAPA, J. S. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto**. Belo Horizonte: UFMG, 2008. Monografia de especialização. Universidade Federal de Minas Gerais. 2008.

LARA, R. C. et al. Estudio de la adición de arcillas calcinadas em la durabilidade de hormigones. **Revista Ingenieria de Construcción**, 26/1, 2011.

LAURENS.S. A Durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento. In: _____. **Durabilidade do concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. Ed. J.P Oliveira. Ed tradução; O. Cascudo e H. Carasek. São Paulo: IBRACON, 2014. cap. 9, p. 256-319.

LI, C. et al. **CO2 emissions due to cement manufacture**. Mater Sci Forum v. 685, p. 181-187, 2011.

LOPES, A. N. M.; SILVA, E. F.; NEPOMUCENO, A. A. Avaliação da durabilidade de concretos com e sem adição de sílica ativa para resistência entre 50 e 60 MPa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41. São Paulo, 1999. **Anais...** Artigo 3- 1-03. São Paulo: IBRACON, 1999.

MAES, M.; DE BELIE, N. Resistance of concrete and mortar against combined attack of chloride and sodium sulphate. **Cement and Concrete Composites**, v. 53, p. 59-72, 2014.

MAPA. Ministério Da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agricultura Mundial**. 2017. Disponível em: < <http://www.agricultura.gov.br> >. Acessado em: 23 nov.. 2017.

MARTIRENA, J. F. et al. In: XIII International Congress on the Chemistry of Cement, 2011, Madrid. **Anais eletrônicos...** Madrid: 2011. Disponível em: < https://www.dropbox.com/sh/Igq8ohx48xkjdds/AABm3witJQzy8Hr9V8g_qCqua/13%20ICCC%20proceedings/completos/017%20-Matirena%20Hern%C3%A1ndez%2C%20J.F.pdf > Acesso em: 23 out. 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1994. 573p.

MEIRA, G. R. et al. Analysis of chloride threshold from laboratory and field experiments in marine atmosphere zone. **Construction and Building Materials**, v. 55, p. 289-298, 2014.

MEYER C. **The greening of the concrete industry**. Cem Concr Compos v. 31, n. 8, p. 601-605, 2009.

MOSTARDEIRO NETO, C. Z. **Absorção capilar e resistividade elétrica de concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico**. Santa Maria. 2011. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

_____. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. Tradução: Ruy Alberto Cremonini. 2. ed. – Porto Alegre: Bookman, 2013.

PENG, J. et al. **Modeling of carbon dioxide measurement on cement plants**. Adv Mater Res. v. 610-613, p. 2120-2128, 2013.

PEREIRA, V. C. O. et al. Influence of cement type in reinforcement corrosion of mortars under action of chlorides. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 710-718, 2013.

PEREIRA, V. G. A. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: Influência do tipo de cimento, da relação A/C, da temperatura e do tempo de cura**. 2001. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, Porto Alegre, 2001.

QUÉRÉ, C. L. et al. **Global carbon budget, Earth Syst. Sci. Data** 2014 (2013) 235–263. Disponível em: http://dx.doi.org/10.3334/CDIAC/GCP_2013_V2.3. Acessado em: 24 nov. 2017.

REALI, M. A. P. (Coord.). **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES. 1999. 225 P.

REIBRAC. Belo Horizonte - MG. **Anais...** São Paulo: IBRACON. *resistência ao desgaste por abrasão* In: Congresso Brasileiro do Concreto, 44, 2002.

RICHTER, C. A. **Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2001.

SALES, A.; CORDEIRO, J. S.; SOUZA, F. R. de. **Estudo da Resistência a Compressão e da Absorção de água em concretos produzidos com a adição conjunta de resíduos de construção e demolição e lodos de estação de tratamento de água.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 31-40, abr./jun. 2004.

SANTOS, S. **Produção e Avaliação do Uso de Pozolana com Baixo Teor de Carbono Obtida da Cinza de Casca de Arroz Residual para Concreto de Alto Desempenho.** 2006. 187 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SHI, X. et al. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: an overview. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 125-138, 2012.

SILVA, T. J. Mecanismos de transporte de massa no concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia.** IBRACON, 2011.

SNIS. Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento. **Estudo Trata Brasil “Perdas de Água: Desafios ao Avanço do Saneamento Básico e à Escassez Hídrica – 2015.** Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/saneamento-no-brasil> . Acesso em: 15 mar. 2017.

SNIC. **Sindicato Nacional da Indústria Do Cimento.** Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <<http://www.snic.org.br>>. Acesso em: 20 nov. 2017.

SOKOLOVICZ, B. C.; ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; Microestrutura e propriedades mecânicas de protótipos de concreto com cinza de casca de arroz com e sem moagem prévia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56. Natal – RN. **Anais...** Natal: IBRACON, 2014.

SONG, H. W. et al. **Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments.** Cement and Concrete Composites, v. 30, p. 113-121, 2008 p.

SPERB, J. E. K. **Carbonatação e absorção capilar de concretos com adições minerais e ativadores químicos.** Santa Maria, 2003, 108p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, 2003.

STEIN, R. T. **Algumas características de pastas de cimento portland com adição de cinza de lodo de ETA.** 2016. 158f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

SURYAVANSHI, A. K.; SCANTLEBURY, J. D.; LYON, S. B. Corrosion of reinforcement steel embedded in high water-cement ratio concrete contaminated with chloride. **Cement & Concrete Composites**, Great Britain: Elsevier Science, v. 20, p. 263-381, 1998.

SURYAVANSHI, A. K.; SCANTLEBURY, J. D.; LYON, S. B. Corrosion of reinforcement steel embedded in high water-cement ratio concrete contaminated with chloride. **Cement & Concrete Composites**, Great Britain: Elsevier Science, v. 20, p. 263-381, 1998.

TAFFESE, W. Z.; SISTONEN, E. Significance of chloride penetration controlling parameters in concrete: Ensemble methods. **Construction & building materials**, v. 139, p. 9-23, mai. 2017. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817301903?via%3Dihub>. Acesso em: 20 abr. 2017.

TEIXEIRA, S. R. et al. The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. **Applied clay science**, v. 53, p. 561-565, 2011.

VEIGA, K. K. **Desempenho do cimento Portland branco com escória de alto-forno e ativador químico frente ao ataque por sulfato de sódio**. Santa Maria, 2011, 209 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

VON SPERLING, M. V. **Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 3. ed. v. 1, 2005.

WANG, G. M. et al. Experimental investigation on chloride diffusion and binding in concrete containing metakaolin. **Corrosion Engineering, Science and Technology**, v. 49, 2013, 282-286 p.

WANG, Z. et al. Corrosion of rebar in concrete under cyclic freeze-thaw and chloride salt action. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 40-47, 2014.

WEE, T. H.; SURYAVANSHI, A. K.; TIN, S. S. Evaluation of rapid chloride permeability test (RCPT) results for concrete containing mineral admixtures. **ACI Materials Journal**, v. 97, n. 2, p. 221-232, 2000.

WHITING, D. A.; NAGI, M. A. **Electrical resistivity of concrete**: a literature review. R&D Serial No. 2457. Skokie, Illinois, USA: Portland Cement Association, 2003.

ZAMBERLAN, F. **Penetração de cloretos em concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

ZHANG, X. et al. Studies on forecasting of carbonation depth of slag high performance concrete considering gas permeability. **Applied clay science**, v. 79, p. 36-40, 2013.