

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

Mariah Ben Antolini

**RETRAÇÃO TOTAL E PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM
CONCRETOS COMPOSTOS COM CINZA DE LODO DE ETA E
OUTRAS ADIÇÕES MINERAIS**

**Santa Maria, RS
2015**

Mariah Ben Antolini

**RETRAÇÃO TOTAL E PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS
COMPOSTOS COM CINZA DE LODO DE ETA E OUTRAS ADIÇÕES MINERAIS**

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. Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini

**Santa Maria, RS
2015**

Mariah Ben Antolini

**RETRAÇÃO TOTAL E PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS
COMPOSTOS COM CINZA DE LODO DE ETA E OUTRAS ADIÇÕES MINERAIS**

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**

Aprovada em 16 de dezembro de 2015:

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

Geraldo Cechela Isaía, Dr. (UFSM)

Ênio José Pazini Figueiredo, Dr. (UFG)

Santa Maria, RS
2015

AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda a minha família, em especial à minha mãe, Neila, a meu esposo, Vinicius, e à minha filha, Julia, pelo apoio, pelo incentivo, pelas ajudas e companhias durante a realização deste trabalho.

Ao meu professor orientador, Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini, pela orientação, pelos conhecimentos transmitidos, pela paciência e pela oportunidade de ter realizado esta pesquisa.

Aos integrantes do Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto (Gepecon), especialmente ao Fábio Amaral, à Tatiani Coletto, ao Maurício Silveira, ao Lucas Lamberti e a Thesse Luduvico, 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, Dr. Geraldo Cechella Isaia e Dr. Enio Pazini Figueiredo, pela atenção e colaboração.

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

A todos, o meu muito obrigada!

RESUMO

RETRAÇÃO TOTAL E PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS COMPOSTOS COM CINZA DE LODO DE ETA E OUTRAS ADIÇÕES MINERAIS

AUTORA: Mariah Ben Antolini

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini

O uso de adições minerais e de substituições destas no processo de produção do concreto traz grande benefício à sociedade, por dar um destino a resíduos poluentes e, principalmente, por reduzir o consumo de energia e a poluição do ar gerados pela produção do cimento, ao substituir grande parte desse produto na indústria da construção civil. Neste estudo, investigou-se a influência do teor e do período de cura na utilização de misturas contendo diferentes teores de cinza de lodo de ETA (CLETA), cinza de casca de arroz (CCA) e escória de alto forno (EAF), frente à retração total e à penetração de cloretos de concretos com cimento Portland de alta resistência inicial. Para isso, foram testadas dez misturas aglomerantes, nas relações água/aglomerante 0,35, 0,50 e 0,65, com períodos de cura úmida de 3 e 7 dias. As substituições do cimento Portland por CLETA variaram de 0% a 30%, havendo ainda misturas ternárias, 20% CLETA e 5% EAF, 20% CLETA e 10% EAF, e quaternária, 15% CLETA, 5% EAF e 5% CCA. As leituras de retração foram realizadas com o uso do comparador de expansibilidade nas idades de ensaio, 0, 7, 14, 21, 28, 35, 56, 91, 182 e 365 dias após a retirada da câmara úmida. Após o período de 91 dias de secagem, foi realizado o ensaio de penetração de cloretos por imersão, a fim de analisar a profundidade de penetração de cloretos em corpos de prova em estado de retração. Dos resultados obtidos, constatou-se que, de maneira geral, embora tenham sido observados valores de retração pouco maiores para a cura de 3 dias, não foi constatada variação pronunciada entre os prazos de cura. De todas as misturas investigadas, a que apresentou menor valor de retração foi a de referência, em todas as idades de ensaio e nos dois períodos de cura. Seguindo desta, em ordem crescente de retração, vem 5%CLETA (5 L), 10% CLETA (10 L), 15% CLETA (15 L), que tiveram na maioria das misturas um comportamento similar ao de 10% CLETA (10 L), seguido das misturas 20% CLETA (20 L), 25 %CLETA (20 L) e 30% CLETA (30 L). No que diz respeito à penetração de íons cloreto, houve um aumento na resistência quando o tempo de cura passou de 3 para 7 dias. Constatou-se que as misturas ternárias e quaternárias apresentam melhores desempenhos quando comparadas às misturas binárias, compostas por CLETA e cimento Portland.

Palavras-chave: concreto, retração, cloretos, cura, adições minerais.

ABSTRACT

TOTAL SHRINKAGE AND CHLORIDE PENETRATION IN CONCRETE WITH WATER TREATMENT PLANT SLUDGE ASH AND OTHER MINERAL ADDITIONS

Author: Mariah Ben Antolini
Supervisor: Prof. Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini

The use of mineral additions and substitutions in concrete production is highly beneficial to society. When used as substitutes for cement, they provide an alternative destination to polluting waste while contributing to reducing the power consumption and air pollution associated with cement production. This study investigated the influence of different concentrations of additions and curing periods of concrete mixes with water treatment plant sludge ash (CLETA), rice husk ash (CCA) and blast furnace slag (EAF) on total shrinkage and chloride penetration in concrete prepared with high early strength Portland cement. Ten mixes with water/binder ratios of 0.35, 0.50 and 0.65, with wet cure periods of 3 and 7 days were tested. CLETA substitutions for Portland cement ranged from 0% to 30%. Three-component mixes with 20% CLETA and 5% EAF, 20% CLETA and 10% EAF and a four-component mix with 15% CLETA, 5% EAF and 5% CCA were also tested. Shrinkage was measured using a length comparator at 0, 7, 14, 21, 28, 35, 56, 91, 182 and 365 days after removing the sample from the controlled humidity chamber. After 91 days of drying, samples were tested for chloride penetration to check chloride penetration depths in shrinking test samples. Results indicate that even though shrinkage values at 3 days are slightly higher, no significant variation was found for different curing periods. The lowest shrinkage value was found in the reference sample for all tested periods and in the two curing periods. Next, in an increasing shrinkage values, came the following samples: 5%CLETA (5 L), 10% CLETA (10 L), 15% CLETA (15 L), which displayed, for most mixes, a similar behavior to that of 10% CLETA (10 L), followed by mixes 20% CLETA (20 L), 25 %CLETA (20 L) and 30% CLETA (30 L). Chloride penetration resistance increased when the curing time was increased from 3 to 7 days. Three- and four-component mixes showed improved performance when compared to binary samples with CLETA and Portland cement.

Keywords: concrete, shrinkage, chlorides, curing, mineral additions.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Participação das regiões do Brasil na produção de setembro 2015 ..	20
Figura 2 – Participação dos estados na safra de 2015	21
Quadro 1 – Previsão do IBGE para a safra de cereais, leguminosas e oleaginosas	22
Figura 3 – Micrografia eletrônica de varredura da cinza de casca de arroz queimada a 560 °C	23
Figura 4 – Processo da produção da escória de alto forno	26
Figura 5 – Evolução percentual do uso de adições no Brasil	38
Figura 6 – Representação esquemática da estrutura da pasta	43
Figura 7 – Diagrama de forças de coesão no interior e na superfície de um líquido	44
Figura 8 – Esquema da formação dos mecanismos entre as partículas próximas à superfície do concreto devido à evaporação	46
Figura 9 – Diagrama dos estágios e tipos de retração	47
Figura 10 – Ilustração do mecanismo de retração total	47
Figura 11 – Influência do teor em volume de agregado sobre a relação entre a retração de concretos para a retração da pasta de cimento	50
Figura 12 – Relação entre a retração e o tempo de concretos conservados a diferentes umidades relativas. Tempo contado a partir do fim de 28 dias de cura úmida	57
Figura 13 – Representação da corrosão eletroquímica no concreto armado	59
Figura 14 – Ilustração da fissuração e destacamento do concreto devido à corrosão da armadura	61
Figura 15 – Evolução esquemática da deterioração de estruturas de concreto por corrosão de armadura	61
Figura 16 – Difractograma de raios-X da amostra de lodo: A) <i>in natura</i> e B) calcinada a 600°C	75
Quadro 2 – Caracterização por análises termodiferencial e termogravimétrica do lodo calcinado a 600° C por 1 hora realizada pela ABCP	76
Figura 17 – Gráfico da Análise Termodiferencial e Termogravimétrica da amostra de argila	77
Figura 18 – Fôrmas prismáticas onde foram realizadas as moldagens, com a inserção de pinos nas extremidades	85
Figura 19 – Fôrmas prismáticas moldadas com os corpos de prova	86
Figura 20 – Corpos de prova desmoldados, identificados e conservados em sala climatizada	86
Figura 21 – Comparador de expansibilidade	87
Figura 22 – Corpos de prova fatiados, preparados para imersão em tanque, com 4 faces impermeabilizadas com verniz	88
Figura 23 – Corpos de prova fatiados, imersos no tanque	88
Figura 24 – Demonstração do ensaio de penetração de íons cloreto	89
Figura 25 – Corpo de prova com penetração de íons cloreto	90
Figura 26 – Exemplo de gráfico para obtenção dos coeficientes k	91
Figura 27 – Retração total das misturas com 3 dias de cura para as diferentes relações a/gl, misturas com teores de 0 a 30% lodo	94

Figura 28 – Retração total das misturas com 7 dias de cura para as diferentes relações a/gl, misturas com teores de 0 a 30% lodo	95
Figura 29 – Retração total das misturas ternárias contendo 20% L e 5% CCa ou 5% EAF – cura 3 d.	97
Figura 30 – Retração total das misturas ternárias contendo 20% L e 5 % CCa ou 5% EAF – cura 7 d.	98
Figura 31 – Retração total das misturas com 3 dias de cura para as diferentes relações a/gl. Comparação do REF com as misturas de teores 30 %	99
Figura 32 – Retração total das misturas com 7 dias de cura para as diferentes relações a/gl. Comparação do REF com as misturas de teores 30 %	100
Figura 33 – Coeficientes de penetração de cloretos de acordo com a relação e prazo de cura úmida – 3 e 7 dias	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Proporção das adições minerais em cada mistura	72
Tabela 2 – Características físico-químicas do lodo de estação de tratamento de água in natura e calcinado a 600°C por 1 hora	73
Tabela 3 – Composição mineralógica do lodo <i>in natura</i>	74
Tabela 4 – Composição mineralógica do lodo calcinado a 600°C por 1 hora	75
Tabela 5 – Resultados termogravimétricos do lodo calcinado a 600° C por 1 hora	76
Tabela 6 – Características físico-químicas dos aglomerantes	78
Tabela 7 – Resultados dos ensaios Chapelle modificado realizados no IPT, com amostras de lodo de ETA calcinados a diferentes temperaturas	79
Tabela 8 – Características físicas dos agregados	81
Tabela 9 – Consumo dos materiais por metro cúbico de concreto	83
Tabela 10 – Retração final das misturas	93
Tabela 11 – Coeficiente de penetração k das misturas investigadas em cada período de cura	106
Tabela 12 – Índices de penetração de íons cloretos das misturas em relação ao concreto de referência com cura de 3 e 7 dias	109
Tabela 13 – Variação do índice k com o aumento do tempo de cura	112

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVAS	16
1.2	DEFINIÇÃO TEMÁTICA	16
1.2.1	Apresentação do tema	16
1.3	OBJETIVOS	16
1.3.1	Objetivo geral	16
1.3.2	Objetivos específicos	17
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE ADIÇÕES MINERAIS	19
2.1	ADIÇÕES MINERAIS	19
2.2	CASCA DE ARROZ	19
2.3	CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA)	23
2.4	ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO FORNO (EAF)	25
2.5	LODO DE ETA	30
2.6	CINZA DE LODO DE ETA (CLETA)	32
2.7	ARGILA CALCINADA	33
2.8	CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO COM ADIÇÕES	35
3	DURABILIDADE DO CONCRETO: DEFINIÇÕES GERAIS	39
3.1	RETRAÇÃO DO CONCRETO	41
3.1.1	Introdução	41
3.1.2	Conceituação de Retração	41
3.1.3	Mecanismos e tipos	42
3.1.4	Influência do conteúdo de água e de cimento	49
3.1.5	O efeito do agregado	51
3.1.6	Influência de adições minerais	52
3.1.7	A influência do tipo de cimento e dos aditivos químicos	54
3.1.8	Influência da cura	53
3.1.9	Efeitos do ambiente	55
3.1.10	A influência do tamanho da peça	57
3.2	AÇÃO DE ÍONS CLORETO	58
3.2.1	Introdução	58
3.2.2	Corrosão das armaduras	58
3.2.3	Os condicionantes para haver a corrosão	61
3.2.4	Penetração de íons Cloreto	62
3.2.5	Os efeitos dos íons de cloreto na corrosão	65
3.2.6	A influência da relação água/cimento e condições de cura na penetração de íons cloreto	66
3.2.7	A influência do uso das adições no fenômeno da corrosão e penetração de íons cloreto	67
3.2.8	Os benefícios do uso da Escória de alto forno na penetração de íons cloreto	68
3.2.9	Os benefícios do uso de Cinza de casca de arroz na penetração de íons cloreto	69
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	71

4.1	MATERIAIS	72
4.2	CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS	72
4.2.1	Aglomerantes	72
4.2.2	Agregados	80
4.2.3	Aditivos	81
4.2.4	Água	82
4.2.5	Dosagem do concreto	82
4.2.6	Moldagem e cura dos corpos de prova	84
4.3	ENSAIOS REALIZADOS	85
4.3.1	Retração total	85
4.3.2	Penetração de íons cloreto por imersão	87
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	93
5.1	INTRODUÇÃO	93
5.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS DE RETRAÇÃO TOTAL	93
5.2.1	Comparação os diferentes teores de substituição de CLETA e prazo de cura	96
5.2.2	Comportamento das misturas ternárias	96
5.2.3	Discussão dos resultados	101
5.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS DE PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO POR IMERSÃO	104
5.3.1	Misturas compostas em relação ao concreto de referência	105
5.3.2	Influência da idade de cura no índice k nas misturas com CLETA	111
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	113
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	115
	REFERÊNCIAS	117

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, em âmbito mundial, há uma preocupação cada vez maior com as alterações climáticas que ocorrem em nosso planeta e com a necessidade de adoção de condutas mais sustentáveis, a fim de diminuir a poluição do meio ambiente. A temperatura média da terra aumentou 0,6°C desde o início da era industrial, conduzindo o planeta a excepcionais fenômenos meteorológicos localizados. Muitos gases, provenientes da atividade antropogênica, têm atuado como verdadeiros catalisadores deste aumento de temperatura. (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

A curva de elevação desta segue a da população humana de maneira impressionante (ISAIA, 2004). Neste particular, a construção civil é um dos setores da economia que afeta de maneira considerável o meio ambiente, tanto pelo consumo de recursos naturais, quanto pela produção de resíduos (SOUZA et al., 2004).

O concreto, material mais consumido pelo homem (MEHTA; MONTEIRO 2008) é, normalmente, o mais utilizado na produção de estruturas na construção civil, devido ao seu relativo baixo custo, à disponibilidade dos materiais constituintes, à sua adequação às mais variadas formas arquitetônicas e à sua boa resistência mecânica. Este material tem como principal constituinte o cimento, que consome muita energia e emite quantidade elevada de dióxido de carbono (CO₂), um dos gases que contribui para o efeito estufa. Para cada tonelada de cimento produzido, há a emissão de 0,8 a 1 tonelada de CO₂, dependendo das condições de produção (HOOTON; BICKLEY; PERSHING, 2005).

Quando devidamente proporcionado e executado, o concreto tem como principal qualidade a durabilidade, que fornece um ciclo de vida muito longo e limita, por conseguinte, o impacto dessa utilização. No entanto, erros de projeto, especificações inadequadas de materiais, dosagens que não levam em conta a agressividade do meio ou mesmo falhas construtivas comprometem a durabilidade, exigindo manutenção regular e importante e podendo inverter totalmente a análise de ciclo de vida de todo conjunto (ISAIA, 2014).

A necessidade de alinhar-se a Agenda 21 impõe ao setor da construção medidas que conduzam à redução e à otimização do consumo de materiais e energia, visando à redução dos resíduos gerados, à preservação do ambiente natural e à melhoria da qualidade do ambiente construído.

No tocante às estruturas de concreto, a maneira mais eficaz de melhorar a sustentabilidade das estruturas é fazê-las durar mais tempo por meio de um projeto focado na durabilidade e na minimização dos defeitos de construção (HOOTON; BICKLEY, 2014). Contudo, nos últimos anos, tem crescido o número de estruturas de concreto armado com manifestações patológicas, principalmente com relação à corrosão das armaduras, como resultado do envelhecimento precoce das construções existentes.

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

Para Aïtcin (2003), dois parâmetros-chave controlam a penetração de qualquer agente agressivo no concreto: a relação água/aglomerante (a/ag) e a cura do concreto. Quando se trata de um concreto de alto desempenho, especificar uma relação a/ag baixa é uma condição necessária, porém não suficiente. A cura assume um papel importante principalmente quando se trata de concretos com adições minerais.

A substituição parcial do cimento por adições minerais é uma das formas de contribuir para a sustentabilidade das construções. Essas adições minerais, subprodutos agroindustriais, são, por vezes, descartadas em grandes quantidades em locais impróprios, gerando o risco de contaminação do solo e de fontes de água.

O efeito benéfico da sua utilização não se restringe apenas à redução na emissão de gases poluentes na atmosfera, contempla também a redução das matérias-primas utilizadas na fabricação do cimento, preservando os recursos naturais limitados e obtendo, mesmo assim, materiais com elevado nível de desempenho a um menor custo social, econômico e ambiental.

Entre as adições minerais utilizadas como substituições ao cimento recentemente, citam-se o uso de cinza de casca de arroz, escória de alto forno, já empregadas para este fim e a cinza de lodo de ETA, pois estudos tem sido desenvolvidos para avaliar a potencialidade desta como adição mineral.

A cinza de casca de arroz é oriunda da queima da casca. O Estado do Rio Grande do Sul destaca-se no cenário nacional pelo montante de arroz produzido anualmente. Segundo o Instituto Rio-Grandense do Arroz (Irga), a previsão para a safra de 2015 no estado será de 12.546 milhões de toneladas. Cada tonelada de arroz

em casca produz cerca de 200 kg de casca, o que, por combustão, produz 40 kg de cinza (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Quando essa queima é realizada com controle de temperatura resulta num material pozolânico de alta qualidade. Assim, quando utilizada no concreto em substituição parcial do cimento Portland, proporciona maior resistência aos ataques ácidos, maior resistência aos sulfatos, menor penetração de cloretos (ZAMBERLAN, 2013), inibição da reação álcali-agregado, maior resistividade elétrica do concreto (MOSTARDEIRO NETO, 2011) e maior resistência mecânica. Contudo, o aumento no teor de substituição aumenta a retração total (DA SILVA, 2012).

A escória de alto forno é um subproduto da fabricação do aço. Segundo Neville (1997), para cada tonelada de ferro gusa, são produzidas 300 kg de escória. De acordo com o Instituto Aço Brasil, nos últimos doze meses (jul/14 a ago/15), foram produzidos 28 milhões de toneladas de ferro gusa, resultando num total de 8,4 milhões de toneladas de escória. Da mesma forma que a cinza de casca de arroz, a substituição parcial do cimento Portland branco ou cinza pela escória de alto forno, impulsionada não só por questões ambientais, contribui para diversas características de durabilidade do concreto – embora, a depender do teor de substituição possa resultar em resistência mais baixa nas primeiras idades. Esse efeito negativo pode ser contornado pela utilização de ativadores químicos.

Outro material passível de ser utilizado como adição mineral é a cinza do lodo da estação de tratamento de água (CLETA). Quando calcinado a temperatura de 600°C por duas horas e depois moído, possibilita uma redução no consumo de cimento que pode variar de 37 a 200 kg/m³, conforme o nível de resistência pretendido (HENGGEN, 2015). No entanto, por ser um material novo, carece de informações quanto às suas características de durabilidade.

Tendo em vista o exposto, o estudo desenvolvido nesta dissertação teve como objetivo analisar, em concretos, os efeitos da substituição parcial do cimento Portland pela CLETA no tocante à retração total e à penetração de cloretos após a retração. Para essa finalidade, foram realizados ensaios de retração nas idades de 0, 7, 14, 21, 28, 35, 56, 91, 182 e 365 dias após a retirada da câmara úmida. Após 91 dias, foi realizado o ensaio de resistência à penetração de cloretos pelo método de imersão em solução salina, considerando dois prazos de cura, por esta influenciar sobremaneira as propriedades do concreto. Para efeito de comparação, foram analisadas misturas ternárias e quaternárias de cinza de lodo de ETA e escória de alto forno ou cinza de casca de arroz.

1.1 JUSTIFICATIVAS

- Buscar melhorias em propriedades importantes do concreto, como a durabilidade, no tocante a retração e penetração de íons cloreto fazendo o uso de adições minerais em substituição ao cimento;
- Contribuir para a diminuição de resíduos poluentes, dando um destino útil aos mesmos e diminuir a sua extração do meio ambiente;
- Gerar contribuições nos estudos referentes às características do concreto fazendo o uso de misturas ternárias e quaternárias.

1.2 DEFINIÇÃO TEMÁTICA

1.2.1 Apresentação do tema

Este trabalho dá sequência à segunda fase de 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). As pesquisas realizadas na primeira fase abrangeram a temperatura ótima de calcinação, o tempo de residência, a avaliação da reatividade pelo método Chapelle e NBR 5752 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010), e a resistência à compressão. Nessa segunda fase foi estudada, nesta pesquisa a retração total e penetração de cloretos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O presente trabalho é parte integrante de um projeto maior que estuda as diferentes propriedades do concreto com o uso de adições e tem por objetivo principal investigar o desempenho de concretos confeccionados com cimento Portland de alta resistência inicial e diferentes teores de cinza de lodo de ETA como uma adição mineral, em diferentes teores de substituição (5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%), frente à retração total e à penetração de íons cloreto.

1.3.2 Objetivos específicos

Com o propósito de alcançar o objetivo geral da pesquisa, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Investigar a influência da cinza do lodo de ETA com diferentes teores de substituição no desempenho de concretos com diferentes relações a/ag (0,35; 0,50 e 0,65) frente à retração total e à penetração de cloretos após a retração, em corpos de prova de diferentes idades.
- Observar e comparar a influência dos diferentes prazos de cura úmida (3 e 7 dias) e das diferentes relações a/ag frente à retração total e à penetração de cloretos após a retração em concretos com e sem cinza de lodo de ETA.
- Investigar a influência de misturas ternárias e quaternárias de cinza de lodo de ETA e escória de alto forno e/ou cinza de casca de arroz na retração total e na penetração de cloretos.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos onde no 1º capítulo apresenta-se a introdução e os objetivos que pautam esta pesquisa, demonstrando a relevância do uso destes materiais alternativos na substituição do cimento nas estruturas de concreto. No 2º capítulo mostram-se os tópicos pesquisados na revisão bibliográfica, fazendo uma abordagem dos aspectos relacionados à propriedade de retração do concreto e à corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado, com ênfase nos processos de penetração de cloretos em concretos já retraídos. Também é discutida a propriedade do concreto de resistência à compressão axial. Definições gerais 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. O 3º capítulo aborda o programa experimental, identificando quais são as variáveis desta pesquisa e caracterizando os materiais envolvidos, a dosagem dos concretos e os ensaios realizados, com a respectiva metodologia aplicada. No 4º capítulo abordam-se os resultados obtidos juntamente com a análise teórica e a comparação entre grandezas pertinentes e finalizando o 5º capítulo apresenta as conclusões e considerações finais, destacando os comentários sobre os resultados obtidos neste estudo e as sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE ADIÇÕES MINERAIS

2.1 ADIÇÕES MINERAIS

Neste capítulo, serão abordados os seguintes assuntos relacionados às adições minerais analisadas: classificação, propriedades, benefícios, origem, usos e aplicações, citando estudos e exemplos em relação a cinza de casca de arroz, escória de alto forno, cinza de lodo de ETA e argila calcinada.

As adições minerais, de acordo com sua ação físico-química, podem ser classificadas em três grandes grupos:

1. Material pozolânico: definido pela ASTM C 618 (2015) e pela NBR 12653 (ABNT, 2014) como um material silicoso ou sílico-aluminoso que, por si só, possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas, quando finamente dividido e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentantes. Exemplos: cinza volante com baixo teor de cálcio, pozolana natural, sílica ativa, cinza de casca de arroz e metacaulim (DAL MOLIN, 2011).
2. Material cimentante: não necessita do hidróxido de cálcio presente no cimento Portland para formar produtos cimentantes como o C-S-H. No entanto, sua auto-hidratação é normalmente lenta e a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente para aplicação do material para fins estruturais. Exemplo: escória granulada de alto forno (DAL MOLIN, 2011).
3. Filler: é uma adição mineral finamente dividida e sem atividade química, ou seja, sua ação se resume a um efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento. Exemplos: calcário, pó de quartzo, pó de pedra (DAL MOLIN, 2011).

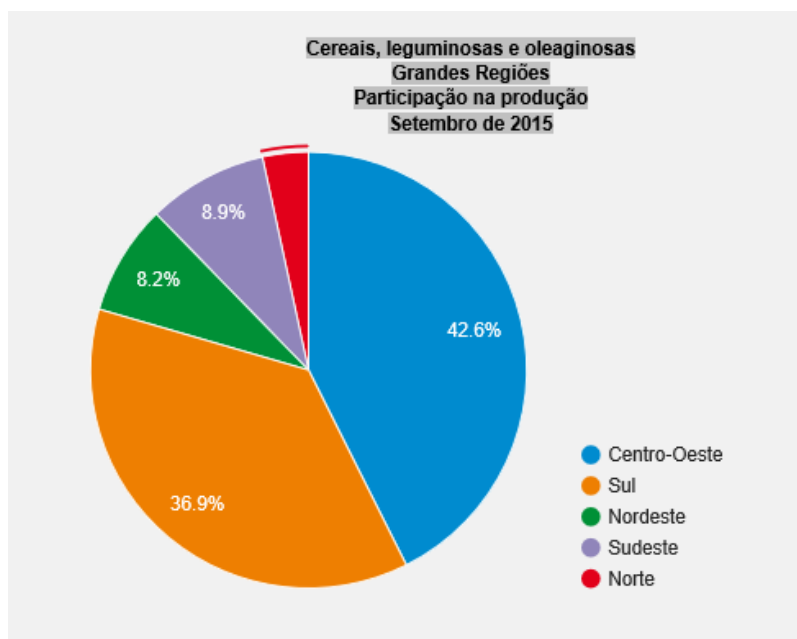
2.2 CASCA DE ARROZ

O arroz (*Oryza sativa*) é um dos cereais mais produzidos e consumidos no mundo, caracterizando-se como o principal alimento para mais da metade da população mundial.

É capaz de suprir 20% da energia e 15% da proteína da necessidade diária de um adulto, além de conter vitaminas, sais minerais, fósforo, cálcio e ferro, segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO). No Brasil, o consumo anual é de, aproximadamente, 25 quilos por habitante, impondo o plantio deste cereal como uma das principais culturas agrícolas.

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a nona estimativa de 2015 para a safra nacional de cereais, leguminosas e oleaginosas totalizou 210,4 milhões de toneladas, 8,8% superior à obtida em 2014 (193,3 milhões de toneladas) e 396.248 toneladas (0,2%) maior que a avaliação de agosto. A estimativa da área a ser colhida é de 57,7 milhões de hectares, apresentando acréscimo de 2,0% frente à área colhida em 2014 (56,5 milhões de hectares) e aumento de 71.956 hectares em relação ao mês anterior (0,1%). O arroz, o milho e a soja são os três principais produtos desse grupo, que somados representaram 92,5% da estimativa da produção e responderam a 86,4% da área a ser colhida. Em relação ao ano anterior, houve acréscimos de 6,0% na área da soja, de 0,9% na área do milho e redução de 5,5% na área de arroz. No que se refere à produção, houve acréscimos de 3,4% para o arroz, 12,2% para a soja e de 7,3% para o milho. O gráfico da figura 1 ilustra a participação das regiões do Brasil na produção de setembro de 2015.

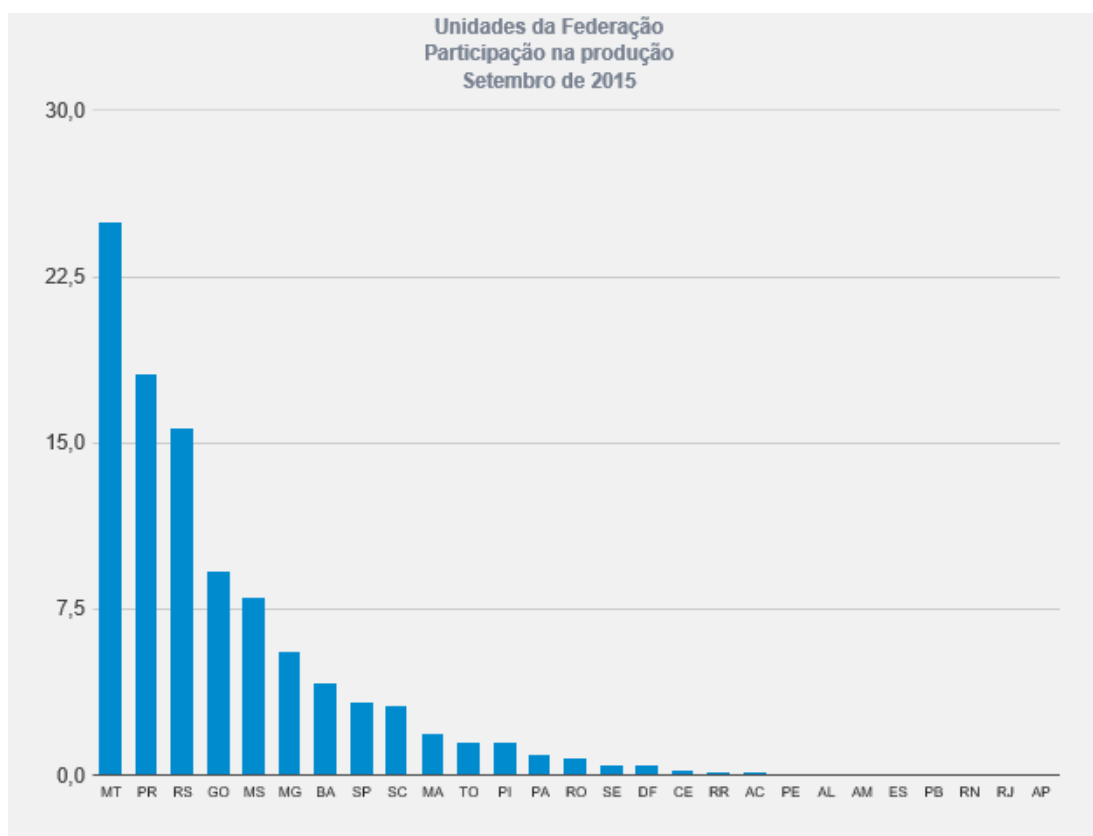
Figura1 – Participação das regiões do Brasil na produção de setembro de 2015.



Fonte: (IBGE, 2014)

A Região Sul do Brasil destaca-se como a segunda maior produtora de grãos do país, representando 37,3% da participação na produção em setembro de 2015, o que corresponde a um volume de grãos 77,6 milhões de toneladas. Dessa forma, a produção da região Sul fica apenas atrás da Região Centro-Oeste, como mostra o gráfico do IBGE, com dados da safra de setembro de 2015 (Figura 2). O Estado do Rio Grande do Sul aparece como o terceiro principal produtor, representando 15,7 % do total nacional previsto.

Figura 2 – Participação dos estados na safra de 2015.



Fonte: (IBGE, 2014)

Essa elevada produção anual estabelece ao País e ao Estado do Rio Grande do Sul destaque mundial na produção de grãos, tornando-os uns dos principais produtores do grão. A produção, em toneladas, de arroz (em casca) obtida na safra de 2014 foi de 12.159,973 e a esperada para safra de 2015 é de 12.569,880, possuindo uma variação de 3,4%. Em setembro, o IBGE previu safra de cereais, leguminosas e oleaginosas de 8,8% maior do que a de 2014, conforme quadro 1.

Quadro 1 – Previsão do IBGE para a safra de cereais, leguminosas e oleaginosas.

Estimativa de SETEMBRO para 2015	210,4 milhões de toneladas
Variação setembro 2015 / agosto 2015	0,2% (+396,2 mil toneladas)
Variação safra 2015 / safra 2014	8,8% (+17,1 milhões de toneladas)

Fonte: (IBGE, 2014)

O grão do arroz divide-se em diferentes partes. É comum dividi-lo em casca, farelo e grão. A casca de arroz é uma capa lenhosa do grão, dura e com alto teor de sílica, entre 74 a 97%, composta de, aproximadamente, 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica de base anidra. É uma cobertura protetora, formada durante o crescimento do grão, constituída por camadas fibrosas, esponjosas ou celulares, que são altamente silicosas (HOUSTON, 1972).

No processamento industrial do arroz, as cascas correspondem a aproximadamente 20% do peso dos resíduos. No Estado do Rio Grande do Sul, são geradas 1,216 milhões de toneladas desse resíduo. As cascas de arroz têm baixa densidade, além de lenta biodegradação, permanecendo em sua forma original por um longo período. Apresentam um alto poder energético, já que contêm quase 80% de seu peso em carbono. Suas cinzas são compostas basicamente de sílica e, portanto, bastante alcalinas. Tanto nas cascas de arroz como em suas cinzas não existem compostos tóxicos. Entretanto, durante o processo de combustão e gaseificação, formam-se partículas de cinzas que contêm carbono: a fuligem (SOUZA, 2005).

As cascas de arroz podem ser carbonizadas e usadas como substrato, em canteiros ou recipientes, na germinação de sementes e na formação de mudas de vegetais superiores, permitindo a penetração e a troca de ar na base das raízes e sendo suficientemente firme e densa para fixar a semente ou estaca. A casca tem coloração escura, sendo opaca à luz na base da estaca e é leve e porosa, permitindo boa aeração e drenagem. Além disso, tem volume constante, seja seca ou úmida e é livre de plantas daninhas, nematoides e patógenos. Não necessita de tratamento químico para esterilização, em razão de ter sido esterilizada com a carbonização (ANDRIOLO, 1997). O poder calorífico da casca de arroz é de aproximadamente

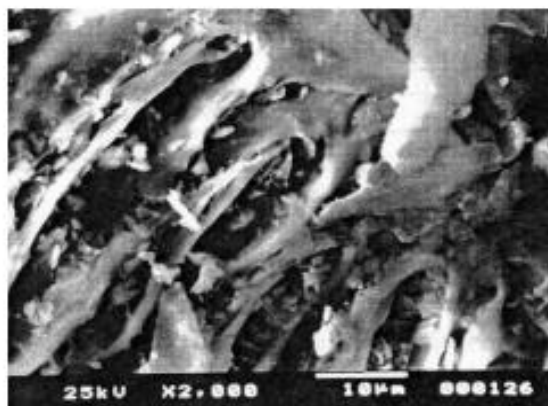
16.720 kJ/kg. O substrato de casca de arroz carbonizada apresenta as seguintes características físicas e químicas: densidade seca de 150g/L, capacidade de retenção de água de 53,9%, capacidade de troca de cátions de 5,5 meq/dL, pH em água de 7,4, teor de sais solúveis de 0,7 g/L, 0,7% de nitrogênio, 0,2% de fósforo e 0,32% de potássio (SOUZA, 1992).

2.3 CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA)

A cinza de casca de arroz é produzida durante a operação de beneficiamento do arroz colhido (palha de arroz mais arroz em casca). Cada tonelada de arroz em casca produz cerca de 200 kg de casca, o que, por combustão, produz 40 kg de cinza. A cinza formada durante a queima a céu aberto ou pela combustão não controlada em fornos industriais geralmente contém uma grande proporção de minerais de sílica não reativos, tais como a cristobalita e a tridimita, e deve ser moída a tamanhos de partículas muito finas, de modo a desenvolver maior atividade pozolânica (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Análises químicas de cinzas produzidas por incineração da casca de arroz mostram, além do elevado teor de sílica, teor de álcalis (K_2O e Na_2O), de 1% a 2%, e teor de carbono de 3% a 18% (MALHOTRA, 1993). Com a queima, a lignina e a celulose são removidas, resultando em uma estrutura celular e porosa (MEHTA, 1992).

A figura 3 mostra a micrografia da casca de arroz queimada a 506°C.

Figura 3 – Micrografia eletrônica de varredura da cinza de casca de arroz queimada a 560 °C



Fonte: (SILVEIRA e RUARO, 1995)

De acordo com Della (2005), quando a temperatura ou o tempo de queima da CCA é baixa, a sílica contida na cinza é predominantemente amorfa, ou seja, ocorre menos cristalização.

No mesmo sentido, Mehta (1992) também afirmam que a eficiência da cinza de casca de arroz como material pozolânico está relacionada ao seu processo de obtenção. Cinzas provenientes de combustão não controlada geralmente contêm uma grande proporção de minerais de sílica não reativos (cristalinos) e de baixo valor pozolânico, devendo ser micronizadas para desenvolver a atividade pozolânica.

Diversos autores estudam as melhorias nas propriedades do concreto com a substituição da cinza de casca de arroz (CCA) na mistura. Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2008), ao confeccionarem concretos com CCA em teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% e 35%, com relação água/aglomerante (a/ag) de 0,53, verificaram uma melhoria substancial nas propriedades de permeabilidade do concreto quando utilizado o teor de 30% de substituição, em comparação à mistura de referência (REF), sem adição. Ao substituir o cimento por 30% de CCA, obtiveram uma redução de 35% na permeabilidade à água no concreto, em relação à mistura tida como referência.

Gastaldini (1996) investigou a influência de adições minerais na porosidade de pastas de cimento por meio da porosimetria por intrusão de mercúrio, incluindo a cinza de casca de arroz. Com base nos resultados, o autor afirma que, da mesma forma que a sílica ativa, a cinza proporciona um refinamento dos poros diminuindo a porosidade e a permeabilidade do concreto.

Entre as propriedades do concreto que possuem melhorias com o uso dessa adição, Rêgo (2004) fez um amplo estudo da utilização das CCAs amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento. O Programa Experimental foi elaborado com o objetivo de verificar a influência da substituição das CCAs amorfa e cristalina ao cimento Portland, contribuindo tecnicamente para a consolidação do uso desse material como alternativa de produção de cimentos com características específicas e adequadas para a produção de concretos e argamassas de qualidade ou à produção de concretos e argamassas com esse tipo de adição. Segundo os resultados apresentados por Rêgo (2004), fica evidenciada a grande viabilidade técnica da utilização da CCA residual, produzida por indústrias beneficiadoras de arroz ou usinas termoelétricas, tanto amorfa quanto cristalina, finamente dividida como adição mineral ao cimento.

Pouey (2006) verificou a viabilidade técnica do emprego das cinzas de casca de arroz residuais na confecção de cimento Portland composto e/ou pozolânico, a partir da associação de tratamentos físicos, químicos e térmicos das mesmas. A autora concluiu que, em relação aos tratamentos térmicos, temperaturas inferiores a 600°C mostraram-se indicadas para clarear a CCA, sem cristalinizar as partículas amorfas, não produzindo cimentos escuros. Já com relação aos tratamentos químicos, os banhos com HCl resultaram em cinzas mais claras. Os tratamentos físicos (redução da granulometria) foram os que produziram maiores benefícios em termos de resistência à compressão, ficando clara a influência da granulometria da CCA no seu desempenho: até o limite de 4,55 µm testado, quanto menor a granulometria, maior a pozolanidade da CCA, e por consequência, a resistência à compressão dos cimentos. Os tratamentos térmicos e químicos também foram responsáveis por CCA mais puras, ou seja, com maior porcentual de SiO₂ e menos impurezas. A autora verificou, por fim que, as CCA residuais têm potencial para serem empregadas na produção de cimentos, tanto aquelas menos cristalinas, quanto as mais cristalinas. Para tanto, devem ser beneficiadas, sendo pelo menos submetidas a tratamento físico para redução de sua granulometria.

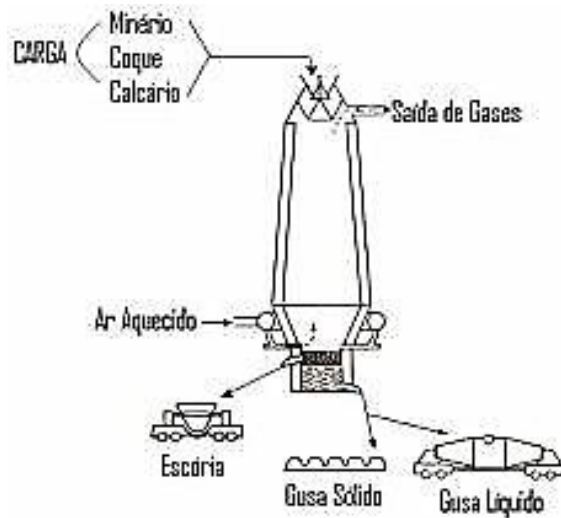
Rêgo (2004) afirma que, para diversos autores, a atividade pozolânica da cinza de casca de arroz é fortemente influenciada tanto pelas condições de queima, quanto pela heterogeneidade das composições físicas (finura) e químicas (teor de SiO₂) da cinza. Os autores pesquisados por ele são unânimes com relação ao aparecimento de fases cristalinas na sílica contidas na cinza da casca de arroz queimada a elevadas temperaturas, especialmente, acima de 700°C.

2.4 ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO FORNO (EAF)

Denomina-se escória de alto forno o resíduo não metálico proveniente da produção do ferro-gusa (DAL MOLIN, 2011).

Dentro de um alto forno, os processos se dão, até a obtenção da escória, na sequência apresentada na figura 4. O subproduto resultante do processo tem um importante papel na indústria cimenteira, pois é utilizado como matéria-prima na produção de cimento.

Figura 4 – Processo da produção da escória de alto forno



Fonte: SENAI (2012)

Em 2015, a produção brasileira de ferro-gusa foi cerca de 38.000.000 toneladas, segundo o Instituto Aço Brasil (2015).

De acordo com o órgão, a produção nos últimos 12 meses de ferro-gusa (julho 2014/agosto 2015) foi de $28195,6 \times 10^3$ t. Considerando que, para cada tonelada de ferro-gusa produzida, aproximadamente de 300 a 350 quilos de escória de alto forno são gerados (CRUZ et al., 1999). Estima-se uma produção média, em 2015, em torno de 10.000.000 toneladas de escória de alto forno no Brasil.

Para otimizar as propriedades cimentícias, a escória fundida deve ser rapidamente esfriada tão logo que saia do alto forno. Segundo o ACI Committee 233 (1995), o rápido resfriamento minimiza a cristalização e transforma a escória fundida em partículas vítreas, geralmente menores que 4,75 mm. A atividade hidráulica da escória depende muito do seu conteúdo vítreo.

Os efeitos benéficos oriundos do seu emprego no concreto são: liberação de calor mais lenta na hidratação, reduzindo o pico de temperatura (SIVASUNDARAM e MALHOTRA, 1992); melhora de consistência do concreto fresco; estrutura mais compacta da pasta de cimento hidratada (TAZAWA, YONEKURA e TANAKA, 1989), resultando em maior durabilidade e aumento da resistência em idades mais avançadas.

O processo de resfriamento mais comum para granular a escória e torná-la cimentícia é aquele no qual se faz uso de água. Há alguns anos, geralmente a escória fundida era simplesmente colocada imersa em água (ACI Committee 233, 2003). De acordo com o Comitê, um sistema de granulação moderno e mais eficiente usa jatos de água a alta pressão sobre a escória fundida, numa relação água/escória, em massa, de aproximadamente 10/1. Dessa maneira, a escória é resfriada quase instantaneamente a uma temperatura abaixo do ponto de ebulição da água, formando, conseqüentemente, partículas compostas de material altamente vítreo (ACI Committee 233, 2003).

Na produção de ferro fundido, também chamado ferro-gusa, se a escória é resfriada lentamente ao ar, os seus constituintes químicos estarão comumente presentes na forma de mililita cristalina, a qual não reage com água à temperatura ambiente. Se moído até partículas muito finas, o material será fracamente cimentante e pozolânico. Sabe-se que as partículas de escória menores do que 10 µm contribuem para as resistências iniciais do concreto até 28 dias; partículas de 10 µm a 45 µm contribuem para as resistências a longa idade, mas partículas maiores do que 45 µm são difíceis de hidratar (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Geralmente a escória é usada no concreto como um substituto parcial do cimento Portland. Ela é um material aglomerante cuja reação de hidratação é lenta, conferindo ao concreto baixa resistência inicial, de modo que pode ser ativada quimicamente para que reaja mais prontamente e atinja a resistência desejada no prazo requerido. O concreto de escória ativado alcalinamente é feito com 100% de escória ativada por álcalis, em vez de cimento Portland como aglomerante. Collins e Sanjayan (2001) comentam que os concretos de escória álcali ativados apresentam, assim como os concretos com escória em substituição ao cimento Portland, sensibilidade à falta de cura.

As vantagens do uso de altos teores de adições minerais no concreto foram investigadas por Isaia e Gastaldini (2004) em um estudo de caso com misturas de 50 e 90% de cinza volante e escória de alto forno, em misturas binárias e ternárias. Foram calculados os custos dos materiais, a emissão de CO₂, o consumo de energia e os parâmetros de durabilidade do concreto que influem na corrosão da armadura. De acordo com os resultados encontrados, com a redução do teor de cimento na mistura, decresceram o custo, a emissão de CO₂ e a energia consumida, e aumentou-se a durabilidade do concreto, mostrando a viabilidade e as vantagens em todos os

aspectos analisados da substituição de cimento por altos teores de adições minerais. Nesse estudo de caso, foi mostrado que os ganhos ambientais, técnicos e econômicos são proporcionais ao teor de cimento substituído pela adição mineral. O traço com 70% de escória e 20% de cinza volante, mistura de melhor desempenho, apresentou reduções de 5% no custo, 58% no consumo de energia, 81% na emissão de CO₂ e aumento de 34% no índice de durabilidade, em relação ao concreto de cimento Portland, com relações entre custo e benefício ambiental e de durabilidade, respectivamente, 3,4 e 1,6 vezes menores.

Xinghua Fu et al. (2000) estudaram a influência do uso de uma elevada quantidade de escória no cimento Portland e relatam que a atividade pozolânica da escória granulada de alto forno é determinada pelas quantidades de material amorfo. Estudos têm provado que quanto maior a proporção vítrea, maior é a atividade da escória com mesma composição química. Por esses benefícios que agrega à mistura, a escória vem sendo amplamente utilizada como uma adição mineral na China, onde 60% de cimento Portland é misturado com $25 \pm 30\%$ de escória de alto forno.

No estudo mencionado, foram utilizados ativadores como a alumina, o gesso e o sulfato de sódio. Como resultados obteve-se que, em relação à resistência à compressão aos 28 dias, o concreto atingiu 49,1 Mpa, quando se eleva a quantidade de escória em 50% e se acresce a esta 2% de alumina. Já com a adição de 2% de sulfato de sódio, ocorre também um aumento na resistência inicial, 98 Mpa, mas, aos 28 dias, é de apenas 43,3 MPa. A resistência aos 7 e aos 28 dias é mais elevada quando se adiciona ao concreto 4% de gesso.

Por fim, tem-se que a maior resistência inicial foi obtida quando o concreto foi misturado com sulfato de sódio, enquanto que a maior resistência em idades mais avançadas foram conseguidas quando a alumina foi misturada com gesso.

A equação com os melhores resultados para as misturas com uma quantidade elevada de escória são expressas da seguinte forma: Quantidade de clínquer: de $30 \pm 50\%$ do cimento, de escória de $45 \pm 65\%$ do cimento, ativador de $6 \pm 8\%$, com uma finura de $340 \pm 360 \text{ m}^2/\text{kg}^3$.

Estes tipos de ativadores utilizados no estudo, não só melhoram as propriedades iniciais, mas também agregaram melhorias às propriedades em fases avançadas, exercendo, portanto, separadamente, diferentes influências sobre o cimento.

Conclui-se, então, que o uso de ativadores otimiza as propriedades do cimento que contém uma grande quantidade de escória e que, com o uso de um ativador duplo, verificam-se melhores resultados do que fazendo o uso somente de um, uma vez que um complementa o outro.

Pal et al. (2003) estudaram a atividade hidráulica da escória granulada de alto forno no concreto e concluíram que a reatividade do material depende das suas propriedades, sendo elas, a fonte de onde se origina, o tipo de matéria-prima utilizada, o método de obtenção e a taxa de arrefecimento.

A pesquisa buscou trazer uma nova relação entre o Índice Hidráulico (HI) da escória em 7 e 28 dias (HI7 e HI28) e os fatores que influenciava as suas propriedades: com o conteúdo vítreo, a finura e a composição química da mesma. No estudo, os autores realizaram a análise de regressão múltipla em 37 amostras de escória de várias fontes, concluindo que os índices hidráulicos estão fortemente correlacionados com as propriedades físicas e químicas da escória, ou seja, com os elementos SiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 , com o conteúdo vítreo e a finura de Blaine tanto em 7 quanto em 28 dias.

Ping-Kun Chang et al. (2003) realizaram um estudo sobre as propriedades de hidratação de concretos de alto desempenho com a escória, fazendo uso de SRA (aditivo acelerador de retração). Os resultados mostravam que, aumentando a relação a/ag , aumentou-se a velocidade de hidratação da Alita e de C_3A , assim como as taxas de formação de CH e Etringita (AFT). Além disso, reduzindo a reação pozolânica da escória, a taxa de formação de CH diminuiu, especialmente em idades mais avançadas. A Alita diminuiu com o aumento da relação água/cimento e a taxa de hidratação do C_3A tornou-se extremamente elevada. A Etringita forma-se mais pela hidratação antes da idade de 7º dia, e não há um grande aumento de resistência do 7º ao 60º dia. Com a diminuição da relação água/cimento, a AFm diminuiu o valor da resistência, o que provavelmente ocorre pelo seguinte motivo: no segundo momento da reação, ela deve competir contra outras reações pela água livre; assim, se a quantidade de água livre é baixa, a formação da AFm necessariamente é afetada.

Assim como as pozolanas, a escória é tradicionalmente adicionada na fabricação de cimentos. A NBR 5735 (ABNT, 1991) define um tipo de cimento que permite a substituição de clínquer, em massa, por escória granulada de alto forno: o CPIII, com teores de escória variando de 35% a 70% da massa total do material aglomerante. A NBR 11578 (ABNT, 1991) define o CPIIE contendo 6% a 34% de

escória. A ASTM C595 (1994) define apenas um tipo de cimento no qual a escória pode ser adicionada, especificando teores variando de 25% a 70% de escória (DAL MOLIN, 2011).

Em conformidade às particularidades da escória, pode-se concluir os seus efeitos benéficos, pois o uso dessa adição, a qual é ativada com sulfato de sódio, reduz a retração no concreto (DELLINGHAUSEN, 2009) em função do refinamento da estrutura da pasta e da redução da conectividade dos poros, o que é comprovado também pelos estudos de Lubeck (2008), o qual constatou que, em misturas com 50% de substituição de escória no concreto nas idades de 3 e 7 dias, a resistividade elétrica aparente aumentou expressivamente a partir do uso deste mesmo ativador. Essa justificativa foi considerada porque, de acordo com Andrade (2006), a resistividade elétrica de concreto saturado é uma medida indireta da conectividade dos poros.

Outra vantagem da adição da escória é que a incorporação de escórias e de pozolanas reduz substancialmente a produção de CO₂ no processo de produção do cimento, já que, para cada tonelada de clínquer produzido, é lançada no ambiente cerca de uma tonelada de gás carbônico.

2.5 LODO DE ETA

A água destinada ao consumo humano deve preencher condições mínimas para que possa ser utilizada. O Ministério da Saúde publicou, em 2004, a Portaria nº 518, que estabelece os novos procedimentos e as responsabilidades relativas ao controle e à vigilância da qualidade da água para consumo humano. Segundo a portaria, para se tornar própria para o consumo, a água necessita de um tratamento e de uma transformação realizada nas estações de tratamento. O subproduto resultante é o lodo de ETA.

Esse tratamento é um conjunto de procedimentos físicos e químicos que são aplicados na água para que esta fique em condições adequadas para o consumo, ou seja, para que se torne potável. O processo de tratamento de água a livra de qualquer tipo de contaminação, evitando a transmissão de doenças.

Em estudos realizados com lodo de ETAs que utilizam coagulante de ferro e alumínio no processo comparado com lodo de esgoto, foi observado que a concentração de coliformes presentes no lodo de ETA é baixa e, em alguns casos, ausente. Verificou-se ainda que, ao contrário do lodo de esgoto, o lodo de ETA possui

em torno de 6% de matéria orgânica baseada no peso seco, sendo o restante, material inorgânico (AWWA, 2001).

Em uma ETA, o processo ocorre em etapas. São elas:

- Coagulação: quando a água na sua forma natural (bruta) entra na ETA, ela recebe, nos tanques, determinada quantidade de sulfato de alumínio. Essa substância serve para aglomerar as partículas sólidas que se encontram na água como, por exemplo, a argila.
- Floculação: em tanques de concreto com a água em movimento, as partículas sólidas se aglutinam em flocos maiores.
- Decantação: em outros tanques, por ação da gravidade, os flocos com as impurezas e partículas ficam depositados no fundo dos tanques, separando-se da água.
- Filtração: a água passa por filtros formados por carvão, areia e pedras de diversos tamanhos. Nessa etapa, as impurezas de tamanho pequeno ficam retidas no filtro.
- Desinfecção: é aplicado na água cloro ou ozônio para eliminar micro-organismos causadores de doenças.
- Fluoretação: é aplicado flúor na água para prevenir a formação de cárie dentária em crianças.
- Correção de pH: é aplicada na água certa quantidade de cal hidratada ou carbonato de sódio. Esse procedimento serve para corrigir o pH da água e preservar a rede de encanamentos de distribuição.

Esses processos formam resíduos denominados lodo de ETA, que serão removidos, principalmente nos decantadores (TSUTIYA e HIRATA, 2001).

O destino desses resíduos, por muitas estações de tratamento, ainda é o lançamento em cursos d'água próximo às estações, o que ocasiona assoreamentos indesejáveis e malefícios à natureza (DI BERNARDO et al.). Barbosa et al. (2000) acreditam que o lançamento do lodo de ETA em rios pode alterar significativamente a biota aquática, bem como causar degradação da qualidade das águas.

A busca por soluções técnica e ambientalmente vantajosas continuam sendo o objeto de muitas pesquisas envolvendo esse material. Cordeiro (2000) afirma que a utilização de lodo de ETA como matéria-prima pode reduzir a quantidade de recursos naturais utilizados, além de deixar de ocupar espaços em aterro sanitário.

Uma maneira de se realizar o aproveitamento desse produto é a sua utilização como substituição parcial do material silicoso para a produção do cimento (CHEN et al., 2010) ou em substituição parcial do clínquer, a fim de dar um destino a esse material e diminuir a emissão de CO₂ na atmosfera, substituindo parte do cimento pela cinza de lodo de ETA.

Em estudos com lodo seco de ETA na fabricação do concreto, Sales e Cordeiro (2001) observaram, a partir dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e absorção, que o concreto com lodo de ETA pode ser utilizado em aplicações não estruturais.

2.6 CINZA DE LODO DE ETA (CLETA)

Assim como os diversos subprodutos, tais como, a escória de alto forno, a cinza de casca de arroz, os resíduos de obra, que necessitam de um melhor aproveitamento, uma possibilidade promissora do uso desses materiais seria na construção civil, visto que é uma área que necessita de bastante demanda de produtos que sejam menos agressivos ao meio ambiente, como uma maneira de diminuir o consumo de recursos naturais e dar um melhor aproveitamento para o destino final de diversos materiais que poderiam ser prejudiciais à natureza.

Com o objetivo de reutilização do resíduo gerado pelas ETAs, Batalha e Rocha (2013), por meio de difração de raios X, encontraram no lodo um mineral argiloso, metacaulinita e quartzo. Pela análise de termogravimetria (TG), ocorreu perda de massa de 9,3% e, pela análise termogravimétrica diferencial (DTG) com temperatura de 800,82°C, ocorreu a quebra da metacaulinita pela formação da mulita primária. Logo, os autores concluíram que os componentes do lodo calcinado a 650°C fazem parte da composição do cimento Portland.

Ainda assim, Batalha e Rocha (2013) classificaram a cinza de lodo de ETA (CLETA) como material de enchimento (filler), segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014). Realizando estudos feitos em argamassa, esses autores comprovaram que o uso da CLETA é viável tecnicamente, visto que, as resistências à compressão das argamassas com teor de substituição de 5% e 15% de cinza, substituindo o cimento, apresentaram, aos 28 dias, resultados estatisticamente iguais em comparação à argamassa de referência, sem adição de CLETA. O ensaio de porosimetria mostrou que a cinza, além de proporcionar redução no consumo de cimento na mistura, atuou no refinamento da estrutura de poros da argamassa, reduzindo em 15,64% os

macroporos e aumentando em 4% os mesoporos em relação à argamassa de referência, quando empregado 5% de CLETA. No ensaio de absorção por capilaridade, as argamassas apresentaram taxas menores em relação à argamassa de referência, comprovando o efeito filler da CLETA na matriz.

Hengen (2014), a partir do método Chapelle modificado e do índice de desempenho com cimento Portland, constatou que a melhor temperatura de queima do lodo de ETA é de 600°C por uma hora, seguido de duas horas de moagem em moinho de bolas de aço. Nos valores de resistência à compressão axial, quando comparado ao concreto de referência, sem adição de CLETA, aos 7 e 28 dias de idade, obteve-se acréscimos de resistência que variaram de 3 a 30%, conforme a relação a/ag e o teor de substituição. Com isso, a autora verificou que o uso de CLETA proporciona vantagem econômica quanto substituída em parte pelo cimento Portland.

2.7 ARGILA CALCINADA

A utilização de argila calcinada, embora remonte a séculos de utilização, vem despertando interesse pela possibilidade de substituição do clínquer Portland e, dessa forma, vem contribuindo para o desenvolvimento sustentável. Isso fica evidente pelo grande número de trabalhos publicados nos últimos anos (TIRONI et al., 2012, 2013).

As argilas calcinadas, como o metacaulim, têm recebido atenção especial nos últimos anos. Sabe-se que essas adições, quando adicionadas à argamassa e ao concreto, melhoram a sua resistência mecânica e a sua durabilidade (HERNÁNDEZ et al., 2010).

Devido à grande disponibilidade no Brasil, a argila calcinada é uma alternativa de material pozolânico suplementar. A utilização de argilas ativadas termicamente em argamassas e concretos tem recebido considerável atenção nos últimos anos devido aos benefícios técnicos, econômicos e ambientais que esses materiais podem promover (TOLEDO FILHO et al., 2002). As argilas mais utilizadas para produção de pozolanas são as caulinitas, as montmorilonitas e as ilitas (SOUZA SANTOS, 1992). Estudos desenvolvidos por diversos pesquisadores, como HE et al. (1995), mostram que as argilas do grupo das caulinitas apresentam maior atividade pozolânica quando comparadas às argilas do grupo das montmorilonitas e ilitas. Por isso, as argilas caulínicas calcinadas (metacaolinita) possuem atualmente maior potencial de emprego e, por conseguinte, têm sido mais estudadas.

A NBR 12653 (ABNT, 2014) define que o percentual máximo retido na peneira 45 µm deve ser de 34% para que uma argila calcinada possa ser utilizada como pozolana. Como a metacaolinita moída obtida possui 100% dos seus grãos mais finos que 45 µm, conclui-se que possui finura adequada para ser usada como adição mineral no concreto.

A alta atividade pozolânica da argila calcinada é atribuída aos compostos finamente moídos amorfos e de elevado grau de desordem, produzidos pela desidroxilação dos argilominerais. Logo, a temperatura de queima tem enorme influência sobre a reatividade da pozolana. Para argilas cauliníticas, a atividade pozolânica ocorre, em geral, entre temperaturas de 500 e 900°C (SOUZA SANTOS, 1992). Nesse sentido, a argila calcinada torna-se uma opção de uso como uma substituição parcial no cimento.

Hernandez et al. (2010) avaliou o comportamento, as propriedades físico-mecânicas e a durabilidade de concretos usando argilas calcinadas e moídas como material substituinte de 30% do teor de cimento portland. Para isso, utilizou uma terra argilosa, composta principalmente pelo mineral caolin de baixo grau de pureza, para obtenção de argila calcinada como material cimentício suplementar. Os melhores resultados de resistência à compressão aos 28 dias foram obtidos para a argila sedimentada e calcinada, a que possui maior conteúdo de mineral caolin devido ao processo de purificação por sedimentação da matéria-prima, realizado exclusivamente para essa adição. Entretanto, os ensaios de absorção de água por capilaridade obtiveram os melhores resultados para os solos argilosos calcinados, que possuem uma elevada finura em comparação ao restante dos materiais estudados. Os menores valores mostrados para essa adição, tanto de porosidade capilar como de absorção, indicam que existe um predomínio do fenômeno da compactidade e impermeabilidade. Estudos na microestrutura do gel de C-S-H, usando o difratograma de raio X, demonstraram como o emprego de argilas calcinadas em substituição ao cimento Portland favorece a formação de produtos de hidratação mais estáveis, principalmente monossulfatos, os quais são convenientes para o concreto antes da possível ação de diferentes mecanismos de degradação.

Outros autores, como Steenberg et al. (2011), também estudaram as propriedades e os benefícios do uso da argila calcinada, estudando cimentos portland CEM I com 30% de substituição de argila calcinada e calcário.

A substituição do cimento Portland com de 30% de calcário resultou em uma resistência à compressão aos 28 dias de 78%, em relação ao cimento de referência. A substituição de 30% de argila calcinada resultou na resistência à compressão aos 28 dias entre 60 e 84%, comparados à referência, dependendo da reatividade da argila calcinada. Misturas com a mesma porcentagem de argila e de calcário resultaram em dosagens mais elevadas do que seria de se prever pelos resultados dos sistemas binários com resistência aos 28 dias, tão elevados como 109% CEM I, embora um efeito linear tenha sido observado quando o calcário foi misturado com filler em vez de com argilas calcinadas (aluminossilicato).

As análises realizadas (RMN e DRX) mostram uma forte correlação entre a quantidade de hidrato monocarboaluminato formado e as resistências elevadas recém-descritas. Com sua pesquisa, Steenberg et al. (2011) concluíram que um efeito sinérgico claro foi observado com as misturas de calcário e argilas calcinadas em cimentos Portland com o mesmo conteúdo de clínquer. Propriedades importantes são significativamente mais elevadas do que seria previsto com base nos resultados obtidos a partir de calcário puro + clínquer e argila calcinada pura + clínquer em misturas. O efeito é maior para o valor mais alto de alumina, que depende da reatividade da argila calcinada e do teor de alumina. O melhor desempenho pode, portanto, ser esperado a partir de 1:1 de argila, em vez de argila caulinita esmectítica. O mecanismo subjacente para esse efeito é a formação de hidratos carboaluminato, conforme mostrado por análise de RMN e por XRD.

2.8 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO COM ADIÇÕES

Em geral, o uso de adições minerais resulta na produção de materiais cimentícios com melhores características técnicas, já que estas modificam a estrutura interna da pasta de cimento hidratada e da zona de transição agregado/matriz, promovendo uma redução na porosidade capilar, responsável pelas trocas de umidade, íons e gases com o meio, além de diminuir o calor de hidratação e, conseqüentemente, as fissuras de origem térmica. No entanto, as vantagens proporcionadas pelas adições minerais no concreto são dependentes, entre outros parâmetros, do tipo de adição, da finura e da forma das partículas, da área superficial

específica e da composição química e mineralógica destas, as quais influenciam diretamente as ações físicas e químicas (DAL MOLIN, 2011).

Concretos com adições minerais tendem a ser mais coesos, com redução considerável da tendência à segregação e à exsudação, quando comparados a um concreto sem adição. Além disso, caracterizam-se por serem mais resistentes a agentes agressivos como cloretos e sulfatos, devido à diminuição da difusão, já que esses concretos são menos porosos ou têm maior refinamento dos poros, resultando em misturas mais compactas (DAL MOLIN, 1995).

Dal Molin (1995) afirma que, normalmente, o calor de hidratação gerado, por unidade de tempo, é reduzido com a substituição do cimento pelas adições minerais, já que a quantidade de clínquer diminui, resultando em menor liberação de calor durante as reações químicas de hidratação. A autora também defende que a melhoria da estrutura interna do concreto proporciona uma estimativa do seu desempenho tanto em termos mecânicos, como, indiretamente, em termo de durabilidade.

Além de responsáveis pela resistência à segregação da mistura, as adições minerais podem desempenhar um papel importante para a resistência e durabilidade do concreto, tanto física quanto quimicamente, podendo ser classificadas em dois grandes grupos: adições minerais quimicamente ativas e sem atividade química (DAL MOLIN, 2011).

O efeito químico das adições minerais ocorre a partir da capacidade de reação com o hidróxido de cálcio – Ca(OH)_2 –, composto frágil e solúvel que se forma durante a hidratação do cimento Portland. Dele deriva um composto resistente, o silicato hidratado de cálcio (C-S-H), que ocupa os vazios de maiores dimensões existentes na pasta de cimento ou na zona de transição, aumentando o desempenho mecânico e a durabilidade do concreto. Dependendo da superfície específica das partículas e da sua composição química, essas reações pozolânicas podem ser lentas ou rápidas.

Já o efeito físico pode ser desdobrado em três ações principais: o efeito filler, que é o aumento da densidade da mistura resultante do preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas das adições; o refinamento dos poros e dos produtos de hidratação; e a alteração da microestrutura da zona de transição, que reduz ou elimina o acúmulo de água livre que, normalmente, fica retido sob os agregados (DAL MOLIN, 2011).

Basicamente, as vantagens obtidas pelo uso de adições minerais em substituição ao cimento em argamassas e concretos são:

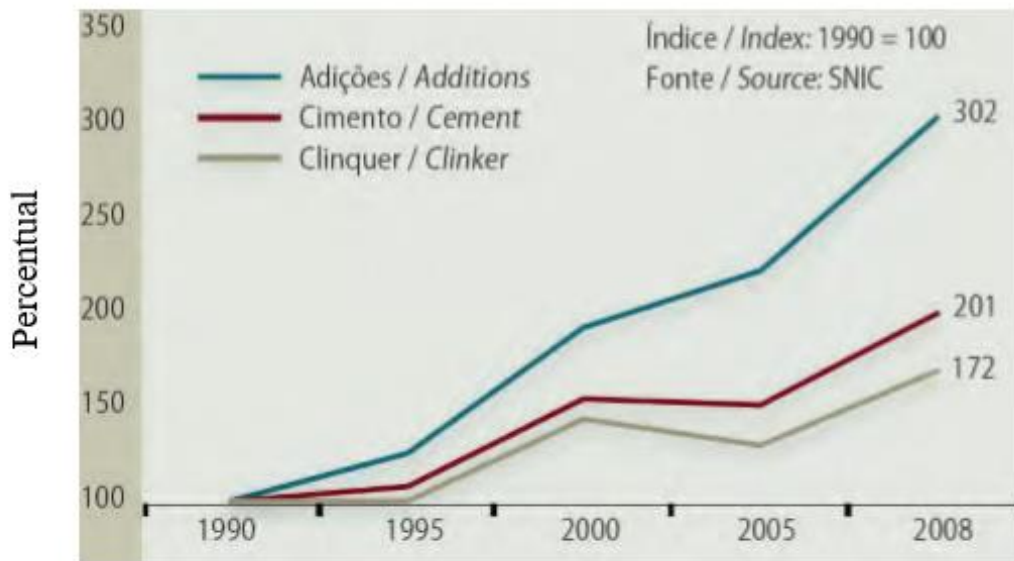
- aumento da resistência mecânica;
- diminuição do calor de hidratação;
- aumento da trabalhabilidade;
- aumento da resistência ao ataque ácido;
- aumento da durabilidade por inibição da reação álcali-agregado.

A incorporação de materiais finamente divididos, geralmente aumenta a trabalhabilidade do concreto fresco, apontam Mehta e Monteiro (2008), por reduzir o tamanho e o volume de vazios. Esse refinamento dos poros reduz a permeabilidade do concreto e, aliado à redução de sua alcalinidade, contribui para a durabilidade da estrutura, principalmente quando exposta a ataques químicos. Os autores afirmam também que, em concretos frescos que apresentam tendência à exsudação e à segregação, a incorporação de partículas finamente divididas geralmente melhora a trabalhabilidade por reduzir o tamanho e o volume de vazios. Logo, quanto mais fina for a adição mineral, menor será a quantidade necessária do material para aumentar a coesão e, conseqüentemente, a trabalhabilidade.

Além dos benefícios que o uso de adições minerais agregam às características da mistura, a utilização destas acarretam melhorias também ao meio ambiente, impedindo que grande parte de resíduos sejam despejados na natureza. A esse respeito, Isaia e Gastaldini (2004) argumentaram que, se 3,5% da produção mundial do concreto fosse realizada com 90% de adições minerais, não seria necessário aumentar a produção de clínquer além dos níveis atuais, tornando a indústria do cimento e concreto sustentáveis.

De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2015), há mais de 50 anos, a indústria nacional de cimento utiliza adições, provenientes de subprodutos de outras atividades industriais e matérias-primas alternativas, na composição de cimento. Atualmente, essa prática é seguida em quase todo o mundo, pois o cimento é um material caro e que demanda grande consumo de energia para a sua fabricação. Dessa forma, espera-se que no futuro sejam empregados, cada vez mais, materiais alternativos e suas combinações, a fim de produzir concretos de melhor desempenho, com menores gastos de energia e mais econômicos (RÊGO, 2004). Essas perspectivas, atualmente, podem ser comprovadas por meio do relatório anual do SNIC (2015), que mostra a evolução percentual do uso de adições no Brasil (Figura 5).

Figura 5 – Evolução percentual do uso de adições no Brasil



Fonte: (SNIC, 2015)

Na figura 5, nota-se que a partir do anos 90 houve um aumento significativo do uso das adições minerais, frente aos demais materiais de composição do concreto, mostrando com isto a eficiência e os reais benefícios que estas acarretam à mistura.

3 DURABILIDADE DO CONCRETO: CONCEITOS

O conceito de durabilidade, de acordo com o Comitê 201 do ACI¹, é definido como a capacidade do concreto de resistir às ações das intempéries, aos ataques químicos, à abrasão ou a qualquer outro processo de deteriorização, isto é, para ter durabilidade, o concreto durável conservará sua forma original, sua qualidade e sua capacidade de utilização quando exposto ao meio ambiente (MEHTA e MONTEIRO, 2011).

Os estudos de durabilidade foram motivados pela necessidade de avaliação do desempenho econômico de diferentes produtos bem como de planejamento da manutenção. Com o paradigma do desenvolvimento sustentável, a durabilidade ganhou uma nova dimensão, pois a ampliação da vida útil dos edifícios e componentes é uma forma efetiva de redução do impacto ambiental. Assim, as pesquisas na área ganharam novo impulso. A durabilidade depende muito mais de conhecimento do que de recursos. Muitas vezes, na produção do componente é que se causa a maior carga ambiental e a vida útil pode ser aumentada ou diminuída sem afetar proporcionalmente as cargas ambientais (JOHN, 2001).

Faz-se necessário, para o conhecimento do comportamento da estrutura, conhecer o meio ambiente onde ela está inserida, o qual pode fazer com que um concreto devidamente especificado e executado tenha sua vida útil reduzida significativamente (LIMA, 2011).

Isaia (2001) afirma que, no sentido estrito do termo, a durabilidade dos materiais está ligada à sua capacidade de se conservarem em determinado estado, com a mesma qualidade ao longo de um dado tempo. De outra forma, é a resistência de um material ou elemento da construção à deterioração ou à degradação. Esse conceito, diz o autor, está intimamente conectado com o de desempenho, que é o comportamento de um produto em serviço (em utilização), sob condições de real funcionamento ou uso, com pleno atendimento às exigências do usuário. Neville (1997), de maneira semelhante, diz que uma estrutura de concreto é durável quando desempenha as funções que lhe foram atribuídas, mantendo a resistência e a utilidade que dela se esperam durante o período de vida previsto. O concreto deve suportar o processo de deterioração ao qual se supõe que venha a ser submetido.

Para Helene (1983), no que diz respeito à durabilidade, é necessário conhecer, avaliar e classificar o grau de agressividade do ambiente e, por outro, de conhecer o concreto e a geometria da estrutura, estabelecendo então a correspondência entre ambos, ou seja, entre a agressividade do meio *versus* a durabilidade da estrutura de concreto.

De acordo com Medeiros et al. (2011), pode-se afirmar que o conhecimento da durabilidade e dos métodos de previsão da vida útil das estruturas de concreto são fundamentais para:

- auxiliar na previsão do comportamento do concreto em longo prazo: o conceito de vida útil é introduzido no projeto estrutural de forma análoga ao de introdução da segurança;
- prevenir manifestações patológicas precoces nas estruturas: esse conhecimento é fundamental para reduzir riscos de fissuras, corrosão, expansões e outros problemas nas estruturas;
- contribuir para a economia, a sustentabilidade e a durabilidade das estruturas: fazer uma boa engenharia significa manejar bem custos, técnicas e recursos humanos e ter respeito pelo meio ambiente.

A deterioração relativamente precoce de estruturas novas remete aos porquês de ocorrerem as patologias do concreto, resultantes de uma somatória de fatores, entre os quais, citam-se: erros de projeto e de execução, inadequação dos materiais, má utilização da obra, agressividade do meio ambiente, falta de manutenção e ineficiência ou ausência de controle da qualidade na construção civil (BRANDÃO, 1999).

Vários trabalhos têm demonstrado a importância econômica da consideração da durabilidade a partir de pesquisas que demonstram os significativos gastos com manutenção e reparo das estruturas em países desenvolvidos (UEDA e TAKEWARA, 2007).

Tradicionalmente, a durabilidade de uma estrutura de concreto tem sido pautada por regras implícitas, de modo determinístico, por intermédio de fatores como cobertura mínimo, relação água/aglomerante (a/ag) máxima, limitação de abertura de fissuras, tipo de cimento, tipo de aditivo, etc. Esses valores são tomados a partir de pesquisas de laboratório ou de campo e lições oriundas da experiência prática. Os resultados que se têm obtido com as lições oriundas da experiência prática levam, em geral, a um grau satisfatório de durabilidade, mas com variações significativas

(positivas ou negativas) devido à grande influência das condições reais do meio ambiente envolvente e do concreto real colocado nas peças estruturais (ISAIA, 2001).

No presente trabalho, entende-se por vida útil a capacidade do concreto de resistir e atender às exigências a que foi projetado e ao que será submetido, sem exigir medidas extras de manutenções e reparos. Nesse contexto, o tema de durabilidade está diante de dois elementos que contribuem e afetam o seu desempenho que são os objetos deste estudo: a retração e a penetração de íons cloreto.

3.1 RETRAÇÃO DO CONCRETO

3.1.1 Introdução

Nesta pesquisa, será estudado o fenômeno da retração e todos os aspectos relacionados a essa propriedade do concreto. Fatores muito importantes para o desenvolvimento e o entendimento do trabalho, como a conceituação e classificação dos tipos de retração, também serão abordados. Todavia, o enfoque maior será sobre as características da retração hidráulica. Os principais mecanismos de ocorrência, o uso de adições minerais nas misturas e sua influência também serão apresentados.

3.1.2 Conceituação de Retração

A retração no concreto está associada a deformações em pastas de cimento (principalmente, devido à sua perda de água), argamassas e concretos, sem que haja qualquer tipo de carregamento, reações químicas deletérias e expansivas ou variações térmicas (DINIZ et al., 2011).

O concreto, em seu estado endurecido, é um material que apresenta porosidade, e a magnitude e interconexão dos poros dependem das propriedades físicas e químicas dos materiais constituintes. Dessa forma, toda a água presente na estrutura da pasta de cimento endurecida que ainda não reagiu quimicamente, tende a evaporar do material em decorrência das condições de temperatura e umidade do meio em que o concreto está inserido. A saída da água, através dos poros, pode causar uma retração do concreto, cuja ocorrência e magnitude dependem dos diâmetros dos poros dos quais a água é removida. Esse fenômeno é chamado de retração hidráulica e

ocorre no concreto, submetido ou não a um carregamento, devido à perda de umidade, uma vez exposto ao meio ambiente e permitida sua secagem (ACI Committee 209, 2005).

Para Alvaredo e Wittmann (1995), o fenômeno da retração é a origem mais frequente da formação de fissuras. Como consequência, essa manifestação patológica permite a entrada de agentes agressivos, os quais contribuem para a aceleração da deterioração da estrutura por meio de diferentes fenômenos, como, por exemplo, a carbonatação e a corrosão das armaduras, entre outros, reduzindo a vida útil do material.

Devido à grande importância dessa propriedade do concreto e das consequências advindas dela, um vasto número de pesquisadores tem se dedicado, há muito tempo, à observação do comportamento das estruturas de concreto armado e à pesquisas sobre as causas de deformações, seus efeitos e às metodologias para minorá-las (DINIZ et al., 2011).

Para Neville (1997), o concreto, submetido ou não a um carregamento, contrai-se quando perde umidade, sofrendo uma retração. O autor a define como o processo de redução de volume que ocorre na massa de concreto, ocasionada, principalmente, pela saída de água por exsudação. Entretanto, existem outros fenômenos no concreto que provocam diferentes tipos de retração.

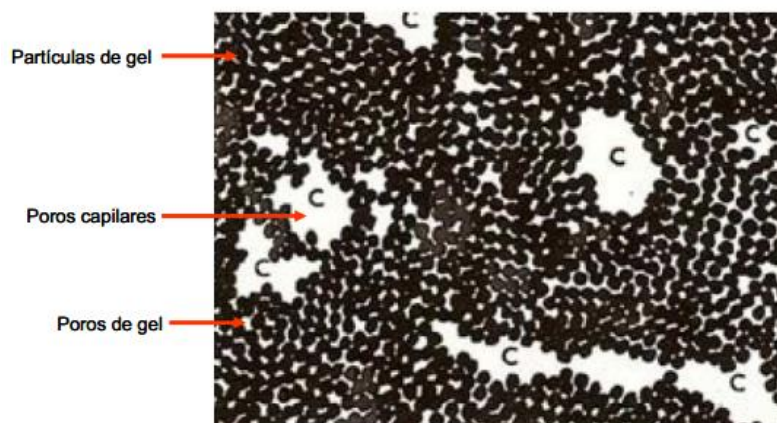
3.1.3 Mecanismos e tipos

Para melhor compreensão dos mecanismos do fenômeno de retração, é importante definir as condições em que se encontra a água retida na pasta de cimento hidratado, para, compreender os fenômenos de variação volumétrica do concreto e os tipos de poros em que a água pode estar presente.

Um fator importante que pode influenciar nesse fenômeno são os poros internos das pastas (METHA e MONTEIRO, 2008). Neto (2002) classifica os poros da estrutura de cimento hidratado em poros capilares e poros de gel. Os poros capilares, de acordo com Neville (1997), representam a parte do volume total não preenchida pelos produtos de hidratação. Desse modo, à medida que a hidratação se processa, ocorre a redução do volume de poros capilares. Os poros podem ser classificados em três categorias de acordo com o diâmetro (\emptyset): microporos, $\emptyset < 2$ nm; mesoporos, $2 < \emptyset < 50$ nm e macroporos, $\emptyset > 50$ nm. Já os poros de gel são os espaços intersticiais

interligados entre os produtos de hidratação e têm diâmetro compreendido na faixa denominada dos microporos, como ilustra a figura 6.

Figura 6 – Representação esquemática da estrutura da pasta.



Fonte: Adaptado de Neville (1997)

Os pontos cheios representam as partículas de gel; os espaços intersticiais, os poros de gel; os espaços marcados com C são os poros capilares

Os tipos de água são classificados em função do diâmetro dos poros em que ela se localiza e da sua dificuldade de remoção. A água é classificada em:

1. Água quimicamente combinada: é aquela contida nos produtos hidratados do aglomerante, liberada quando os hidratos se decompõem por aquecimento.
2. Água interlamelar ou intersticial: é a que está nos espaços entre as camadas internas da estrutura do gel, capaz de ser removida quando o ambiente se encontra com umidade relativa em torno ou abaixo de 11% (TAYLOR, 1997).
3. Água adsorvida: é aquela que permanece fisicamente retida na superfície dos produtos sólidos hidratados, sendo geralmente encontrada nos micro e nos mesoporos.
4. Água capilar: é a que está nos macroporos, também denominada de água livre, em razão da baixa tensão superficial.

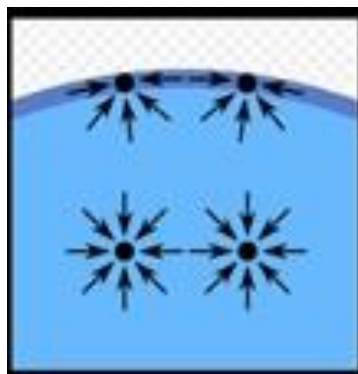
A rede porosa representa mais de 10% em volume de concreto. Essa porosidade desempenha um papel muito importante sobre o comportamento diferenciado dos concretos. De fato, a porosidade aberta rege as possibilidades de

transferência da água livre ou fracamente ligada para fora do concreto. O diâmetro dos poros é um parâmetro muito significativo. Os poros de diâmetros importantes (como é caso dos concretos convencionais, por exemplo) facilitam a migração da água durante a secagem do concreto, ampliando o efeito de secagem. Inversamente, os poros de diâmetro pequeno (como é caso dos concretos de alto desempenho – CAD –, por exemplo) retardam a migração da água, mas, no caso da auto-secagem durante a hidratação, criam tensões internas mais elevadas, que aumentam as deformações endógenas (TORRENTI, 2014).

- Mecanismo da tensão superficial

A tensão superficial é um efeito físico que ocorre na interface entre duas fases químicas. Ela faz com que a camada superficial de um líquido venha a se comportar como uma membrana elástica. Esta propriedade é causada pelas forças de coesão entre moléculas semelhantes, cuja resultante vetorial é diferente na interface. Enquanto as moléculas situadas no interior de um líquido são atraídas em todas as direções pelas moléculas vizinhas, as moléculas da superfície do líquido sofrem apenas atrações laterais e internas. Este desbalanço de forças de atração que faz a que faz a interface se comportar como uma película elástica como um látex. Como mostra a figura 7 (BUSH,2004).

Figura 7 – Diagrama de forças de coesão no interior e na superfície de um líquido.



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Tens%C3%A3o_superficial

A relação entre a tensão superficial e o fenômeno da retração dá-se pois quando ocorre a migração da água presente no concreto para dentro dos produtos de hidratação ocorre um aumento na tensão superficial dos poros, o que leva também a

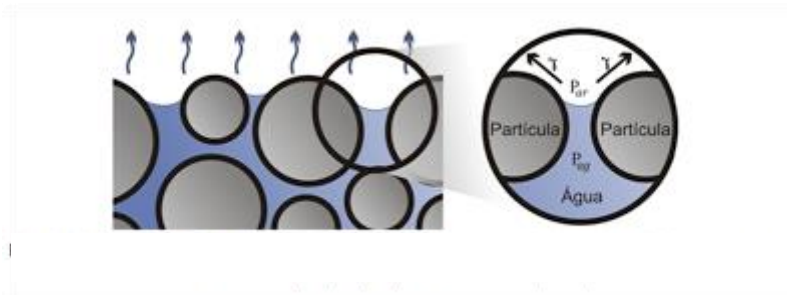
uma retração, mais intensa nas primeiras idades, quando o material ainda não tem resistência para se opor a esta deformação. Sua prevenção é feita com o fornecimento contínuo de água para o concreto neste período, por meio da cura úmida ou do uso de agregados leves saturados de água, que funcionam como um reservatório. Há aditivos redutores de expansão que atuam na diminuição da tensão superficial da água dos poros e também podem ser usados na fabricação do concreto (AOKI,2007).

Em relação ao comportamento dos concretos convencionais, Jensen (1995) afirma que normalmente a umidade relativa em sistemas cimentícios não atinge valores inferiores a 75%, de forma que os mecanismos da variação da energia de superfície e da pressão de disjunção não afetariam o comportamento de grande parte dos concretos convencionais frente ao desenvolvimento da retração. Assim, estima-se que a variação da pressão capilar seja o mecanismo mais adequado para a explicação do fenômeno.

Segundo este mecanismo, a capilaridade gera interfaces curvas entre o fluido (água) e o ar contido no interior dos poros. Na interface líquido-gás desenvolve-se um gradiente de pressão designado por pressão ou depressão capilar, que é função da tensão superficial líquido-gás, do raio de curvatura e do ângulo de molhamento (SANTOS et al., 2007). Pode-se definir a pressão capilar como a diferença entre a pressão atmosférica que atua acima do menisco formado entre as paredes num poro capilar, devido à tensão superficial entre o líquido e a parede sólida, e a pressão abaixo do menisco do mesmo poro capilar. Assim, quanto mais estreitos forem os poros em processo de esvaziamento, maior a intensidade da pressão capilar. Com a redução da umidade relativa e conseqüente secagem do material, ocorre primeiramente a criação de meniscos dentro dos capilares, seguida da diminuição progressiva do raio de curvatura desses meniscos, como forma de manter o equilíbrio entre o líquido e a fase gasosa. Desenvolve-se então uma diferença de pressão entre a fase líquida e a fase gasosa que se acentua à medida que a secagem se intensifica. Conseqüentemente, a depressão do líquido deve ser globalmente equilibrada por uma retração do sólido. Em outras palavras, o mecanismo de variação da pressão capilar ocorre pelo fato de que, em uma rede capilar não saturada, a fase líquida é tracionada devido à criação de um menisco na interface líquido-gás, que induz a pressão negativa sobre as paredes dos capilares, tendendo a aproximá-las. A retração macroscópica observável é proveniente da compressão à qual o sólido é submetido (SILVA, 2007). No concreto, a água dos meniscos apresenta uma curvatura entre as partículas mais

próximas da superfície ou do ponto onde a pressão do ar alcança internamente a mistura, conforme mostrado no esquema da figura 8.

Figura 8 – Esquema da formação dos meniscos entre as partículas próximas à superfície do concreto devido à evaporação



Fonte: Adaptado de Esping (2007).

Assim, quando ocorre perda de água na pasta de cimento, ocorre movimentação capilar da água nos poros capilares. Como consequência, há o desenvolvimento de tensões hidrostáticas que induzem tensões de compressão no interior da estrutura sólida. As tensões hidrostáticas são desenvolvidas quando um menisco é formado no capilar. Quanto menor o raio do menisco, maior é a pressão capilar. A umidade relativa também determina o valor do raio do menisco; com umidade relativa abaixo de 40 a 45 % não existem tensões capilares, pois nesta situação os meniscos não são estáveis (MINDESS e YOUNG, 1981). Ishai (1968 apud KOVLER & ZHUTOVSKY, 2006) afirmou que o mecanismo da pressão capilar ocorre para valores de umidade relativa superiores a 40%, devido à continuidade da água capilar, que favorece o desenvolvimento de maiores tensões internas na rede capilar. Baroghel-Bouny (1994) concorda que o mecanismo da pressão capilar é válido pelo menos em fortes umidades relativas, ou seja, quando os poros capilares estão cheios de líquido.

A retração no concreto pode ser separada em dois estágios após a mistura: antes de 24 horas e depois de 24 horas. Para cada um desses estágios, podem ocorrer diversos tipos de retrações, conforme mostra a figura 9 (HOLT, 2001). Essa transição do estado plástico para o estado rígido com aproximadamente 24 horas não é um consenso entre os pesquisadores.

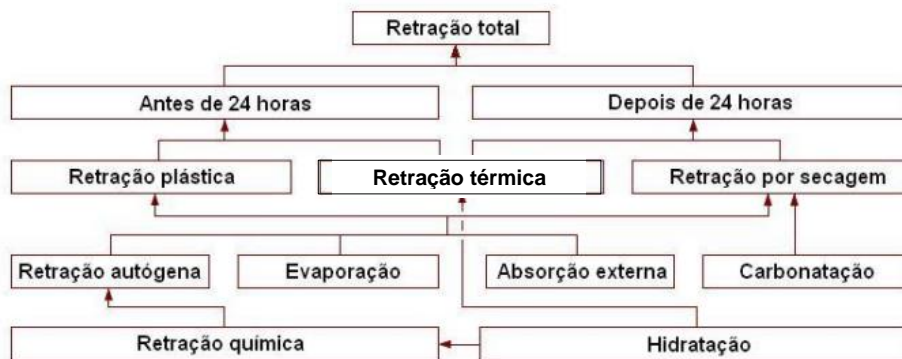
Figura 9 – Diagrama dos estágios e tipos de retrações



Fonte: (HOLT, 2001)

Os mecanismos que agem sobre a retração total distinguem-se entre estado plástico e endurecido, conforme mostra o diagrama da figura 10. (ESPING, 2007).

Figura 10 – Ilustração do mecanismo de retração total



Fonte: (ESPING, 2007)

As deformações ocorridas na matriz cimentícia devem-se aos diferentes tipos de fenômenos, sendo os principais: a retração plástica, a retração química, a retração autógena, a retração ou a deformação térmica, a retração por carbonatação e a retração hidráulica ou por secagem.

A retração plástica deve-se à perda de água na superfície do concreto ainda no estado plástico (NEVILLE, 1997). A intensidade da retração plástica é influenciada pela temperatura, pela umidade relativa ambiente e pela velocidade do vento. No entanto, a perda de água por si mesma não permite prever a retração plástica; isso depende muito da rigidez da mistura. Pode haver fissuração se a quantidade de água perdida por unidade de área for grande e maior do que a água que sobe à superfície por efeito

da exsudação. Impedindo-se completamente a evaporação depois do lançamento do concreto, elimina-se a fissuração. O meio eficaz de impedir a retração plástica consiste em manter baixa a velocidade de evaporação da água pela superfície do concreto, considerando que a evaporação aumenta quando a temperatura do concreto for muito mais alta do que a temperatura ambiente: em tais circunstâncias, pode ocorrer retração plástica mesmo que seja alta a umidade relativa do ar (TORRENTI, 2014).

A retração química, também denominada de *Le Chatelier*, é definida pela diminuição dimensional que ocorre devido às reações químicas entre os grãos de cimento e as moléculas de água, resultando em produtos hidratados de volume menor (NETO, 2002; ZHANG, TAM e LEOW, 2003).

A retração autógena pode ser definida como a mudança de volume sob temperatura constante ocorrida sem perda de umidade da mistura cimentícia para o ambiente externo. Essa redução de volume ocorre em função da reação química entre o cimento e a água, de tal forma que a água quimicamente combinada (da ordem de 22% da massa de cimento) sofre uma contração equivalente a 25% de seu volume original. Tal deformação autógena tende a aumentar a temperaturas muito altas, com teores de cimento maiores, conforme relata Neville (1997).

A retração por carbonatação é o produto de uma reação química entre o CO_2 da atmosfera e os compostos hidratados do cimento, especialmente $\text{Ca}(\text{OH})_2$. A reação de carbonatação gera água, que, ao se evaporar, aumenta a retração de secagem. Se a umidade relativa do ambiente for inferior a 25%, não haverá água suficiente nos poros da pasta de cimento para a reação química de carbonatação. No outro extremo, quando os poros estão cheios de água, é muito lenta a difusão do CO_2 e a retração devido à reação de carbonatação é pequena (DINIZ, et al., 2011).

O fenômeno de retração por secagem ou hidráulica está associado à perda de umidade para o meio ambiente, o que a torna uma das principais causas de fissuração e faz com que assuma um papel importante, pois sua ocorrência pode afetar a durabilidade do concreto. Um exemplo muito comum está nas fissuras superficiais em pisos. Esse tipo de retração é inevitável, desde que o concreto esteja exposto a um ambiente de umidade abaixo da condição de saturação.

Quando o concreto é exposto ao ambiente, tende a atingir um equilíbrio termodinâmico com ele. Em atmosfera seca, a superfície exposta do concreto perde água por evaporação. Com isso, a água presente na mistura que não reage quimicamente tende a evaporar conforme as condições de umidade e temperatura do meio em que o concreto está inserido. Essa evaporação através dos poros pode causar uma

retração no concreto, cuja ocorrência e intensidade dependem dos diâmetros dos poros dos quais a água é removida (ACI COMMITTEE 209, 2005).

O aparecimento de fissuras no material prejudica a durabilidade e a estabilidade da peça ou da estrutura que o contenha. A variação de volume do concreto ao secar não é igual ao volume de água retirado. A perda de água livre, que ocorre antes, causa pouca ou nenhuma retração. Com o prosseguimento da secagem, a água adsorvida é removida e, nesse estágio, a variação de volume da pasta de cimento hidratada não restringida é aproximadamente igual à perda de uma camada de água com espessura de uma molécula, da superfície de todas as partículas de gel. Em peças de concreto, a perda de água com o tempo depende do tamanho da peça (TORRENTI, 2014).

Bissonette et al. (1999) também afirmam que o fenômeno da retração hidráulica pode ser considerada como um dos principais responsáveis pela deterioração das estruturas de concreto. A deformação por retração, quando restringida, pode induzir o surgimento de tensões de tração nos elementos estruturais de concreto, as quais podem provocar fissuras e descontinuidades antes mesmo de a estrutura estar submetida às cargas de serviço, comprometendo precocemente a sua durabilidade e a sua aceitabilidade sensorial (NUNES e FIGUEIREDO, 2007).

A secagem do concreto é o resultado das condições climáticas e independe do carregamento. Ela se baseia nos fenômenos capilares que ocorrem nas redes de poros existentes no interior do concreto. As primeiras manifestações de retração verificam-se antes da pega (NEVILLE, 1997).

De acordo com o ACI Committee 209.1R (2005), para concretos de resistências normais/típicas, ou seja, abaixo daquelas dos concretos de alto desempenho, considera-se, geralmente, que a deformação total por retração é devida à retração hidráulica, de forma que qualquer contribuição da retração autógena é desconsiderada.

3.1.4 Influência do conteúdo de água e de cimento

Para se ter um melhor entendimento sobre os mecanismos de retração, é importante que se evidencie o comportamento da água retida na pasta de cimento hidratada para a compreensão do fenômeno de variação volumétrica do concreto em decorrência da perda de água.

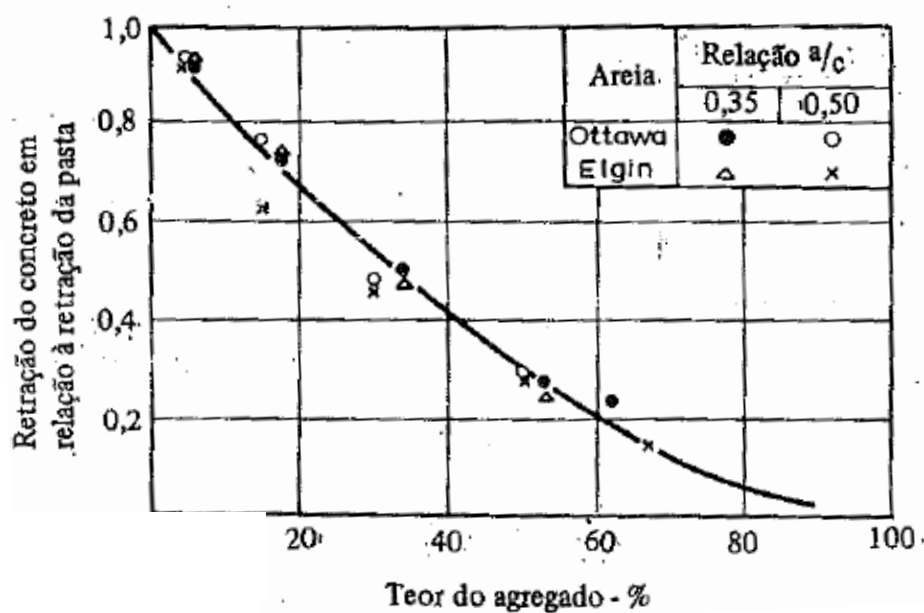
A retração é tanto maior quanto maior for a relação água/cimento, pois esta determina a quantidade de água evaporável na pasta de cimento e a velocidade à

qual a água pode se deslocar para a superfície do concreto (NEVILLE, 1997). Brooks (1992) demonstrou que a retração da pasta de cimento hidratada é diretamente proporcional à relação água/cimento entre os valores de 0,2 e 0,6. Para valores maiores do que 0,6, a água excedente pode ser removida por secagem sem retração.

De acordo com Neville (1997), a retração da pasta de cimento cresce com o aumento da relação a/ag, uma vez que esta condiciona a quantia de água evaporável na pasta e a sua velocidade de deslocamento para a superfície do concreto. Em contrapartida, segundo Shoya (1979, apud NEVILLE, 1999), para uma mesma consistência, que significa, aproximadamente, um mesmo teor de água, a retração não é alterada pelo aumento do teor de cimento, ou pode mesmo ser menor porque é diminuída a relação água/cimento e, portanto, o concreto estará mais capacitado para resistir à retração.

A influência conjunta da relação água/cimento e do teor do agregado podem ser combinadas em um único gráfico, como na figura 11; porém, estes valores de retração são típicos para secagem em climas temperados.

Figura 11 – Influência do teor em volume de agregado sobre a relação entre a retração de concretos para a retração da pasta de cimento.



3.1.5 O efeito do agregado

As características relevantes do agregado para a composição do concreto incluem: porosidade, distribuição granulométrica, absorção de água, forma, resistência à compressão e tipo de substâncias presentes, sendo este o responsável primordial pela massa unitária, pelo módulo de elasticidade e pela estabilidade dimensional do concreto. Essas características resultam da composição mineralógica da rocha, das condições de exposição a que a rocha foi submetida antes de produzir o agregado e do tipo de equipamento para a produção do agregado (MEHTA e MONTEIRO, 2008, p. 259).

O tamanho e a granulometria do agregado por si mesmos não têm influência sobre a magnitude da retração, mas agregados maiores permitem misturas mais pobres, resultando, portanto, em menor retração (TORRENTI, 2014). As propriedades elásticas do agregado determinam o grau de contenção da retração: por exemplo, agregado de aço resulta em uma retração um terço menor do que os agregados comuns. Já Andrade (1997) afirma que, para concretos em geral, o módulo de elasticidade do agregado está ligado à retração hidráulica, pois quanto menor o módulo de elasticidade do agregado, maiores serão as deformações devidas à retração que o concreto apresentará.

De acordo com Cabral et al. (2010), a granulometria, a dimensão máxima, a forma e a textura do agregado são fatores que influenciam na retração por secagem do concreto. O módulo de deformação do agregado é considerado o fator mais importante em relação a esse tipo de retração do concreto. A retirada de água do concreto conservado em ar não saturado causa a retração hidráulica. Uma parte dessa variação de volume é irreversível e deve ser diferenciada das variações reversíveis de umidade causadas.

Essa influência do agregado foi confirmada por Reichard (1974), que encontrou uma correlação entre a retração e o módulo de elasticidade do concreto, o qual depende da compressibilidade do agregado usado. A presença de argila no agregado diminui o seu efeito de contenção da retração, pois a presença de camadas de argila sobre o agregado pode aumentar a retração em até 70%. Mesmo com os agregados comuns, obtém-se uma considerável variação de retração do concreto. Os agregados usuais naturais normalmente não apresentam retração, mas existem rochas com retração por secagem de até 900×10^{-6} mm valor aproximadamente igual ao valor da

retração do concreto elaborado com agregados sem retração. Os concretos feitos com agregados que se retraem e que, por esse motivo, apresentam grande retração, podem resultar em problemas na utilização das estruturas devido a flechas ou empenamentos excessivos. Se a retração elevada resultar fissuração, também pode ser comprometida a durabilidade da estrutura.

Os agregados leves, de modo geral, apresentam maior retração, principalmente devido ao fato de o agregado, tendo um módulo de elasticidade menor, oferecer menor contenção à retração da pasta de cimento. Aqueles agregados leves que têm uma proporção grande de material fino passante na peneira 72 μm apresentam uma retração ainda maior, pois os finos tendem a uma maior proporção de vazios (TORRENTI, 2014).

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que ocorrem tensões de tração na pasta ao redor do agregado, as quais são decorrentes da retração durante a hidratação e secagem, causando fissuras quando resulta em tensão superior à admissível, dependendo do tamanho do agregado. Agregados com dimensão superior a 8 mm estão mais propensos ao fenômeno da segregação pasta/agregado, significando que mais vazios devem ocorrer em misturas que utilizam agregado graúdo.

Andrade (1997) cita que são inúmeros os fatores que podem influenciar a retração, tais como: condições ambientais, tipo litológico do agregado, dimensão máxima característica, propriedades físicas (absorção, massa específica) e elásticas do agregado, proporção dos materiais (principalmente a quantidade de água), microfissuras (interface pasta/agregado graúdo, assim como pela aderência entre os agregados).

3.1.6 Influência de adições minerais

As adições minerais trazem como consequência o refinamento dos poros da pasta de cimento e da zona de transição por meio de suas ações de densificação e de atividade pozolânica (MEHTA e MONTEIRO, 2008). A incorporação de adições minerais permite a produção de materiais cimentícios com melhores características técnicas, pois provocam mudanças na estrutura interna da pasta de cimento hidratada. Entre os principais benefícios decorrentes das adições minerais estão: a

redução na porosidade capilar do concreto, responsável pelas trocas de umidade, íons e gases com o meio; e a diminuição das fissuras de origem térmica em função da redução do calor de hidratação (DAL MOLIN, 2005).

Para Coutinho (1994), a substituição de cimento por pozolana leva ao aumento da retração nas primeiras idades; porém, em longo prazo, maiores extensões somente são observadas com porcentagens de substituição superiores a 20%. O mesmo autor ainda sugere que, quando se introduz escória de alto forno no concreto, a retração, em geral, não é afetada, a não ser em casos de baixa relação água/cimento (a/c) ou cura inicial de curta duração, quando um pequeno aumento da retração pode ser observado.

Isaia (1995) estudou os efeitos da retração em concretos com elevados teores de pozolanas e, segundo o autor, a influência destas na retração dos concretos depende da quantidade de água adicionada, do nível de resistência, assim como do tipo e do teor de pozolanas.

Metha e Monteiro (2008) relacionam a importância do uso das adições na durabilidade à fissuração térmica pois, admitindo-se que devido ao calor de hidratação a temperatura máxima em concreto massa é atingida dentro de uma semana após o lançamento, o emprego de uma adição mineral oferece a possibilidade de diminuir a elevação de temperatura quase em proporção direta com a quantidade de cimento Portland substituído pela adição.

Da Silva (2012) investigou a retração total de concretos compostos com diferentes teores de cinza de casca de arroz e com diferentes teores de carbono grafítico, submetidos a períodos de cura úmida de 3 e 7 dias. Observou comportamentos similares quanto à retração total para os dois tipos de cinza de casca de arroz. Embora tenham sido observados valores de retração pouco maiores para a cura de 3 dias, não foi constatada variação pronunciada entre os prazos de cura úmida, exceto para as misturas contendo 5% de CCA e relação a/ag 0,35. Essas, por sua vez, são influenciadas pelo grau de hidratação do material aglomerante. Constatou-se também que o aumento do teor de substituição ocasionou um aumento na retração, o que pode ser explicado pelo aumento do volume de pasta na mistura.

3.1.7 A influência do tipo de cimento e dos aditivos químicos

De grande relevância também é a composição química do cimento, pois exerce uma função importante na retração da pasta e do concreto. Roper (1974, apud ACI

COMMITTEE 209, 2005), constatou que cimentos com baixa quantidade de sulfatos podem resultar em aumento da retração. Notou também que a retração em concreto com alto teor de alumina ocorreu mais rapidamente. Com relação à finura do cimento, foi relatado que, quanto mais finamente moído, maior é a retração resultante.

Andrade (1997) afirma que o teor de cimento tem pouca influência na retração. Geralmente, cimentos mais finos, pozolânicos ou com adição de escória têm tendência a aumentar a retração, mas o efeito varia de acordo com o tipo de agregado usado. Segundo Mehta e Monteiro (2008), as variações na finura e na composição do cimento Portland influenciam a taxa de hidratação, mas não o volume e as características dos produtos de hidratação.

Outro componente importante de ser estudado são os aditivos químicos. Os aditivos redutores de água, por si mesmos, provavelmente causem um pequeno aumento da retração. O principal efeito é indireto, pois o uso de aditivo pode resultar em uma modificação do teor de água ou do teor de cimento da mistura, ou ambos os resultados, sendo o efeito combinado dessas modificações que tem influência sobre a retração.

Foi observado que superplastificantes aumentam a retração de cerca de 10% ou 20%. No entanto, as variações da retração que foram observadas são muito pequenas para serem aceitas como confiáveis e com validade generalizada. Torrenti (2014) afirma que pode se esperar que a retração de concretos de resistência muito elevada, que contém superplastificantes, é simplesmente a resultante de dois fatores importantes e opostos: uma relação água/cimento muito baixa e uma intensa auto-secagem concomitante, que levam a retrações baixas, e um alto teor de cimento, que leva a retrações elevadas. Assim, a abordagem usual para a estimativa da retração se aplica também a concretos de resistência muito alta. Contudo, a estrutura mais rígida desses concretos restringe a intensidade efetiva da retração.

De acordo com He et al. (2006), a maior parte dos aditivos redutores de retração são líquidos orgânicos com base em derivados do glicol. Nos dias de hoje, o propileno glicol ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}(\text{CH}_2\text{-OH})_2$) e o neopentil glicol ($(\text{CH}_3)_3\text{C}(\text{CH}_2\text{-OH})_2$) são alguns dos derivados do glicol utilizados para a obtenção dos aditivos redutores de retração, sendo os derivados do propileno os mais utilizados para este fim (COLLEPARDI et al., 2005).

3.1.8 Influência da cura

A cura é a denominação dada aos procedimentos a que se recorre para promover a hidratação do cimento e consiste em controlar a temperatura e a saída e entrada de umidade para o concreto. O seu objetivo é manter o concreto saturado, ou o mais próximo possível de saturado, até que os espaços da pasta de cimento fresca, inicialmente preenchidos com água, tenham sido preenchidos pelos produtos de hidratação do cimento até uma condição desejável. É importante que se impeça a perda de água do concreto não somente para não prejudicar o aumento da resistência, mas também para evitar a retração plástica, o aumento da permeabilidade e a redução da resistência à abrasão (NEVILLE, 1997).

Neville (1997) afirma que, quando não for realizada cura adequada do concreto e a velocidade de evaporação da água da superfície for maior que a taxa de reposição da água pela exsudação, podem ocorrer fissuras por dessecação superficial ou retração plástica.

Segundo Aitcin (2000), a superfície do concreto é sempre a primeira linha de ataque, se existe um ataque, e a sua formação inadequada devido à falta de cura adequada, pode ser crítica para a durabilidade do concreto. O autor enfatiza que é sempre importante avaliar o risco que se assume enfraquecendo-se a superfície do concreto por uma cura inadequada. A cura adequada nem sempre é prática se não for planejada com antecedência em relação à construção.

De acordo com Isaia (2011) a cura do concreto com água é o meio mais efetivo de prevenir a fissuração prematura e auxilia no desenvolvimento adequado das reações de hidratação nas primeiras idades. A manutenção da superfície do concreto saturada de água previne a sua difusão do interior para o meio ambiente e portanto, impede o aparecimento de retração plástica ou retarda a retração hidráulica, fornecendo à microestrutura da pasta tempo suficiente para resistir aos esforços de tração dela provenientes.

Consta no ACI Committee 209 (2005) que períodos de cura úmida prolongados acarretam, geralmente, na redução de 10 a 20% na retração de uma mistura de concreto. Essa redução varia em concretos com diferentes relações água/cimento.

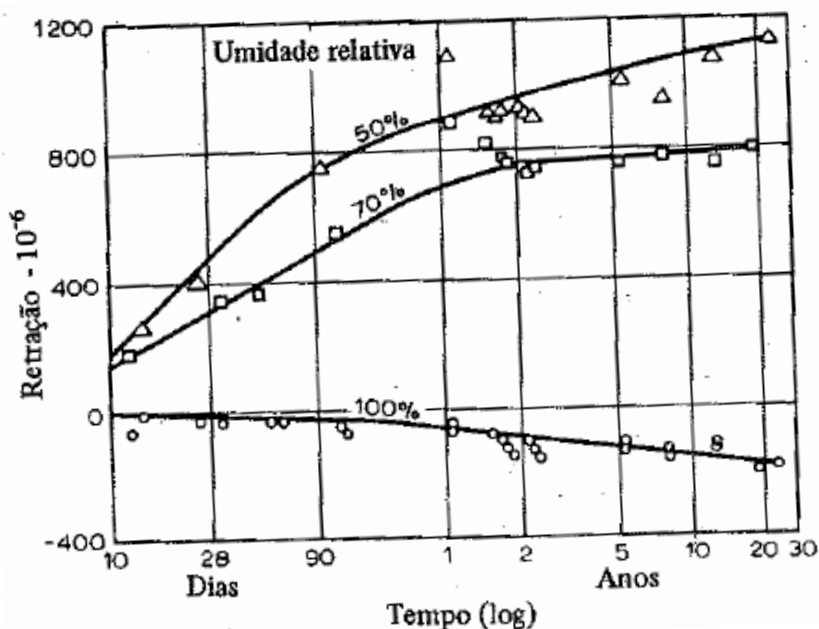
Dellinghausen (2009) estudou a influência do período da cura na retração total, utilizando a escória de alto forno em substituição parcial do cimento Portland branco e cinza na produção de concretos com diferentes relações a/ag (0,30; 0,42 e 0,55) e constatou que, em praticamente todas as misturas, a maior parte da redução dimensional ocorreu durante as três primeiras semanas, sendo creditada, principalmente, à perda de parte da água presente devido à cura, além da contribuição da retração autógena. Independentemente do cimento utilizado e da relação a/ag adotada, houve retração ligeiramente maior nos concretos curados durante 3 dias, em relação ao curado aos 7 dias, porém as diferenças foram inexpressivas, o que caracterizou similaridade entre os prazos de cura investigados.

Perenchio (1997) investigou a influência dos períodos de cura úmida (6 horas, 1 dia, 3 dias, 7 dias, 28 dias e 90 dias) na retração hidráulica, após um ano de secagem ao ar, para concretos com diferentes relações água/cimento (0,3; 0,4; 0,5; 0,6 e 0,7). O concreto com a menor relação água/cimento (0,3) apresentou maior retração independentemente do período de cura. Quando curado por menos de 7 dias, o concreto com a maior relação água/cimento (0,7) e, portanto, com o menor teor de cimento, obteve a menor retração. Segundo o autor, isso já era esperado, pois esse concreto contém a menor quantia de cimento hidratado, que é responsável pela retração hidráulica, além do maior teor de agregado, o qual restringe a retração.

Conforme resultados da pesquisa, para concretos com relações água/cimento de 0,3 e 0,4, a maior retração ocorreu nos corpos de prova curados por 3 dias. Já para as relações água/cimento de 0,5 e 0,6, a maior retração foi observada nos concretos curados por 7 dias.

A umidade relativa do ambiente que circunda o concreto tem muita influência sobre a retração como evidencia a figura 12. Essa mesma figura mostra também o maior valor absoluto da retração comparado com a expansão dentro da água: a expansão é cerca de seis vezes menor do que a expansão ao ar com umidade relativa 50% (TORRENTI, 2014).

Figura 12 – Relação entre a retração e o tempo de concretos conservados a diferentes umidades relativas. Tempo contado a partir do fim de 28 dias de cura úmida



Fonte: (TORRENTI, 2014).

Pode ser observado que o concreto se contrai se executado em ar seco (não saturado), mas se expande se conservado em água ou a uma umidade relativa 100%. Isso pode indicar que a pressão de vapor no interior da pasta de cimento é sempre menor do que a pressão do vapor saturado, e deve-se esperar que haja um grau de umidade no qual a pasta esteja em equilíbrio higroscópico (TORRENTI, 2014).

3.1.9 Efeitos do ambiente

Outros fatores que devem ser levados em consideração são os efeitos do ambiente. Onde o concreto foi misturado, moldado, curado e exposto durante sua vida útil são informações que têm elevada importância no seu comportamento quanto à secagem. Baixa umidade, vento e altas temperaturas tendem a aumentar a retração hidráulica do concreto. Esta, por sua vez, é primordialmente afetada pela umidade relativa (UR) do ar que cerca o concreto. Já o efeito da temperatura elevada, isoladamente, conforme o ACI Committee 209 (2005), é menos pronunciado no concreto que o efeito da umidade relativa na retração.

3.1.10 A influência do tamanho da peça

O tamanho do elemento de concreto, segundo Neville (1997), é outro fator influente na retração, pois a retração verificada por muitos pesquisadores diminuiu com o aumento da dimensão da peça. Entretanto, a partir de determinado volume, esse efeito é pequeno inicialmente, embora acentuado mais tarde. A retração pode ser expressa, então, em função da relação volume/área superficial da peça.

Muitos pesquisadores mostraram a influência das dimensões das peças sobre a retração, a qual diminuiu com um aumento das dimensões da peça. No entanto, além de certo volume, apresentou efeito das dimensões pequeno inicialmente, embora acentuado mais tarde. O efeito da forma é secundário, peças com perfil I mostram retração menor do que peças cilíndricas com igual relação volume/área-superficial, com diferenças de, em média, 14% (TORRENTI, 2014).

3.2 AÇÃO DE ÍONS CLORETO

3.2.1 Introdução

Os íons cloreto (Cl⁻) são agentes agressivos que danificam as estruturas de concreto e também provocam a despassivação da armadura, causando, com isso, a reação de corrosão da armadura, que é uma das patologias mais agressivas às estruturas de concreto.

Com base nisso, a fim de compreender a real importância do estudo e os mecanismos da penetração de íons cloreto, faz-se relevante abordar as definições e os mecanismos do processo de corrosão das armaduras.

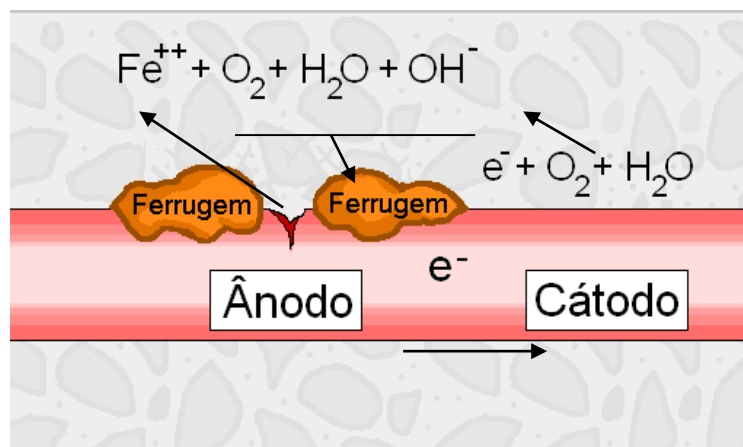
3.2.2 Corrosão das armaduras

A corrosão do aço no concreto tem recebido uma atenção crescente nos últimos 30 anos em virtude de sua frequência e dos custos elevados de recuperação. Um estudo no Japão mostrou que 90% dos edifícios expostos a ambientes marinhos apresentam espessuras de cobertura insuficientes, chamando a atenção para uma porcentagem importante de edifícios com 10 anos de idade que já manifesta

deteriorações. A corrosão é a causa de deterioração mais onerosa em termos de manutenção. Ela é a origem de inúmeros defeitos aparentes que, mesmo quando não conduzem a perdas da capacidade portante da estrutura, revelam-se prejudiciais no tocante ao bom funcionamento estrutural. Na América do Norte, investimentos tardios em manutenção têm causado deficiências estruturais significativas (LAURENS, 2014).

Pode-se definir corrosão como a interação de um material com o meio ambiente, por meio de reação química ou eletroquímica. O fenômeno da corrosão no concreto pode ser descrito como uma diferença de potencial elétrico entre dois pontos do aço no concreto pela formação de uma célula eletroquímica: forma-se uma região anódica, na qual há dissolução do metal com formação de cátions ferrosos (Fe^{++} , Fe^{+++}), que passam para a solução aquosa dos poros e há migração de elétrons livres para a região catódica onde, em conjunto com água e oxigênio, formam íons hidroxila (OH^-). Como há mobilidade de íons pelo eletrólito, os íons hidroxila combinam-se com os íons ferrosos formando, assim, a ferrugem como produto da corrosão, que acontece como resultado da formação de uma pilha, com eletrólito, constituído a partir da presença de umidade no concreto e da diferença de potencial entre trechos da superfície do aço (CASCUDO, 1997), como mostra a figura 13. Essas diferenças de potencial eletroquímico podem ter origem em diferenças no ambiente do concreto, por exemplo, quando uma parte está permanentemente imersa em água do mar e outra parte está exposta à molhagem e secagem alternadas (NEVILLE, 1997).

Figura 13 – Representação da corrosão eletroquímica no concreto armado



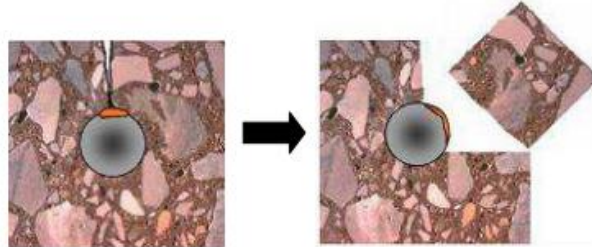
Fonte: (SCHNEIDER, 2005)

Em volta do aço que está imerso no concreto, forma-se um filme passivador, cuja função é proteger a armadura. No concreto, a camada de cobrimento, quando bem executada, oferecerá à armadura uma proteção física, dificultando a entrada de agentes agressivos do meio, além de uma proteção química, devido ao pH elevado do meio aquoso (em torno de 12,5), determinante para formação do filme passivador ao redor da armadura. Essa camada, conforme Neville (1997), forma-se logo após o início da hidratação do cimento, cuja composição, segundo Sagoe-Crentsil e Glasser (1990, apud CASCUDO, 1997, pág. 39), vai do Fe_3O_4 (magnetita) ao $\delta\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Na condição de não carbonatada, a solução aquosa dos poros do concreto encontra-se em ambiente altamente alcalino, mantendo-se a película estável. A incapacidade do concreto de exercer sua função protetora tem como consequência a corrosão das armaduras. Uma vez que o aço se encontra despassivado (desprotegido) e iniciada a corrosão da armadura, a resistividade elétrica e o acesso de oxigênio até a superfície da armadura são os principais fatores controladores do processo. A resistividade regula a mobilidade dos íons, dificultando a sua circulação, enquanto a ausência de oxigênio próximo à superfície do aço interrompe o processo (ANDRADE, 1992; ABREU, 1998).

O processo de iniciação da corrosão envolve, além da despassivação da armadura, o mecanismo de transporte dos íons cloreto e do CO_2 através da rede de poros do concreto e das suas interações com as fases sólidas do cimento. Nesse sentido, são importantes as características da estrutura dos poros e a capacidade de fixação dessas substâncias (RIBEIRO e CUNHA, 2014).

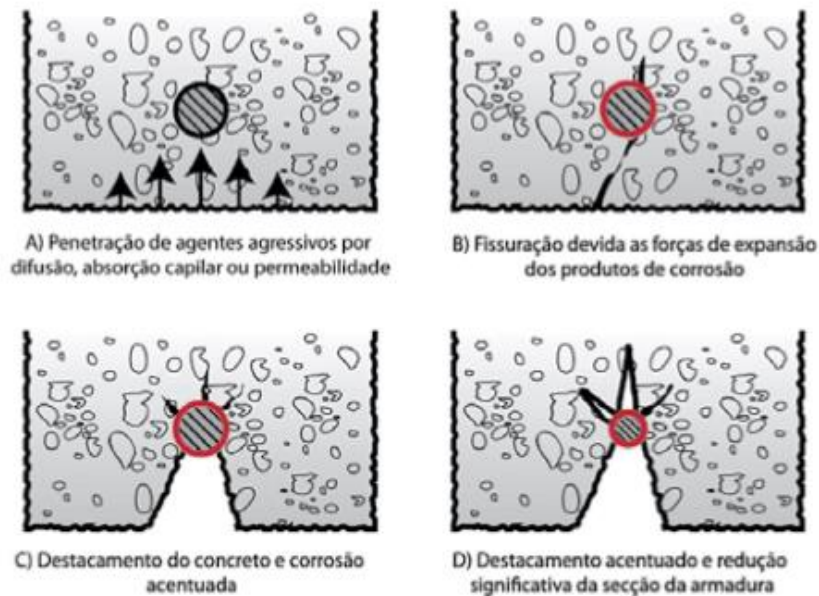
Neville (1997) afirma que, primeiramente, os produtos de corrosão ocupam um volume várias vezes maior do que o aço que lhes deu origem, de modo que a sua formação resulta em fissuração (caracteristicamente paralela às barras da armadura), lascamento ou delaminação do concreto. Isso torna mais fácil a entrada de agentes agressivos em direção ao aço, com consequente aumento da velocidade de corrosão. As fissuras no concreto constituem um caminho rápido de penetração dos agentes agressivos até a armadura e facilitam o acesso do oxigênio e da umidade, fatores necessários à iniciação da corrosão, como mostram as figuras 14 e 15 (RIBEIRO e CUNHA, 2014).

Figura 14 – Ilustração da fissuração e desprendimento do concreto devido à corrosão da armadura



Fonte: (CASCUDO, 1997)

Figura 15 – Evolução esquemática da deterioração de estruturas de concreto por corrosão de armadura



Fonte: (HELENE, 1986)

3.2.3 Os condicionantes para haver a corrosão

Segundo Helene (1986), a corrosão das armaduras conduz à formação de óxidos e hidróxidos de ferro, produtos de corrosão avermelhados, pulverulentos e porosos, denominados ferrugem. De acordo com o autor, só ocorrem nas seguintes condições:

1. Deve existir um eletrólito: A água presente no concreto em grandes quantidades, funciona perfeitamente como um eletrólito. Além desta, certos produtos de hidratação do cimento, como, por exemplo, a portlandita, também formam nos poros e capilares uma solução saturada que constitui um bom eletrólito.
2. Deve existir uma diferença de potencial: Em solução, parte dos átomos do ferro tende a se transformar em cátions ferro, com carga positiva, deixando a armadura com carga negativa e criando o que se conhece como potencial de equilíbrio ou reversível. Em presença de reagentes capazes de sofrer redução, ou seja, capazes de combinar com o elétron liberado na reação de formação do íon ferroso, pode formar-se uma pilha ou célula de corrosão eletroquímica.
3. Deve existir oxigênio: É necessário que haja a presença do oxigênio para a formação da ferrugem (óxido/hidróxido de ferro), além do eletrólito, representado pela umidade, e o hidróxido de cálcio. A velocidade de corrosão, no início, é rápida, tendendo a diminuir com a formação da camada de óxido, pois esta irá funcionar como uma barreira de difusão do oxigênio.
4. Devem existir agentes agressivos: A corrosão pode ser acelerada por agentes agressivos contidos ou absorvidos pelo concreto. Entre eles, podem-se citar os íons sulfeto, o cloreto, o dióxido de carbono, os nitritos, o gás sulfídrico, o cátion amônio, a fuligem, entre outros. Os agentes agressivos ou não permitem a formação ou quebram a película já existente de passivação do aço, acelerando a corrosão e atuando como catalisadores.

3.2.4 Penetração de íons cloreto

A corrosão das armaduras induzida por íons cloreto é a maior causa de deterioração e degradação prematura de estruturas de concreto construídas em ambientes com presença de sais, sendo, portanto, a penetração aos cloretos reconhecida como uma propriedade intrínseca do concreto (WEE et al., 2000).

O concreto que envolve a armadura, quando executado sem os devidos cuidados, pode não funcionar como uma barreira perfeita, permitindo que os vergalhões de aço sofram ataque desses íons agressivos ou de substâncias ácidas existentes na atmosfera. Os principais responsáveis pela corrosão são o dióxido de carbono e os íons cloreto (RIBEIRO e CUNHA, 2014).

A permeabilidade do concreto depende muito da facilidade com a qual os fluidos, tanto líquidos como gases, podem penetrar no concreto e deslocar-se no seu interior (NEVILLE, 1997). Os cloretos penetram no concreto pela movimentação da água contendo os 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 efeito do cloreto de sódio na corrosão deve-se ao fato de esse sal ser um eletrólito forte, ocasionando, portanto, aumento da condutividade, que é fundamental no mecanismo eletroquímico da corrosão. Pesquisas indicam que a quantidade de íons cloreto necessária para despassivar uma armadura está relacionada com a concentração de íons hidróxido presente nos poros. Quando a concentração de íons cloreto excede em 0,6 a concentração de íons hidróxido, o filme de passivação dissolve-se (RIBEIRO e CUNHA, 2014).

Neville (2008) ainda afirma que, quando o concreto permanece constantemente submerso, os cloretos penetram até profundidades consideráveis, mas não haverá corrosão a menos que haja oxigênio presente no cátodo. O ingresso de cloretos é progressivo em concretos ora expostos à água do mar ou ora secos.

Quanto ao teor crítico de cloretos no concreto, o valor de 0,3-0,6 % em relação à massa de cimento é identificado como um valor de consenso dentre as normas estrangeiras, o que equivale a 0,005 a 0,1% em relação à massa de concreto (CASCUDO, 1997).

Os íons podem ser introduzidos intencionalmente no concreto, como agente acelerador de pega e endurecimento, por meio de agregados e pela água de amassamento contaminados, por sais anticongelantes, salmouras industriais e névoa de ambiente marinho (CASCUDO, 1997). Para que se inicie a corrosão, a camada de passivação deve ser atravessada. Os íons de cloreto ativam a superfície do aço formando o ânodo, sendo o cátodo a superfície passivada (NEVILLE, 1997).

A penetração dos íons cloreto no concreto requer a presença de uma fase líquida. Em meio saturado, como, por exemplo, em estruturas imersas em 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 está isento desses íons). Quando a estrutura de concreto está submetida a ciclos de molhagem e secagem (zona de maré, exposição à nevoa 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. 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. A penetração dos cloretos depende, portanto, das características do material e dos ciclos de molhagem e secagem que incidem nesse material (duração, condições climáticas) (LAURENS, 2014).

Outros fatores que explicam a presença de íons de cloreto podem ser através da utilização de matérias-primas contaminadas durante a mistura do concreto, por exemplo: agregados, principalmente em regiões litorâneas; águas salobras ou excessivamente cloradas; aditivos aceleradores de endurecimento ou de pega, que possuem cloreto de cálcio (CaCl_2) em sua composição; e, até mesmo, cimentos, pois os cloretos melhoram as resistências iniciais deles. Outra origem pode ser a contaminação externa, que é decorrente da exposição da estrutura à água ou à atmosfera marinha, ou da utilização de tratamento superficial de limpeza com ácido muriático (ácido clorídrico – HCl , comercial), técnica habitual em países de clima tropical e equatorial. Uma prática muito comum e necessária em países de clima frio é o uso de sais descongelantes (NaCl , CaCl_2 e MgCl_2), que também são fontes ricas de íons cloreto (HELENE, 1993).

Dotto (2006) afirma que, no Brasil, como não há a necessidade da utilização de sais descongelantes em rodovias ou pontes, o ingresso de íons cloretos no concreto pode se dar por meio de:

- Difusão: nas estruturas submersas em águas marinhas;
- Absorção: nas estruturas localizadas na orla marítima, sujeitas à maresia e/ou à neblina ou, ainda, estruturas em zonas de respingos;

- Incorporação durante a mistura: pelo uso indevido de água de amassamento ou agregados contaminados com cloretos; e
- Adição intencional: como aditivo acelerador (atualmente a NBR 6118 proíbe a utilização, em concreto armado ou protendido, de aditivos aceleradores que contenham cloretos em sua composição).

A espessura do revestimento da armadura é um fator importante de controle da movimentação dos íons cloreto: quanto maior a espessura de revestimento, maior o intervalo de tempo até que a concentração de cloretos na superfície da armadura atinja o valor limite. Assim, a qualidade do concreto, quanto à baixa penetrabilidade, e a espessura do revestimento atuam em conjunto e podem, até certo ponto, ser compensadas uma pela outra. Não adianta ter um revestimento espesso em um concreto muito penetrável, pois espessuras indevidamente grandes de revestimento resultariam em volumes consideráveis de concreto sem armadura. A presença da armadura também é necessária para controle da retração e das tensões de origem térmica e para impedir a fissuração devido a essas tensões (NEVILLE, 1997).

Os íons cloreto podem ser encontrados no interior do concreto em uma das seguintes formas:

- Quimicamente combinados com as fases alumino-ferríticas para formar os cloro-aluminatos;
- Fisicamente adsorvidos na superfície dos poros capilares; e
- Somente os íons cloreto livres atuam na corrosão. Entretanto, os combinados podem tornar-se livres em ocasiões como a carbonatação de revestimento.

Devido ao fato de os cloretos serem abundantes na natureza e serem considerados como os maiores causadores de corrosão nas armaduras dos concretos, esse agente agressivo é amplamente estudado por pesquisadores do mundo todo (DOTTO, 2006).

3.2.5 Os efeitos dos íons cloreto na corrosão

De acordo com o ACI (American Concrete Institute, 2005), existem três teorias modernas que explicam os efeitos dos íons cloreto na corrosão do aço: adsorção, filme óxido e complexo transitório.

- Teoria da adsorção: os íons são adsorvidos na superfície metálica em competição com o oxigênio dissolvido ou com os íons hidroxila. O cloreto

promove a hidratação dos íons metálicos, facilitando a sua dissolução (RIBEIRO e CUNHA, 2014).

- Teoria do filme óxido: os íons cloreto penetram no filme de óxido passivante sobre o aço, através de poros ou defeitos, ou através de dispersão coloidal, mais facilmente do que penetram outros íons, como, por exemplo, o sulfato. Assim, os íons cloreto diminuem a tensão superficial interfacial resultando na formação de rupturas ou falhas, debilitando o filme passivo (RIBEIRO e CUNHA, 2014).
- Teoria de complexo transitório: os íons Cl competem com os íons hidroxila (OH) para a produção de íons ferrosos. Forma-se, então, um complexo solúvel de cloreto de ferro, o qual pode difundir-se a partir de áreas anódicas, destruindo a camada protetora de Fe (OH)₂ e permitindo a continuação do processo corrosivo. Uma vez que a corrosão não é estancada, mais íons de ferro continuam a migrar dentro do concreto a partir do ponto de corrosão e reagem, também, com o oxigênio para formar óxidos que ocupam um volume quatro vezes maior, causando tensões internas e fissuras no concreto (RIBEIRO e CUNHA, 2014).

Para Cascudo (1997), a temperatura exerce um papel duplo. Se, por um lado, seu aumento leva a um aumento na velocidade das reações e da mobilidade iônica, por outro, sua diminuição pode levar à condensação e produzir aumento na umidade local. O aumento da temperatura aumenta o teor de cloretos livres na água dos poros, fato que explica a existência de mais concretos deteriorados em regiões litorâneas quentes do que em temperadas.

3.2.6 A influência da relação água/cimento e as condições de cura na penetração de íons cloreto

A relação água/cimento influencia na porosidade, na forma, no volume e na distribuição dos tamanhos dos poros, controlando, assim, a penetração dos íons cloreto (FIGUEIREDO, 2011).

A relação a/ag, segundo Helene (1993), desempenha um papel fundamental nas características físicas do concreto, pois influi na permeabilidade e na capacidade de absorção de água pelo concreto. Diversos pesquisadores observaram que essa

relação a/ag possui relação inversamente proporcional com resistência à penetração de cloretos, ou seja, que quanto maior a relação a/ag , menor será a resistência do concreto à penetração de cloretos, devido ao aumento da porosidade da pasta do concreto.

O autor ainda relata que os cloretos nocivos ao concreto se encontram, geralmente, na forma de íons dissolvidos em água, pois, quando estes se encontram na forma de cristais, têm dimensões muito elevadas, o que impossibilita sua penetração pela rede porosa do concreto.

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. Por isso, um concreto com um período de cura mais curto apresenta mais cloretos que um concreto com uma cura mais prolongada. No entanto, essa diferença é menos expressiva à medida que se passa para camadas mais internas, já que a difusibilidade interna é menos afetada pelas propriedades da pele (JAERGERMAN, 1990).

3.2.7 A influência do uso das adições no fenômeno da corrosão e penetração de íons cloreto

Os materiais cimentícios como a cinza volante, a escória granulada de alto forno e a sílica ativa, quando devidamente proporcionados na mistura, reduzem significativamente a penetrabilidade e aumentam a resistividade do concreto, reduzindo, portanto a velocidade da corrosão (NEVILLE, 1997).

Com o uso das adições, as reações pozolânicas diminuem as dimensões dos poros e dos grãos (moléculas) de CH. Dal Molin (2011) afirma que as adições minerais

com atividade química normalmente reagem com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento, gerando silicatos e sílico-aluminatos de cálcio hidratado, que acabam precipitando nos vazios maiores da pasta endurecida, como os canais capilares, reduzindo a permeabilidade e a absorção do concreto. A autora também explana que é consenso que as adições minerais contribuem para reduzir tanto a penetração de cloretos como a entrada de umidade e oxigênio no interior do concreto, aumentando a sua resistividade e contribuindo para a prevenção da corrosão das armaduras desencadeada por cloretos.

Isso mostra a grande importância do uso das adições frente à penetração de cloretos, pois o aumento da compacidade do concreto com a diminuição de sua permeabilidade torna o material mais resistente contra a ação de agentes agressivos, possibilitando maior durabilidade do material.

3.2.8 Os benefícios do uso da escória de alto forno na penetração de íons cloreto

McGrath e Hooton (1997) estudaram a resistência à penetração de cloretos em concretos com diferentes aglomerantes. Misturas binárias e ternárias foram moldadas com cimento Portland, escória de alto forno, cinza volante e sílica ativa.

Foram avaliadas duas relações a/ag , 0,31 e 0,40. Os corpos de prova foram moldados em blocos de 350 mm x 250 mm x 150 mm e de 350 mm x 150 mm x 75 mm e curados na própria forma, sob sacos de aniagem úmidos nas primeiras 24 horas. Então foram desmoldados e curados úmidos durante 1, 5 e 56 dias. Os concretos curados por 1 e 5 dias foram estocados em ambiente com 50% de umidade relativa e 23°C de temperatura até a idade dos testes (56 dias). Nessa idade, amostras de 100 mm de diâmetro foram extraídas dos núcleos dos blocos, fatiadas, saturadas (e submetidas à vácuo) por 24 horas antes dos testes. Dois métodos de medida de penetração de cloretos no concreto foram empregados: o teste de migração de cloretos (cloretos conduzidos através do corpo de prova a partir de uma diferença de potencial aplicada) e o teste de imersão em solução salina (5,0 mol/L de NaCl a 40°C durante 120 dias).

Comparando-se o concreto composto de 25% de escória em substituição ao cimento Portland com o concreto de referência, observaram-se, para ambos os métodos de ensaio, notáveis reduções nos coeficientes de penetração quando se usou escória. Pelo estudo dos autores, verifica-se que a escória possui uma influência

positiva na penetração de íons cloretos em relação à mistura do concreto de referência. A escória de alto forno propicia ao concreto uma diminuição no volume de poros capilares com a sua utilização, o que leva à menor permeabilidade e à maior vida útil da estrutura.

Zhang et al. (1999) estudaram a penetração de cloretos (ASTM C1202, 2012) em concretos sem e com 55% escória com a/ag de 0,32 e 0,33, respectivamente, em dois processos de cura: um em câmara úmida por 28 dias e outro com utilização de sacos de estopa úmidos por 7 dias e, depois, ao ar em ambiente de laboratório, até completar 28 dias de idade. Como conclusão, os autores relatam que os concretos não são afetados significativamente pelas condições de cura; entretanto, a carga passante em concretos com escória diminui pela metade em relação ao concreto de controle nos dois processos.

Costa (2001) estudou a penetração de cloretos (ASTM C1202, 2012) em concretos com escória em diferentes níveis de finura. Em teores de 35% e 70% de escória, o autor verificou que o aumento no teor de substituição sempre resultou em aumento na resistência à penetração de cloretos. No entanto, o aumento da finura de 300 m²/kg para 700 m²/kg resultou em leve aumento da carga passante, embora os valores das misturas compostas fossem sempre inferiores ao concreto de referência.

Segundo estudos de Schneider (2005), que utilizou misturas com teores de substituição do cimento Portland por escória de 50 e 70%, relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65 e períodos de cura úmida de 3, 7, 28 e 91 dias, a adição de escória de alto forno, em substituição parcial do cimento Portland, é bastante eficiente na elevação da resistência dos concretos à penetração de cloretos, e o aumento de seu teor majora essa proteção. Os resultados do ensaio de imersão (EPCI) revelaram considerável diminuição do índice k' , principalmente em concretos de alta relação a/ag 0,65 e nas idades iniciais da relação 0,50. Para a relação 0,65 e, em igualdade de idade de cura, os índices k' das misturas contendo 50 e 70% de escória (50E e 70E) não ultrapassaram 32% dos índices da mistura de referência.

3.2.9 Os benefícios do uso de cinza de casca de arroz na penetração de íons cloreto

A microporosidade e a elevada área superficial das partículas da cinza de casca de arroz contribuem para a sua alta atividade pozolânica. Uma das grandes vantagens

técnicas de sua utilização como adição mineral está na capacidade de reduzir drasticamente a permeabilidade do concreto. Essa capacidade é de grande valia, pois, com a diminuição de sua permeabilidade, conseqüentemente pode haver a redução de penetração de agentes agressivos, em especial os íons de cloreto.

Na revisão bibliográfica realizada por Giviet et al. (2010), é demonstrado claramente que a CCA pode diminuir o efeito da temperatura que ocorre durante a hidratação do cimento, diminuir a porosidade total do concreto, modificar a estrutura dos poros de cimento e reduzir significativamente a permeabilidade, além de reduzir significativamente o efeito de retração.

Zamberlan (2012) realizou experimentos comparando o concreto de referência com misturas compostas por CCA e concluiu que a mistura de referência (REF) apresentou os maiores valores de índices de penetração de cloreto, dentre todas as misturas em que foi utilizada CCA, independentemente da relação a/ag e do período de cura, ou seja, apresentou o pior desempenho frente à penetração de cloretos. Com o aumento do teor de substituição, reduz-se o teor de aluminatos e CH (existente no cimento), que se combinariam com os íons cloreto, diminuindo a quantidade de íons livres capazes de atacar as armaduras. Contudo, nesse caso, o efeito físico-químico (refinamento dos poros) sobrepôs-se à diminuição dos aluminatos e CH, pois o aumento do teor de substituição de cimento pelas cinzas de casca de arroz proporcionou um melhor desempenho frente à penetração dos íons cloretos. Verificou-se o bom desempenho atingido com a adição da Cinza de casca de arroz clara (CCAC) e da Cinza de casca de arroz escura (CCAEC), frente à penetração de cloretos no concreto. Dessa forma, além de melhorar propriedades de durabilidade das estruturas, o uso dessas adições promoveu um benefício ambiental à medida que diminuiu o uso de cimento e concedeu importância econômica a um resíduo antes sem destinação.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o propósito de atingir os objetivos preestabelecidos, foi analisado o desempenho de concretos compostos com cinza de lodo de ETA submetidos a períodos de cura úmida de 3 e 7 dias, frente à retração total e à penetração de íons cloreto após a retração. Foi feita a comparação do comportamento desses materiais com o concreto de referência 100% cimento Portland. Investigou-se, também, a influência de misturas ternárias e quaternárias, constituídas de escória de alto forno e cinza de casca de arroz, nas propriedades investigadas.

Para facilitar o entendimento, foram definidas as variáveis utilizadas neste estudo:

- Variáveis independentes:
 - Relação água/ aglomerante (a/ag): 0,35; 0,50 e 0,65.
 - Período de cura úmida: 3 e 7 dias
- Idade de ensaio:
 - 7, 14, 21, 28, 35, 56, 91, 182 e 365 dias – Retração total
 - 7, 14, 28, 56 e 91 dias – Penetração de íons cloreto.
- Adições minerais utilizadas como substituição em massa do cimento:
 - cinza de Lodo de ETA (CLETA);
 - escória de alto forno (EAF) e
 - cinza de casca de arroz (CCA).
- Teores de substituição:
 - Substituições do cimento Portland por CLETA variando de 0% a 30%;
 - 20% CLETA + 5% EAF;
 - 20% CLETA + 10% EAF;
 - 15% CLETA + 5% EAF + 5% CCA.
- Variáveis dependentes:
 - Retração total;
 - Penetração de íons cloreto.

4.1 MATERIAIS

A fim de avaliar a influência da substituição do cimento Portland por diferentes porcentagens de substituições de cinza de lodo de ETA, CCA e EAF, foram investigadas as seguintes misturas, conforme apresentado na tabela 1:

Tabela 1 – Proporção das adições minerais em cada mistura.

Misturas a serem realizadas (Siglas)	Proporção das adições minerais em cada mistura			
	Proporção de Cimento Portland CPV-ARI	Cinza de Lodo de ETA	Escória de Alto Forno	Cinza de Casca de Arroz
5 L	95%	5%	-	-
10 L	90%	10%	-	-
15 L	85%	15%	-	-
20 L	80%	20%	-	-
25 L	75%	25%	-	-
30 L	70%	30%	-	-
5 EAF	75%	20%	5%	-
10 EAF	70%	20%	10%	-
5 CCA	80%	15%	5%	5%

Fonte: autora

Foram utilizadas as relações de a/ag de 0,35; 0,50 e 0,65. Todas as misturas tiveram amostras com dois períodos de cura úmida de 3 e 7 dias, com o objetivo de atender ao propósito da pesquisa.

4.2 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS

4.2.1 Aglomerantes

- Cimento Portland de alta resistência inicial, CPV-ARI, fabricado nacionalmente, em conformidade com a norma NBR 5733 (ABNT,1991);

- Lodo de ETA: Proveniente da ETA da cidade de Venâncio Aires. Foi calcinado a 600°C por 1 hora e moído por 2 horas em moinho de esferas de aço até ser transformado em cinza de lodo de ETA para ser utilizado em substituição ao cimento (HENGGEN, 2014).

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 2, são apresentadas as características físico-químicas do lodo, *in natura* e calcinado a 600°C.

Tabela 2 – Características físico-químicas do lodo de estação de tratamento de água *in natura* e calcinado a 600°C por 1 hora.

Características Físicas	L (lodo <i>in natura</i>)	L 600 (calcinado a 600°C)
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 2, constata-se que a soma dos constituintes $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 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 NBR 10.004 (ABNT, 2004) que especifica um valor de 70%.

A mesma norma especifica um teor de perda ao fogo $\leq 10\%$ e um teor de álcalis disponíveis $\leq 1,5\%$. 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 8 para o lodo *in natura* e na tabela 9 para o lodo calcinado a 600°C.

Na figura 16 (a e b), são apresentados os difratogramas do lodo *in natura* e após calcinação a 600°C por 1 hora, respectivamente. 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 3 e 4).

Tabela 3 – Composição mineralógica do lodo *in natura*.

Nome do composto	Fórmula química
Quartzo	SiO_2
Caulinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Hematita	Fe_2O_3
Anordita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
Sanidina	KAlSi_3O_8

Fonte: (HENGGEN, 2014)

Figura 16 – Difratoograma de raios X da amostra de lodo: A) *in natura* e B) calcinada a 600°C.

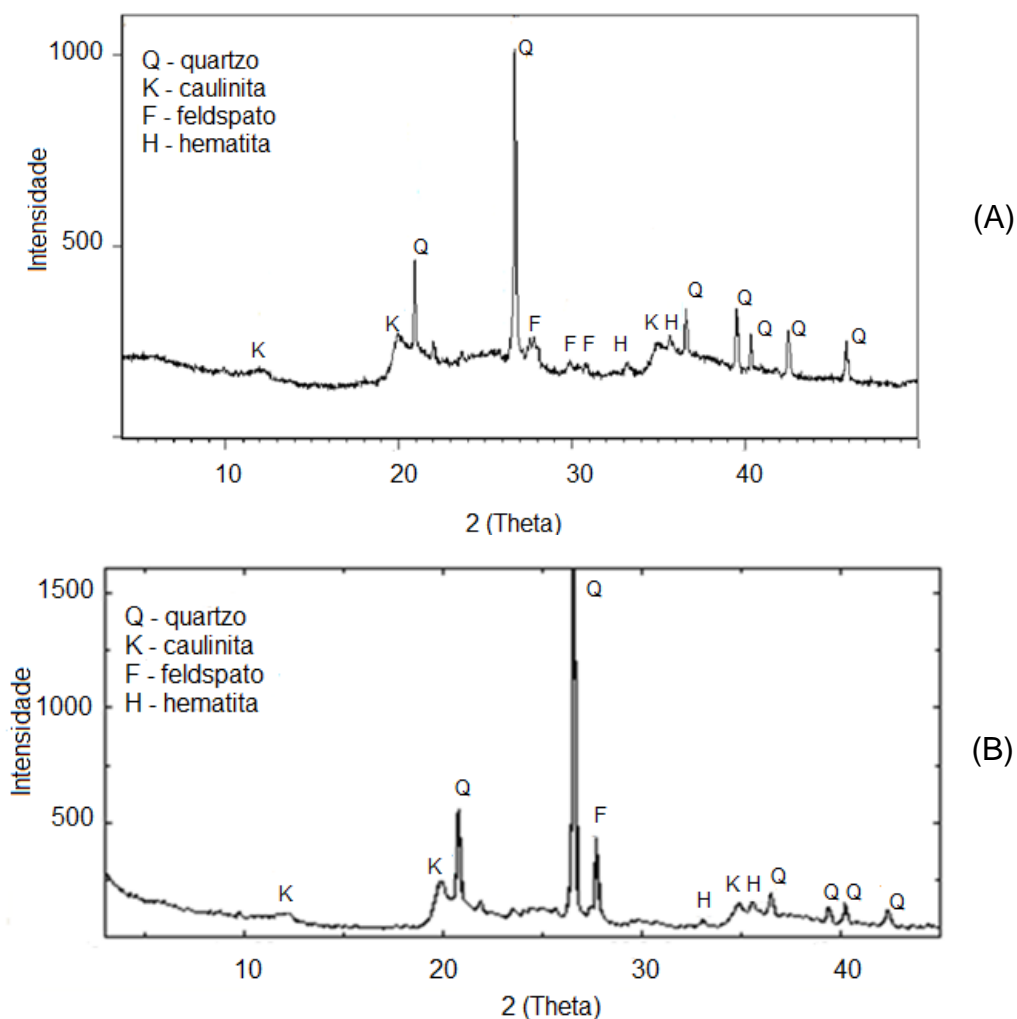


Tabela 4 – Composição mineralógica do lodo calcinado a 600°C por 1 hora.

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

Fonte: (HENGGEN, 2014)

- Análise termodiferencial e termogravimétrica

As análises termodiferenciais determinam as diferenças de temperatura entre um padrão e a amostra quando aquecidos simultaneamente até a temperatura de 1000°C, à taxa de 10° C/mim. Com base no termograma obtido, é possível verificar quais foram as reações ocorridas na amostra durante o aquecimento. As reações identificadas são apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Caracterização por análises termodiferencial e termogravimétrica do lodo calcinado a 600° C por 1 hora realizada pela ABCP.

Temperatura do pico (°C)	Natureza da reação	Interpretação
60	Endotérmica	Perda de água livre
320	Exotérmica	Decomposição de matéria orgânica
470 – 510	Endotérmica	Desidroxilação dos argilominerais
575	Endotérmica	Transformação do quartzo α em quartzo β

Fonte: (HENGEN, 2014)

Com base nas curvas termogravimétricas figura 17, foram determinadas as perdas de massa e, a partir dessas, estimou-se o teor de caulinita presente nas amostras. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 5.

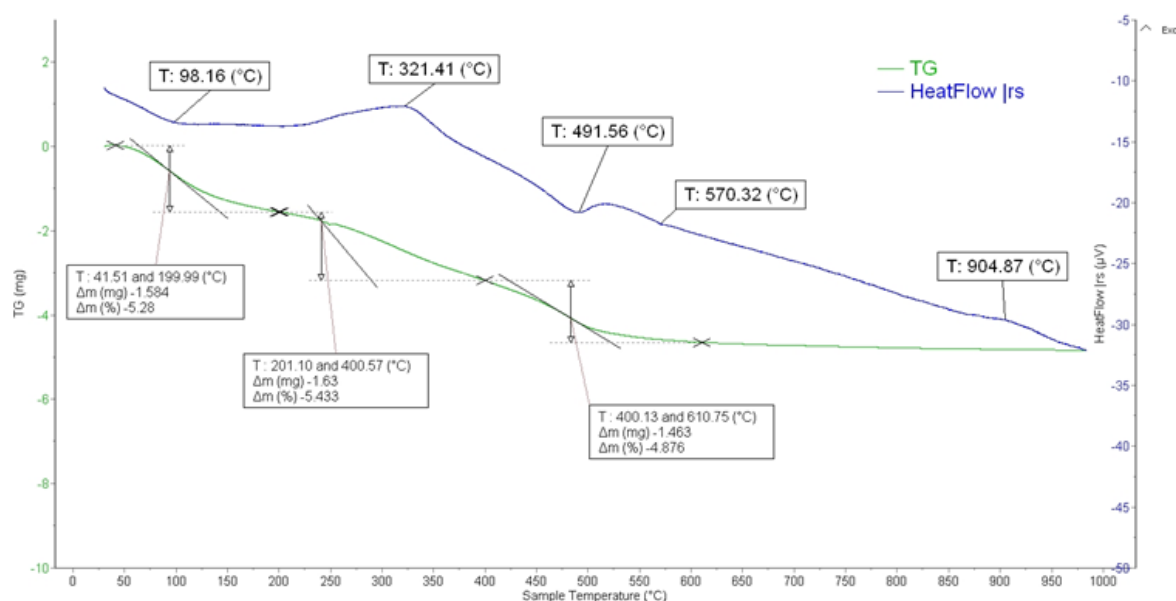
Tabela 5 – Resultados termogravimétricos do lodo calcinado a 600° C por 1 hora.

Perda de massa (%)				
Amostras	20-200° C	200-400° C	400-800° C	Teor de caulinita (%-base seca)
Argila	5,3	5,4	4,9	37

- 400-800° C desidroxilação dos argilominerais
- Os teores de caulinita foram calculados com base na perda de massa teórica desse mineral: 13,9%.

Fonte: (HENGEN, 2014)

Figura 17 – Gráfico de Análise Termogravimétrica e Termogravimétrica da amostra de argila



Fonte: (HENGEN,2014)

A amostra de argila é composta principalmente pelos minerais quartzo e caulinita. De modo secundário ou na forma de traços, foi possível identificar feldspato e hematita.

As análises térmicas revelaram que a amostra possui perda de massa entre 200° e 400°C associada a um pico exotérmico correspondente à decomposição de matéria orgânica.

De maneira geral, pode-se afirmar que a atividade pozolânica de uma argila é tanto mais intensa quanto maior é o conteúdo de substâncias amorfas ou estruturas desarranjadas presentes no material, como por exemplo, diatomitos ou argilominerais desestruturados.

- 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), Tubarão/ES, utilizada nas condições recebidas, conforme Veiga (2011).

Na tabela 6, são apresentadas as características físico-químicas dos aglomerantes, segundo Hengen (2014) (CLETA), Mostardeiro Neto (2011) (CCA) e Veiga (2011) (EAF), utilizados neste trabalho.

Tabela 6 – Características físico-químicas dos aglomerantes

Composição química	Porcentagem			
	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 ₆	<0.10	0.33	-	-
Carbono Grafitico	-	-	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# 0.075mm	0.82	-	-	-

Fonte: (HENGEN, 2014; MOSTARDEIRO NETO, 2011; VEIGA, 2011)

- Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método de Chapelle modificado – NBR 15855 (ABNT,2010)

O método de ensaio Chapelle modificado é uma metodologia laboratorial simples e rápida, que permite avaliar de forma expedita o potencial reativo de um material pozolânico. Esse método é baseado na fixação de CaO pelo material analisado. A atividade pozolânica é avaliada através da capacidade do material de fixar hidróxido de cálcio quando mantido em solução aquosa com óxido de cálcio.

Na tabela 7 são apresentados os resultados da determinação de atividade pozolânica (determinação única), de acordo com a norma NBR 15895 (ABNT, 2010).

Da análise dos resultados obtidos constata-se que os valores são superiores aos estabelecidos para se considerar um material como de baixa reatividade que é de 300 mg de CaO/g de material (RAVERDY et al., 1980).

Tabela 7 – Resultados dos ensaios Chappelle modificado realizados no IPT, com amostras de lodo de ETA calcinados a diferentes temperaturas.

Amostra	Atividade pozolânica (mgCa(OH) ₂ /g amostra)
600° C 1 hora	673
600° C 2 hora	666
700° C 1/2 hora	680
700° C 1 hora	643
700° C 2 hora	620

Fonte: (HENGEN,2014)

A permanência por maior tempo na temperatura de queima de 600° C, (5 horas de queima), resultou em pequena diminuição na atividade pozolânica. Contudo, na temperatura de queima de 700° C, por duas horas, a redução foi de quase 8,82%. Observou-se após a queima que o aumento no tempo de queima resultou numa aglomeração de partículas devido a um início de fusão.

A norma NBR 5752 (ABNT, 2014) determina que a reatividade pozolânica de um metacaulim não deve ser inferior a 700 mg Ca(OH)₂ / g de metacaulim. Dos resultados apresentados na tabela 14 observa-se que o lodo calcinado a temperatura de 700 °C por um período de meia hora praticamente atende essa exigência, embora a amostra de lodo calcinada a 600 °C por uma hora apresente valor próximo àquele obtido em maiores temperaturas (HENGEN,2014).

- Resistência a compressão axial

Amaral (2015) investigou a resistência à compressão de concretos com substituições por cinza de lodo de ETA nos teores de 5 a 30% e com adições contendo

cinza de casca de arroz (CCA) e escória de alto forno (EAF), sendo essas as mesmas utilizadas nesta pesquisa. Constatou que, em sua maioria, as misturas com adições mineiras apresentaram valores superiores de resistência à compressão axial em relação à mistura referência. As exceções são aos 7 dias, mistura 5% lodo (5L), (relação a/ag 0,35 e 0,50); 10 EAF e 5 CCA (relação a/ag 0,65); aos 28 dias, mistura 10 EAF, (todas as relações a/ag) e aos 91 dias na mistura 20% lodo (20L) (relação a/ag 0,65).

Amaral (2015) também apresentou os valores médios de resistência à compressão axial em função da relação a/ag para cada tipo de mistura, com 3 e 7 dias de cura, ensaiados aos 28 e 91 dias a partir da data de moldagem. Após, constatou que, em sua maioria, as misturas com adições mineiras apresentam valores superiores de resistência à compressão em relação à mistura referência.

Os maiores valores de resistência à compressão encontrados aos 28 dias foram nas misturas 5 EAF; 10%lodo) ; e 20% lodo, para três dias de cura e 25% lodo e 0,50; e 20 L, aos 7 dias de cura. Aos 91 dias de ensaios, os maiores valores foram identificados nos concretos 15% lodo; 10% lodo; e 20% lodo, todos com três dias de cura. Para a cura de 7 dias, os maiores valores encontrados foram em 25% lodo, 5 EAF e 20% lodo. Nos ensaios de cura úmida, os maiores valores foram aos 7 dias nas misturas 5 CCA, 5 EAF e 10 L. Aos 28 dias foram 5 CCA e 10%lodo. Aos 91 dias foram as misturas 5 EAF e 10% lodo.

4.2.2 Agregados

- Agregado miúdo: areia proveniente do Município de Santa Maria/RS, de composição natural, quartzosa, lavada antes da utilização para retirada de impurezas, seca em estufa e peneirada na peneira #6,3 mm. Após esses procedimentos, foi armazenada em cubas de alvenaria com tampa de madeira, até a data das moldagens.
- Agregado graúdo: pedra britada de rocha diabásica, proveniente do Município de Itaara/RS, submetida a peneiramento na peneira #19,0 mm e lavada na #6,3 mm para eliminar impurezas que pudessem influenciar nas propriedades do concreto. Após, o material foi seco à temperatura ambiente para remoção

de umidade antes de ser armazenado em cubas de alvenaria com tampa de madeira, para posterior utilização.

Na tabela 8 são apresentadas as características físicas dos agregados utilizados na pesquisa.

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

Fonte: (HENGEN, 2014)

4.2.3 Aditivos

Para a obtenção da consistência desejada nas misturas investigadas, 100 ± 10 mm, fez-se o uso de aditivo plastificante e do 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 e foi à base de policarboxilatos, com teor de cloretos $< 0,1\%$. 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.

4.2.4 Água

A água utilizada nas moldagens dos corpos de prova foi proveniente do reservatório da UFSM, alimentado por poços artesianos. A água, potável, abastece a maioria dos pontos de consumo na UFSM. 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.

4.2.5 Dosagem do concreto

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.

A previsão do comportamento de cada mistura dá-se 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, é preciso de, no mínimo, três pontos. Com isso, estabeleceram-se três relações a/ag , 0,35, 0,50 e 0,65, com proporções de aglomerante para agregados (m) determinados para cada relação a/ag , em massa, em função do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone, de acordo com a NM 67 (ABNT, 1998), em que se obtiveram, para as relações a/ag 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 9.

Tabela 9 – Consumo dos materiais por metro cúbico de concreto.

Mistura	Relação a/ag	Ag	Cim	CLETA	CCA	EAF	Areia	Brita	Água	Adit. Plast.	Adit. Superp.
		kg.m ⁻³									
REF	0.35	488	488	-	-	-	634	1077	171	1.46	-
	0.50	359	359	-	-	-	740	1057	180	-	-
	0.65	284	284	-	-	-	804	1045	185	-	-
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	-	-
25L	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	-

Fonte: Autora.

4.2.6 Moldagem e cura dos corpos de prova

No decorrer do processo de moldagem de cada mistura, para que não ocorressem variações na temperatura da massa de concreto e esta permanecesse constantemente independente da temperatura do ambiente, foi utilizada a fórmula de Mehta e Monteiro (1994), equação 1, que considera a massa e a temperatura de todos os elementos constituintes da mistura (aglomerantes, agregados e água):

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

Onde:

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

T_m= Temperatura dos agregados (°F);

T_c= Temperatura do aglomerante (°F);

T_a= Temperatura da água (°F);

M_m= Massa dos agregados (Kg);

M_c= Massa do aglomerante (Kg); e

M_a= Massa de água (Kg).

As temperaturas foram medidas com o uso de termômetro digital. Com a equação (1), foi possível encontrar a temperatura da água utilizada em cada mistura, em função da temperatura do ambiente e dos materiais. Como as moldagens ocorreram no inverno, houve necessidade de aquecimento da água de amassamento, de modo a se 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, quando receberam cobertura superficial a fim de evitar a perda de água por evaporação. A desmoldagem ocorreu após esse período e foi seguida da identificação e do encaminhamento de cada corpo de prova à câmara úmida.

Os corpos de prova destinados ao ensaio de retração foram curados em câmara úmida em períodos de 3 e 7 dias e, após, armazenados em sala climatizada para serem realizadas as leituras nas idades analisadas. Os destinados ao ensaio de

penetração de íons cloreto permaneceram na sala climatizada até completarem a idade de 91 dias para serem preparados para o ensaio.

4.3 ENSAIOS REALIZADOS

4.3.1 Retração total

O ensaio para a análise da retração total foi realizado de acordo com as normas da ASTM C157/C157M (2014) e ASTM C490/C490M (2011). A moldagem foi executada em fôrmas prismáticas de 100 mm x 100 mm x 285 mm, inserindo-se um pino com 22,5 mm de comprimento no centro de cada uma das duas bases do prisma, de modo que a distância entre os pinos, dentro do corpo de prova, fosse de 250 mm. (Figura 18).

Figura 18 – Fôrmas prismáticas onde foram realizadas as moldagens, com a inserção de pinos nas extremidades



Fonte: Foto do Acervo da autora (julho, 2015).

Foram moldados 8 corpos de prova para cada relação a/a_g (0,35; 0,50 e 0,65) e período de cura. Nos 4 corpos de prova destinados ao ensaio de retração, foram colocados pinos nas extremidades. (Figura 19).

Figura 19 – Fôrmas prismáticas moldadas com os corpos de prova



Fonte: Foto do Acervo da autora (julho, 2015).

Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e conservados em câmara úmida por 3 e 7 dias. Nessas idades, em 4 corpos de prova de cada relação ag/ag, foi realizada a primeira leitura de seus comprimentos (dia zero). Na sequência, os corpos de prova foram condicionados em sala climatizada (temperatura de $23^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$ e umidade relativa de $50 \pm 10\%$), de maneira a ficarem com todas as faces ventiladas para garantir uma uniformidade de circulação do ar em todas as suas extremidades. As idades de ensaio realizadas foram contadas a partir da leitura zero, ou seja, a partir da sua retirada da câmara úmida no período de cura desejado e, a partir deste momento, aos 7, 14, 21, 28, 35, 56, 91, 182 e 365 dias. (Figura 20).

Figura 20 – Corpos de prova desmoldados, identificados e conservados em sala climatizada



Fonte: Foto do Acervo da autora (julho, 2015).

O aparelho utilizado para esse ensaio foi o comparador de expansibilidade, com marcador digital de precisão de 0,001 mm (Figura 21). As leituras foram realizadas sempre no mesmo local para não haver interferência da superfície da base em que foi colocado o aparelho. Antes de qualquer leitura, o aparelho foi zerado e as amostras foram identificadas com o tipo de mistura, sua proporção, a relação a/ag e o período de cura, devendo a leitura ser realizada sempre com o Cp no mesmo posicionamento.

Figura 21 – Comparador de expansibilidade.



Fonte: Foto do Acervo da autora (julho, 2015).

4.3.2 Penetração de íons cloreto por imersão

O procedimento para este ensaio deu-se pela preparação de 4 corpos de prova, já em processo de retração, passados 91 dias após a cura úmida. Os corpos de prova foram fatiados com espessura de aproximadamente 5,3 cm de espessura, totalizando 15 corpos de provas (fatias), sendo 4 corpos de prova para cada período de ensaio (7, 14, 28, 56 e 91 dias).

Foram impermeabilizadas quatro das seis faces, com três demãos de verniz poliuretano, possibilitando, assim, que somente duas faces paralelas ficassem expostas à penetração de íons cloreto (Figura 22).

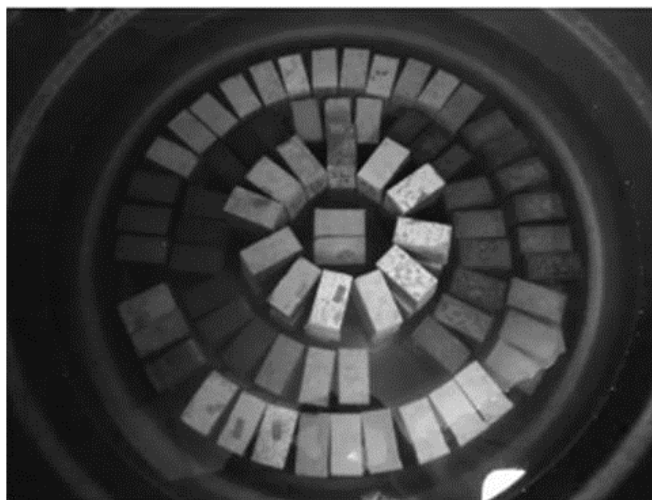
Figura 22 – Corpos de prova fatiados, preparados para imersão no tanque, com 4 faces impermeabilizadas com verniz



Fonte: Foto do Acervo da autora (julho, 2015).

Posteriormente à impermeabilização, os corpos de provas foram condicionadas em um reservatório com solução salina na proporção de 31,94 de NaCl para cada litro de água destilada (Figura 23).

Figura 23 – Corpos de prova fatiados, imersos no tanque



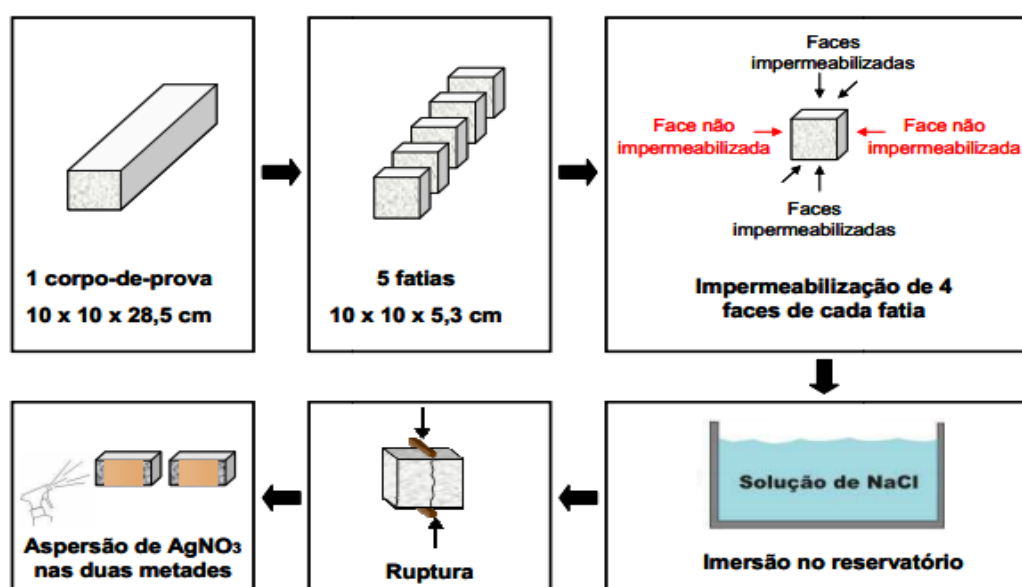
Fonte: Foto do Acervo da autora (julho, 2015).

Os períodos de submersão foram de 7, 14, 28, 56 e 91 dias. Em cada uma dessas idades, 3 corpos de prova foram retirados do reservatório, lavados com água

potável e rompido na prensa na direção de penetração de íons cloretos, ou seja, na face que não estava impermeabilizada. Após secos, foi aspergida a solução de nitrato de prata (17 g de AgNO_3 para cada litro de água deionizada) para verificar a profundidade de penetração dos íons de cloreto. Após a secagem da solução, foi realizado o registro fotográfico da amostra, a qual foi identificada pela sua composição e período de cura (Figura 24).

A demarcação da profundidade de penetração de íons cloreto foi realizada com o auxílio de programas computacionais.

Figura 24 – Demonstração do ensaio de penetração de íons Cloreto.



Fonte: (PAFIADACHE M., 2012)

De acordo com Otsukiet et al. (1992), a profundidade de penetração de íons cloreto é indicada por um limite de mudança de cor. A solução utilizada reage onde a concentração de cloretos livres é superior a 0,15% da massa de cimento e forma uma coloração branca. Onde não há cloretos livres, destaca-se uma coloração marrom do óxido de prata (AgO). As características das soluções de NaCl e AgNO_3 estão em conformidade com o método utilizado por Wee, Suryavanshi e Tin (2000) (Figura 25).

Figura 25 – Corpo de prova com penetração de íons cloreto.



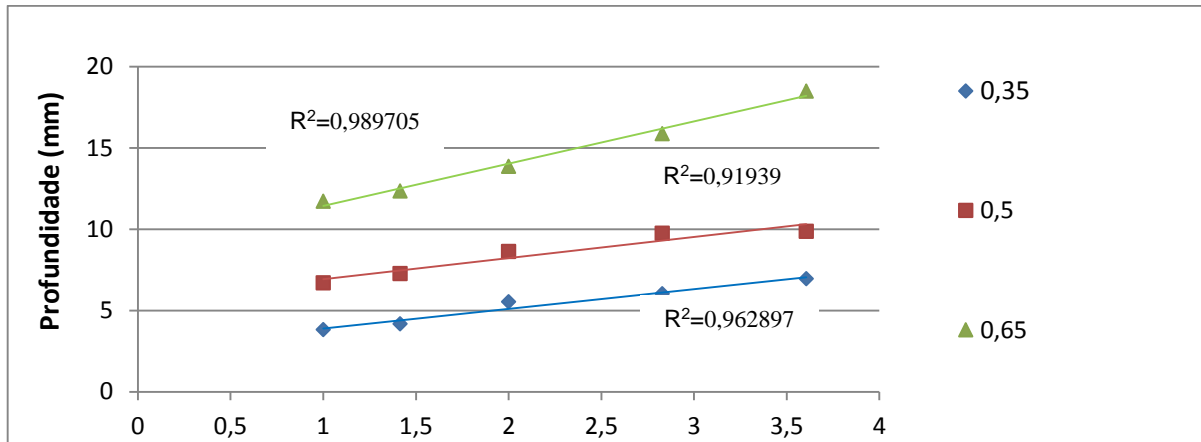
Fonte: Foto do Acervo da autora (julho, 2015).

A profundidade média de penetração foi determinada por meio de uma fotografia digitalizada, com o auxílio do programa computacional *AutoCAD*. Foram realizadas várias linhas de medida, espaçadas de 1 mm, na região onde houve a penetração de íons cloreto. Com o uso de uma rotina denominada *COTA* (DallaLana), nesse mesmo programa, mediu-se o comprimento de cada linha, que gerou automaticamente um arquivo para o programa Excel. Os valores discrepantes, com coeficiente de variação superior a 10% foram excluídos.

A análise dos resultados do ensaio de penetração de cloretos por imersão foi feita com base no coeficiente angular da equação de regressão linear, proposta por Bakker (1988) e empregada por Wee, Suryavanshi e Tin (2000), chamado coeficiente de penetração.

A partir dos gráficos (profundidade de penetração x _tempo) (Figura 26), foram obtidas equações de regressão (Equação 2) correspondentes às linhas retas de tendências traçadas entre os pontos obtidos (profundidades de penetração para cada uma das 5 idades) em cada mistura investigada. Das equações, foram obtidos os coeficientes de penetração (k) e, dos gráficos, seus coeficientes de determinação (R^2).

Figura 26 – Exemplo de gráfico para obtenção dos coeficientes k.



Fonte: (ANTOLINI, 2015)

$$y = a + k (\sqrt{\text{semana}}) \quad (2)$$

A adoção de uma constante “a” igual a zero gera maiores coeficientes de penetração e menores coeficientes de determinação, impossibilitando o melhor ajuste aos resultados obtidos no ensaio, conforme foi comprovado por Siqueira (2008). Em razão disso, nesta pesquisa, a constante “a” foi considerada diferente de zero, como propõem Wee, Suryavanshi e Tin (2000). Os autores comentam que a magnitude dessa constante se caracteriza mais como um artefato para o ajuste da curva do que um indicador das propriedades das misturas. Para diferenciar a simbologia, neste método ($a \neq 0$) o coeficiente de penetração foi denominado k' .

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo discute a análise dos resultados das misturas testadas nos ensaios de retração total e penetração de cloretos por imersão.

São discutidas as alterações das propriedades estudadas frente à variação do tipo de adição, do percentual de substituição, da relação água/aglomerante (*a/ag*), do tempo de cura e da idade dos corpos de prova.

5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE RETRAÇÃO TOTAL

Os resultados do ensaio de retração total são representados nas Figuras 27 e 28, nas quais são apresentadas as micro deformações (10^{-6} mm/mm) dos corpos de prova das misturas em cada uma das idades avaliadas para os dois períodos de cura (3 e 7 dias).

A análise dos resultados foi realizada com base nos valores obtidos nas leituras de retração da última idade avaliada até então, 365 dias, conforme tabela 10. Nessa tabela, observam-se valores típicos de concretos em idades avançadas, entre 200 e 800×10^{-6} mm/mm, inseridos na faixa de valores citados por Zia et al. (1997, apud ACI COMMITTEE 209, 2005).

Tabela 10 – Retração final das misturas

Cura	<i>a/ag</i>	Retração (10^{-6} mm/mm), aos 365 dias para cada mistura									
		REF	5L	10L	15L	20L	25L	30L	5CCA	5EAF	10EAF
3 dias	0.35	640	608	640	650	660	680	717	612	720	730
	0.50	512	556	648	758	760	780	792	680	672	760
	0.65	664	680	740	786	792	796	798	760	765	770
7 dias	0.35	520	592	608	638	644	653	688	610	648	728
	0.50	504	540	625	732	742	749	784	665	660	740
	0.65	620	654	728	740	756	787	770	735	720	755

Fonte: Autora.

Figura 27 – Retração total das misturas com 3 dias de cura para as diferentes relações a/g/l, misturas com teores de 0 a 30% lodo.

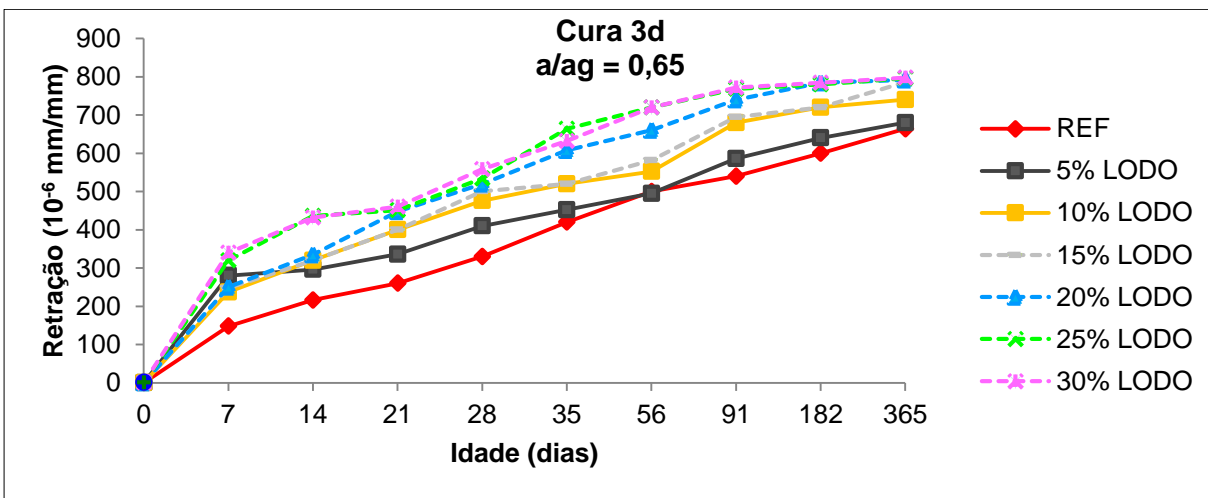
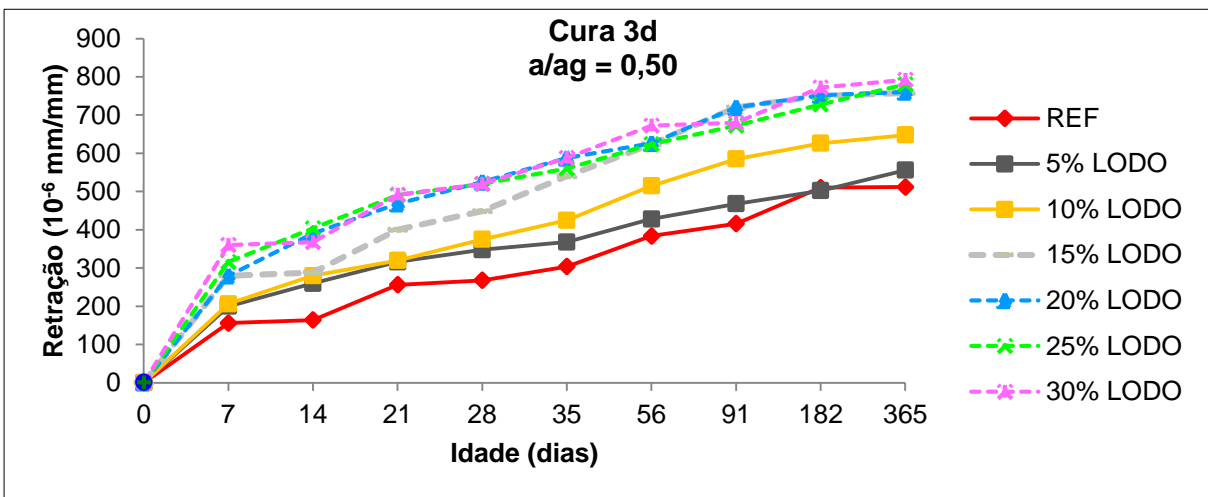
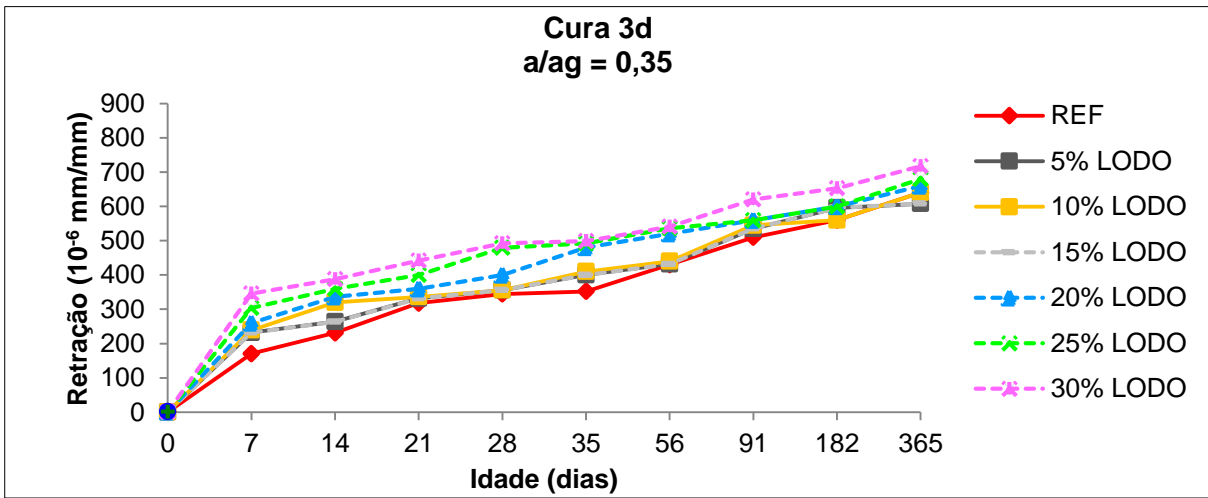
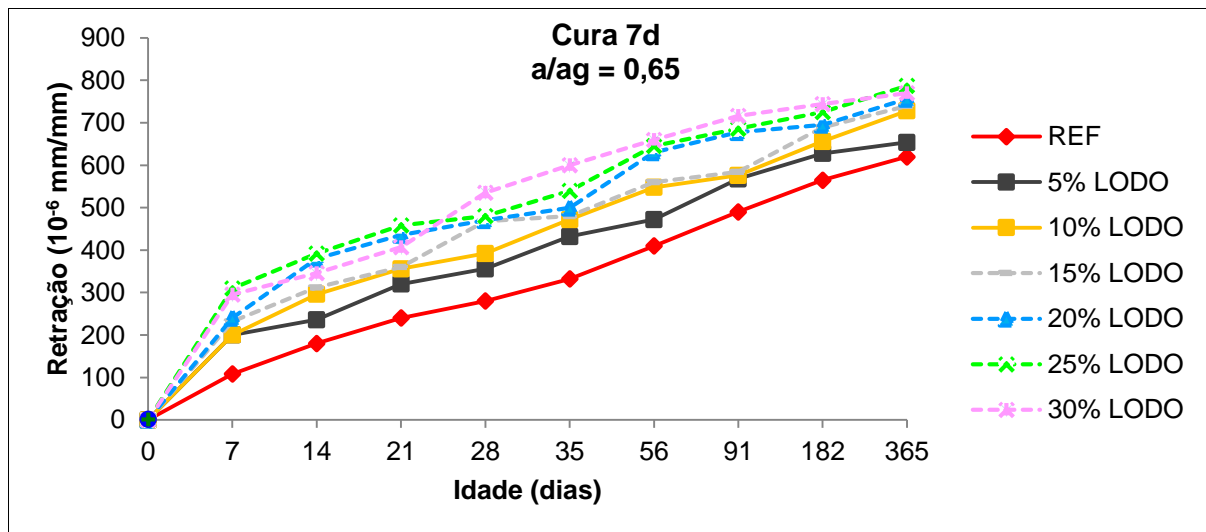
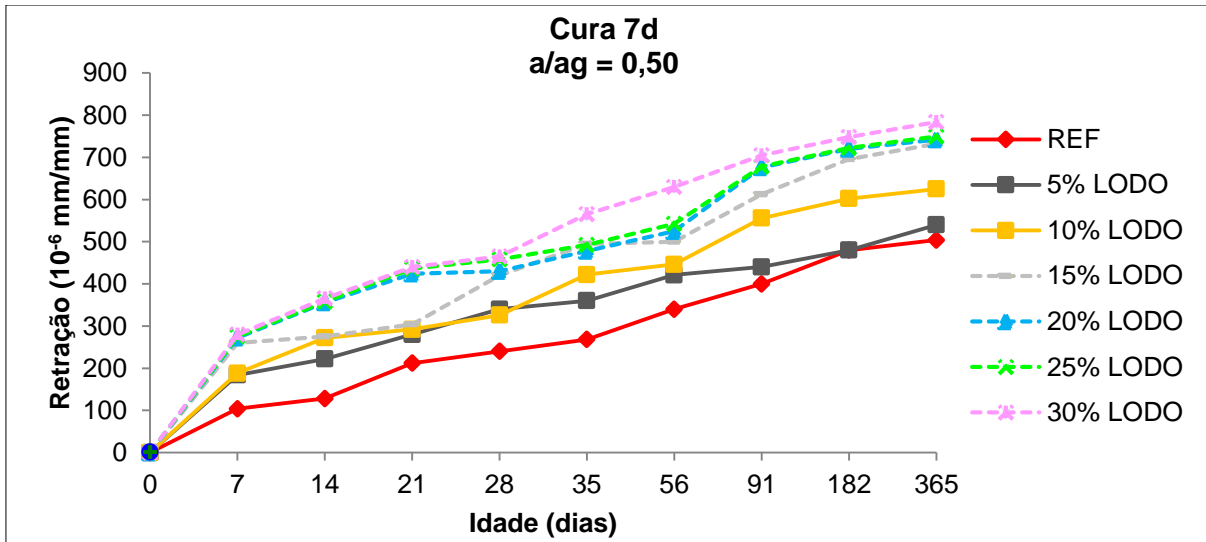
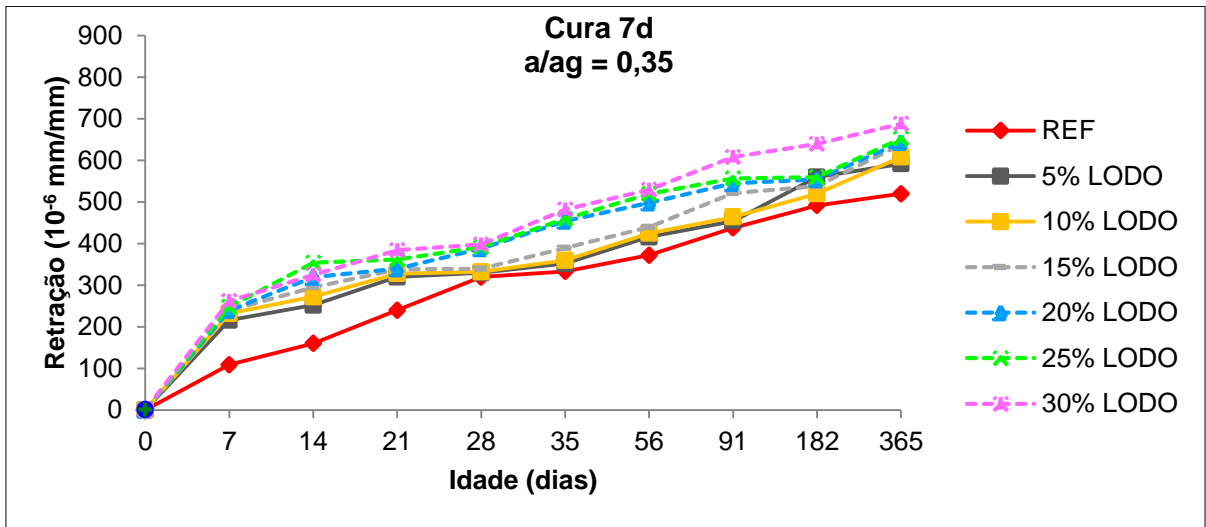


Figura 28 – Retração total das misturas com 7 dias de cura para as diferentes relações a/gl, misturas com teores de 0 a 30% lodo.



Fonte: Autora.

Em todas as misturas investigadas, a que apresentou menor valor de retração foi a de referência, em todas as idades de ensaio e nos dois períodos de cura. Seguido desta, em ordem crescente de retração vem 5L, 10L, 15L, que teve na maioria das misturas um comportamento similar a de 10L, seguido das misturas 20L, 25L e 30L.

Da análise das figuras 27 e 28 é possível observar que a retração total se caracteriza por uma evolução acentuada até os 91 dias, quando atinge, em média, para as três relações água/aglomerante e os dois prazos de cura adotados, 3 e 7 dias, aproximadamente 84% e 88% do valor final observado aos 365 dias, respectivamente. Entre 91 dias até 365 dias, tem-se uma diferença de 274 dias e os aumentos médios nos valores de retração são de 16% e 12%. Mesmo aos 28 dias os valores de retração total, em média, para as 3 relações a/agl, são de 62% e 57% em relação ao prazo de cura, do valor observado aos 365 dias.

5.2.1 Comparação entre os diferentes teores de substituição de CLETA e prazo de cura

O aumento no teor de substituição de cimento por cinza de lodo de ETA resultou em aumento nos valores de retração para as três relações a/agl, 0,35, 0,50 e 0,65, que foram de 12%, 40% e 17% respectivamente, para cura de 3 dias e de 16%, 45% e 18% para o prazo de cura de 7 dias.

O aumento no prazo de cura de 3 para 7 dias resultou, em média, para os teores de substituição de CLETA variando de 5% a 30%, com **aumento médio** nos valores de retração de 3,4%, 3% e 3,5% respectivamente para as relações a/agl 0,35, 0,50 e 0,65.

5.2.2 Comportamento das misturas ternárias

Nas figuras 29 e 30 são apresentados os valores de retração das misturas ternárias compostas com 5% de cinza de casca de arroz e 20% de cinza de lodo, denominada 5CCA, e a mistura composta com 5% de escória de alto forno e 20% de cinza de lodo, denominada 5EAF, e àquela com mesmo teor total de substituição de 25% de cinza de lodo de ETA. Da análise destas figuras, constata-se que a mistura composta com 25% de cinza de lodo foi a que apresentou os maiores valores de retração, em relação a referência e as misturas ternárias, no geral, comportamento semelhante.

Da mesma forma as figuras 31 e 32 apresentam os valores de retração das misturas ternárias contendo 20% de cinza de lodo de ETA e 10% de EAF totalizando 30% de substituição e a mistura binária composta com 30% de cinza de lodo.

Figura 29 – Retração total das misturas ternárias contendo 20% L e 5%CCA ou 5%EAF - cura 3 d.

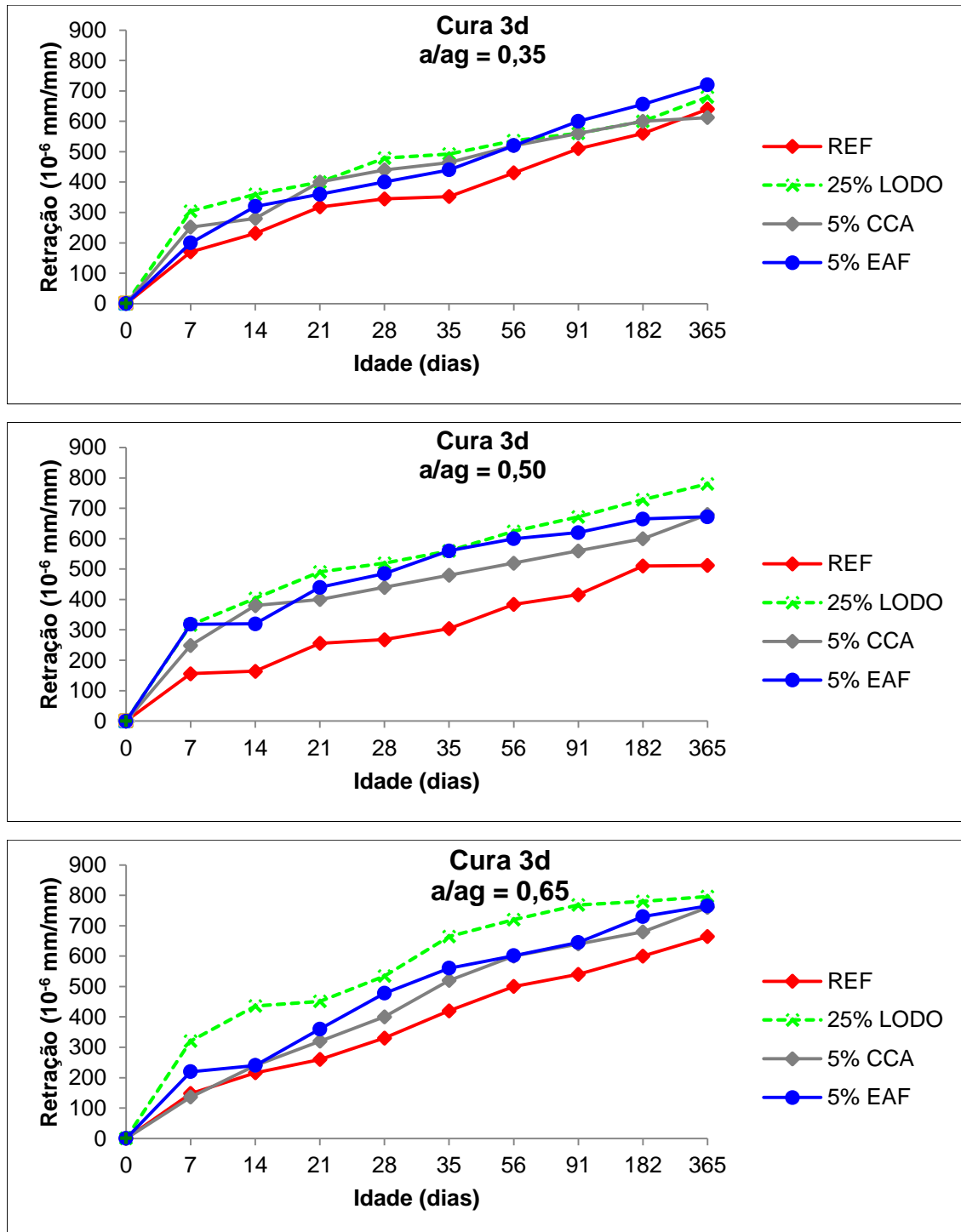


Figura 30 – Retração total das misturas ternárias contendo 20% L e 5%CCA ou 5%EAF - cura 7d.

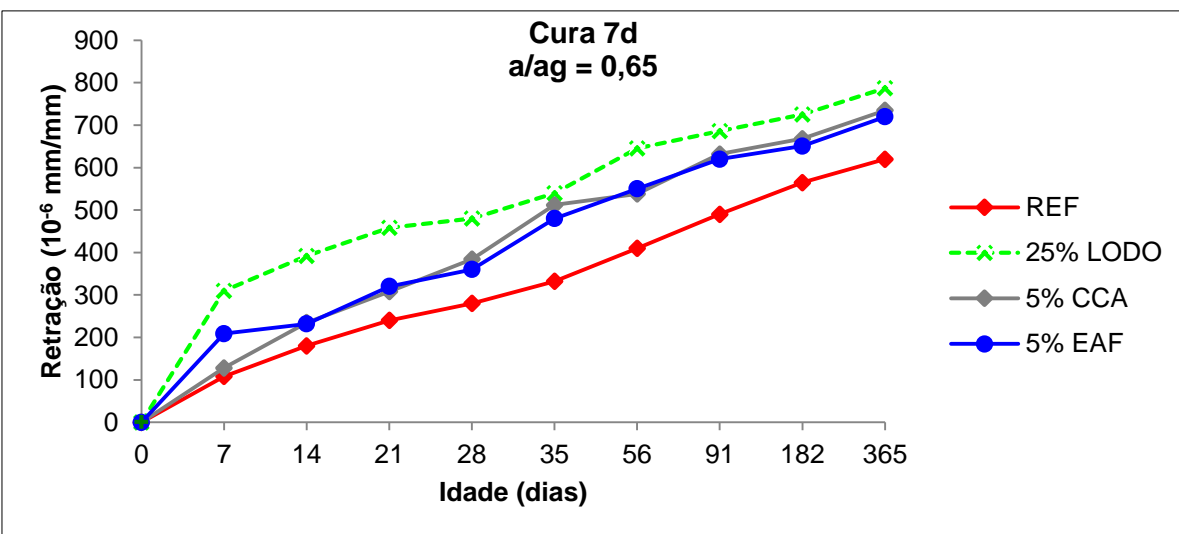
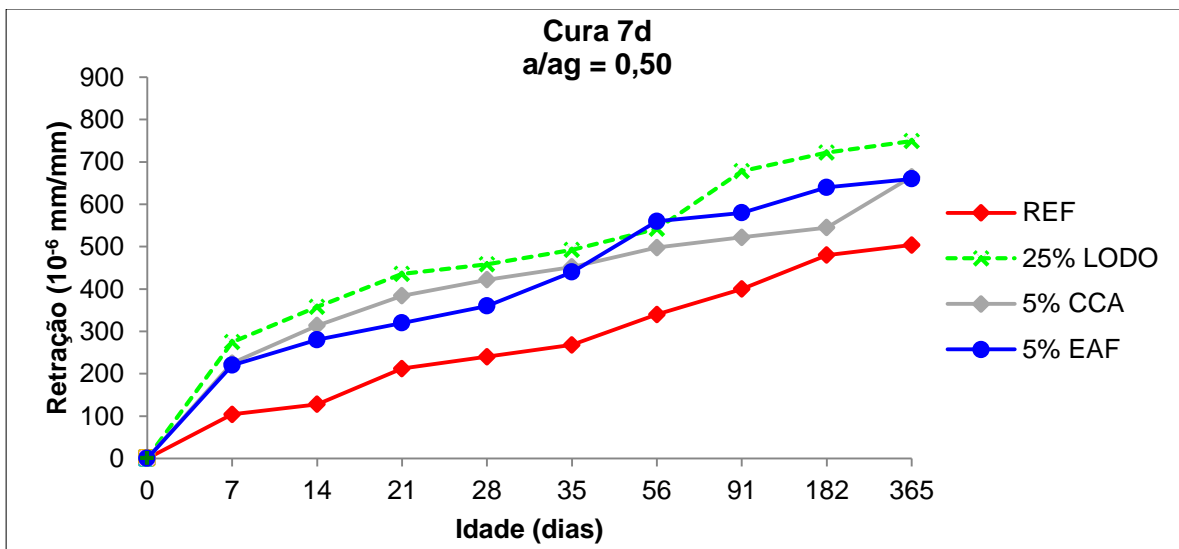
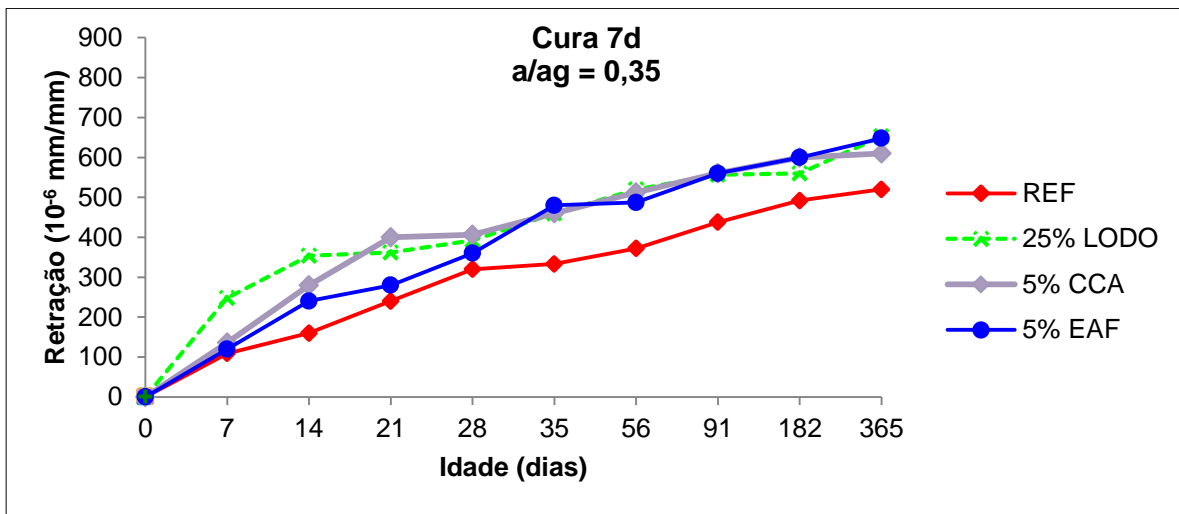
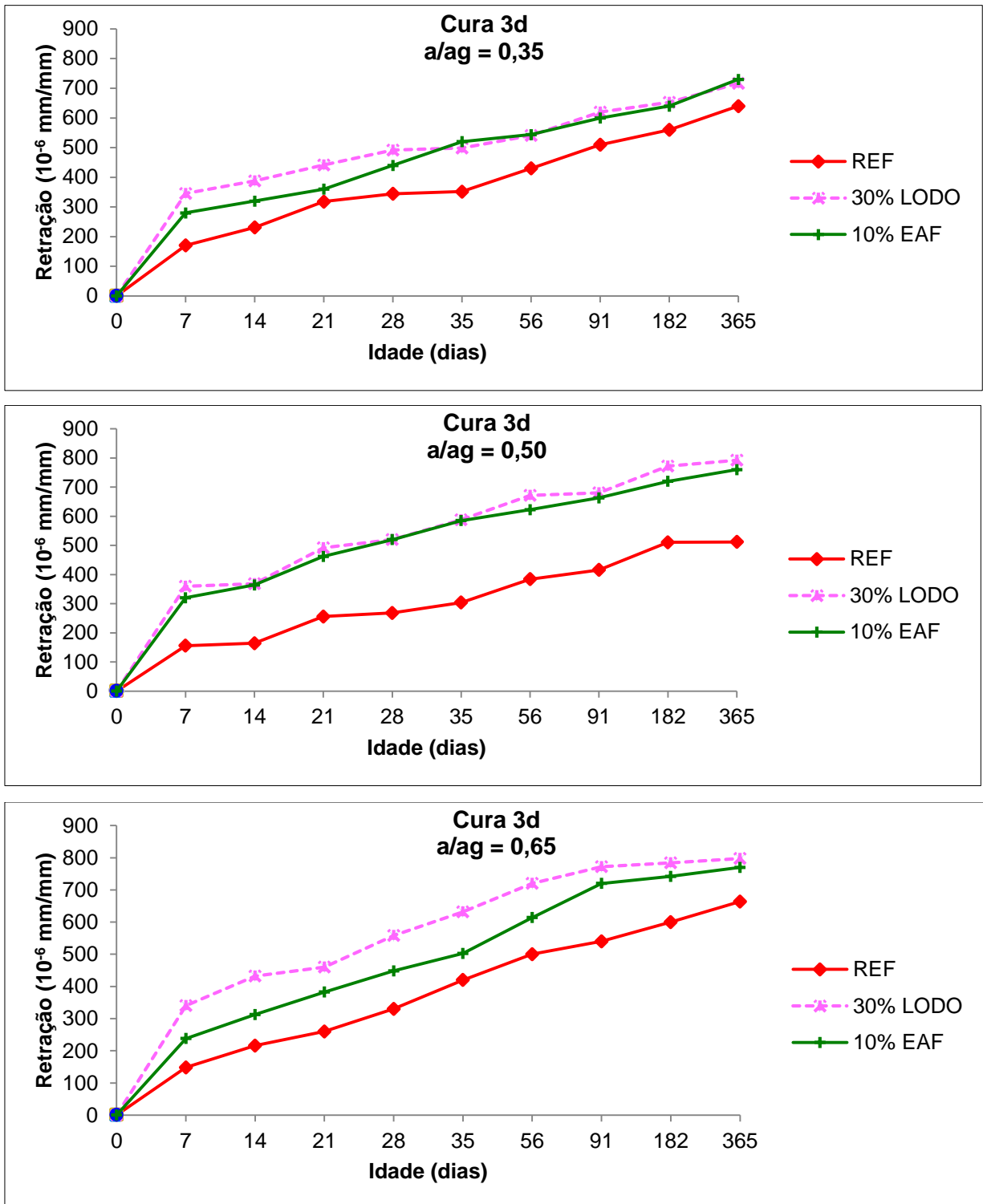
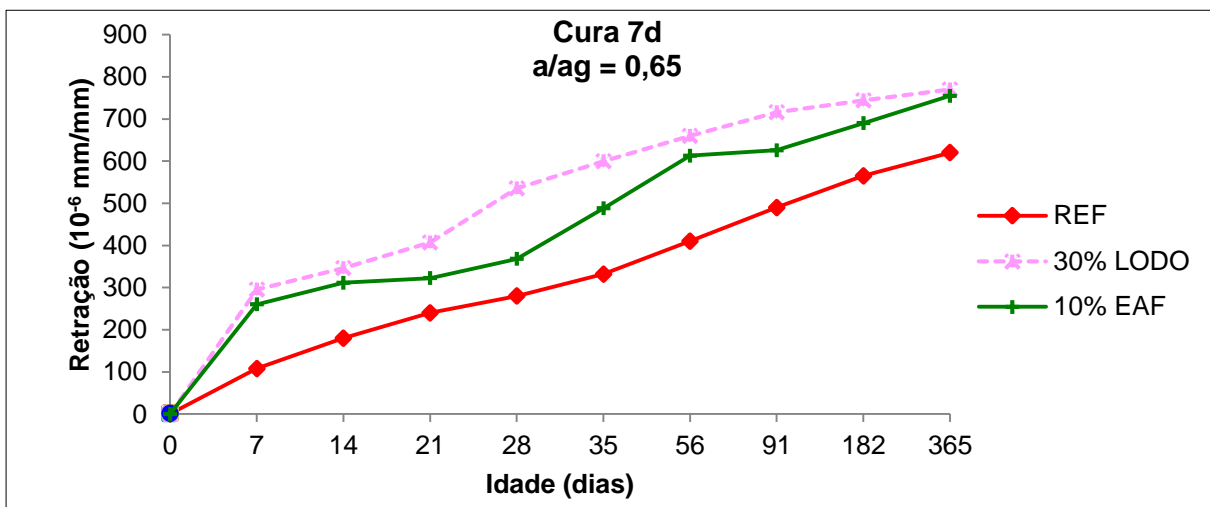
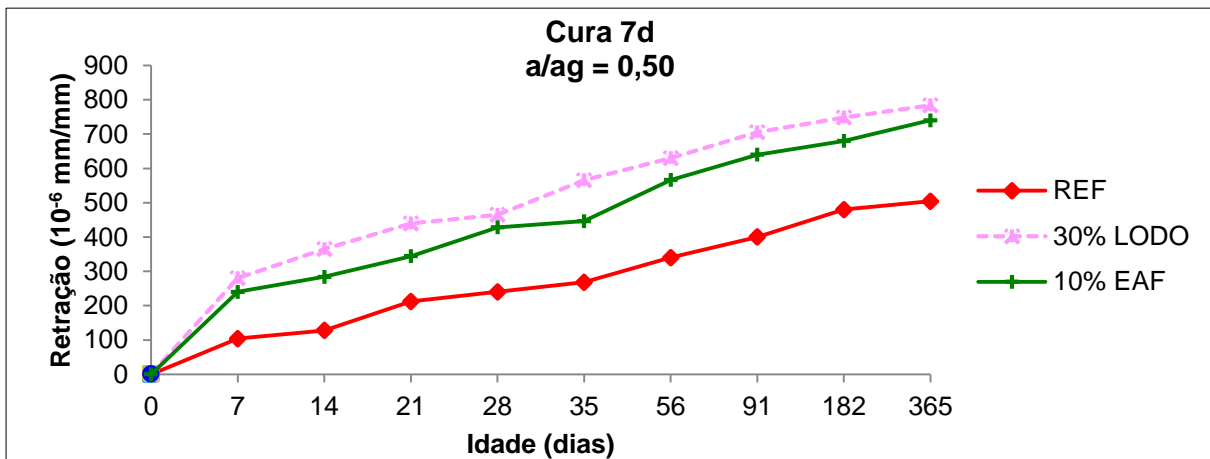
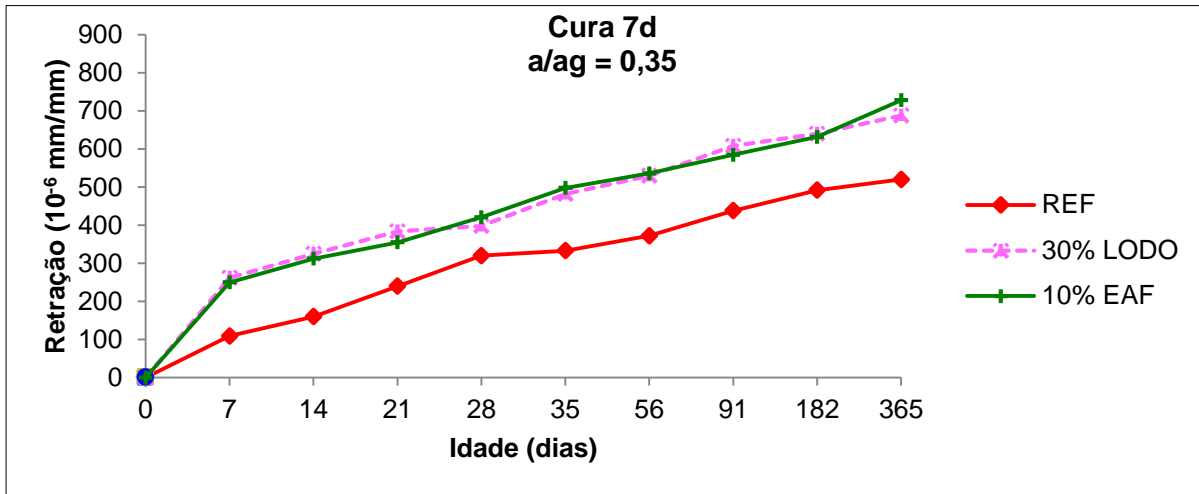


Figura 31 – Retração total das misturas com 3 dias de cura para as diferentes relações a/gl. Comparação do REF com as misturas de teores 30 %.



Fonte: Autora.

Figura 32 – Retração total das misturas com 7 dias de cura para as diferentes relações a/ag. Comparação do REF com as misturas de teores 30 %.



Fonte: Autora.

Constata-se que independente do prazo de cura a mistura ternária e a binária, no geral, apresentaram comportamento semelhante.

5.2.3 Discussão dos resultados

É importante salientar que não se encontram na literatura trabalhos publicados com misturas realizadas com CLETA, dificultando a comparação desta com ensaios realizados com esse tipo de material.

Para melhor entendimento dos resultados, é importante enfatizar que as diferentes relações a/ag possuem teores de material aglomerante diversos, pois quanto menor a relação a/ag, maior o consumo de material aglomerante, possibilitando uma mesma consistência para todas as misturas, sendo abatimento no valor de 100 ± 10 mm. Portanto, justificam-se alguns casos nos quais não foi constatada diferença expressiva de retração entre as diferentes relações a/ag em uma mesma mistura.

Sivasundaram e Malhotra (1992) também constataram esse comportamento. Os autores observaram os menores valores de retração nos concretos com a maior relação a/agl investigada, de modo que tal comportamento foi justificado pelos baixos teores de material aglomerante nesses concretos.

Young (1988, apud COLLINS E SANJAYAN, 2000), relata que a retração, em condições usuais, depende da perda de água dos mesoporos e, assim, nem sempre o concreto que apresenta maior quantidade de água evaporável é o que retrai mais.

Kalintzis e Kuperman (2001) investigaram a retração hidráulica em concretos com 6% de sílica ativa em substituição ao cimento e com relações a/ag de 0,29; 0,37; 0,52 e 0,76. Dos resultados obtidos, constataram que os valores de retração são próximos, para todas as relações a/ag estudadas, especialmente até os 40 dias sob secagem. De acordo com os autores, não foi possível estabelecer uma relação entre a retração e a relação a/ag. Os ensaios confirmaram que, em concretos com mesma consistência, a quantidade de água por m^3 de concreto é determinante na retração hidráulica independentemente da relação a/ag, diferentemente do que foi constatado nesta pesquisa onde em todos os traços que tiveram aumento na quantidade total de a/c nas proporções de 0,35;0,50 e 0,65 houve também aumento na retração.

A retração verificada para a cura de 3 dias é creditada à maior quantidade de água evaporável presente, uma vez que apresenta menor grau de hidratação, com

menos água combinada quimicamente. De acordo com Neville (1997), o esvaziamento dos capilares causa uma perda de água sem retração, porém, uma vez removida a água capilar, passa a ocorrer a remoção da água adsorvida.

Da Silva (2012) evidenciou em seu estudo com CCA clara e escura um menor valor de retração no período de cura de 7 dias em relação ao período de cura de 3 dias e também verificou que, com o aumento dos teores de substituição da cinza, aumentaram os valores de retração. Contudo, estes se mantiveram abaixo dos valores do concreto REF, demonstrando o benefício do uso desta adição mineral em relação ao fenômeno da retração.

Dellinghausen (2009) estudou a retração total em concretos com cimento Portland branco e escória de alto forno. Na sua pesquisa, foram obtidos maiores valores de retração total nos concretos moldados com cimento Portland branco quando comparado ao cinza, inclusive nas misturas compostas com escória, em igualdade de cura e relação a/ag. De maneira geral, independentemente do cimento empregado, embora tenham sido observados valores de retração pouco maiores para a cura de 3 dias, não foi constatada variação expressiva entre os prazos de cura, caracterizando, assim, comportamentos similares. Essas constatações reforçam a teoria da tensão capilar, a qual se processa durante a exposição ao ar, ocasionando ou não retração, o que depende da distribuição dos tamanhos dos poros e também da quantidade de água evaporável, de acordo com o evidenciado por Wittmann (1982, apud COLLINS E SANJAYAN, 2000) e Young (1988, apud COLLINS E SANJAYAN, 2000), mostrando com isso a forte influência da distribuição dos tamanhos dos poros na retração hidráulica do concreto. Esta, por sua vez, é influenciada pelo grau de hidratação do material aglomerante. Obteve-se uma diminuição nos valores de retração para os diferentes teores de substituição, em média, de 3,4%, 3% e 3,5% respectivamente para as relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65.

Mermerdas et al. (2013) investigaram a retração total de concretos compostos com metacaulim e caulins calcinados de diferentes formações geológicas apresentando diferentes composições químicas e propriedades físicas. Os corpos de prova foram curados por 24h e, na sequência, expostos ao ar à temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $50\pm 5\%$ por aproximadamente 60 dias. A relação a/ag

adotada foi de 0,4 e a dos teores de substituição foi de 5 e 15% em massa do cimento. O concreto que apresentou maior retração foi o de referência (100% cimento Portland) e o de menor retração foi àquele composto com metacaulim nos dois teores de substituição. As demais misturas apresentaram comportamentos que variaram entre esses dois concretos, o de referência e o composto com metacaulim. O aumento no teor de substituição resultou em melhor desempenho, especialmente para aquele composto com metacaulim.

Jiang et al. (2015) investigaram as propriedades mecânicas, a estrutura de poros e o calor de hidratação de argamassas com metacaulim em teores de 0%, 6%, 10% e 14% com baixa relação a/ag. Observaram, com relação à resistência à compressão, que as misturas investigadas apresentaram a seguinte ordem de comportamento: $M14 > M0 > M10 > M6$. No entanto, com relação ao calor de hidratação, essas mesmas misturas apresentaram a seguinte ordenação: $M6 > M0 > M10 > M14$. A redução do calor com aumento do teor de metacaulim é justificada pelos autores devido à deficiência de CH liberado pelo cimento para reagir com o metacaulim, embora este acelere a reação de hidratação da fase cimento, o que justifica o maior calor de hidratação para o menor teor de substituição. Assim, em teores mais baixos há maior tendência à fissuração e à retração hidráulica. Materiais cimentícios com alta pozolanicidade, tal como o metacaulim e a sílica ativa, reagem com o hidróxido de cálcio e aumentam a taxa de hidratação, que contribui para o efeito exotérmico da reação pozolânica (SONEBI et al., 2013). O aumento na taxa de hidratação aumentada tem repercussão sobre a durabilidade do concreto, principalmente devido à retração e à formação de microfissuras. Hengen (2014), constatou para os mesmos teores de substituição (5%, 10%, 20% e 30%), que os concretos confeccionados com cinza de lodo de ETA apresentaram valores de resistência à compressão semelhantes àqueles compostos com cinza de casca de arroz com baixo teor de carbono grafítico ou sílica ativa.

Frias et al. (2000) relatava que existe uma boa evidência de que as pozolanas que reagem com o CH contribuem para a evolução inicial de calor pelo fato de acelerarem a hidratação do cimento e por reagirem rapidamente com o hidróxido de cálcio liberado pelo cimento.

Sabe-se que, em muitos casos, concretos contendo materiais pozolânicos apresentam valores de porosidade total igual ou superiores àqueles de concretos compostos com 100% de cimento Portland. Massazza e Oberti (1991) relatam que é bem conhecido que o **fator crítico** que afeta a durabilidade das estruturas de concreto é a distribuição de tamanho de poros e não a porosidade total.

Amaral (2015) observou aumento nos valores de resistividade elétrica aparente com o aumento no teor de substituição do cimento por cinza de lodo de ETA. Sabe-se que a resistividade elétrica é influenciada pela composição química e pelo teor de cimento, bem como pela relação a/ag e pela presença de adições minerais, ativadores químicos e aditivos (HUNKELER, 1996; WHITING & NAGI, 2003). É dependente não só da composição química da solução dos poros como da estrutura da pasta, como evidenciado por Gastaldini et al. (2010), em concretos com cinza de casca de arroz, e por Lübeck et al. (2012), em concretos com escória de alto forno.

Dessa forma, o aumento na retração devido ao aumento no teor de substituição de cimento por cinza de lodo de ETA poderia ser creditado à *alteração na estrutura de poros*, com formação de maior quantidade de mesoporos, de modo que parte da água que ainda não reagiu quimicamente, presente nesses poros, tende a aumentar a tensão capilar ao abandoná-los em função da exposição ao ar, ocasionando retração do elemento e confirmando, assim, de acordo com o evidenciado por Wittmann (1982, apud COLLINS E SANJAYAN, 2000) e Young (1988, apud COLLINS E SANJAYAN, 2000), a forte influência da distribuição dos tamanhos dos poros na retração hidráulica do concreto.

5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO POR IMERSÃO

A análise do desempenho das misturas investigadas frente à penetração de íons cloreto durante o ensaio de imersão foi realizada segundo procedimento proposto por Wee et al. (2000) exposto na metodologia.

As medidas que transformaram a microestrutura do concreto (como diferenças na relação a/ag e no tempo de cura, tenderam a alterar a inclinação das equações de

linearização (índices k), mostrando alteração no seu desempenho frente à penetração de cloretos. Dessa forma, a análise comparativa de ganho ou perda de resistência à penetração de cloretos foi realizada sobre a variação desses índices.

5.3.1 Misturas compostas em relação ao concreto de referência

A partir da análise da tabela 11, verifica-se que as misturas compostas com 5% e 10% de cinza de lodo de ETA apresentaram valores de penetração de cloretos, nos dois prazos de cura adotados, inferiores ao concreto de referência em todas as relações a/agl . A partir de 10%, constata-se aumento na penetração de cloretos em relação ao concreto de referência para a menor relação a/agl (0,35), contudo, nas demais relações a/ag , embora os valores de penetração sejam inferiores ao concreto de referência, há aumento na penetração de cloretos na medida em que se aumenta o teor de substituição. Isso pode ser explicado pelo fato de os corpos-de-prova, da presente pesquisa, terem sido expostos à secagem ao ar durante 91 dias antes de serem colocados na solução salina. Dessa forma, eles apresentaram uma retração considerável, a qual lhes proporcionou faces mais porosas e suscetíveis à penetração dos íons cloretos, sobrepujando, conforme o teor de substituição, uma provável alteração na estrutura de poros proporcionada pelas adições minerais. Como visto no item anterior, o aumento no teor de substituição resultou em aumento na retração total, portanto, facilitando a penetração de íons cloreto.

As misturas ternárias com teor de substituição de 25%, 5EAF e 5CCA, apresentaram, no geral, valores de índice K inferiores ao concreto de referência. Quando comparada à mistura de referência essas misturas apresentaram reduções, em média, no índice K , de 29% para os dois prazos de cura para a mistura 5EAF e de 22% e 17% para os prazos de cura de 3 e 7 dias respectivamente para a mistura 5CCA, evidenciando a influência benéfica dessas duas adições na penetração de cloretos.

Tabela 11 – Coeficiente de penetração k das misturas investigadas em cada período de cura.

Análise do resultados - Coeficiente de penetração k (mm/ $\sqrt{\text{semana}}$)			
Mistura	Relação a/ag	Cura	
		3 DIAS	7 DIAS
REF	0,35	1,95	1,42
	0,50	2,81	2,27
	0,65	3,33	3,19
5L	0,35	1,33	1,04
	0,50	1,62	1,48
	0,65	2,44	2,07
10L	0,35	1,51	1,18
	0,50	1,68	1,52
	0,65	2,60	2,15
15L	0,35	2,21	1,90
	0,50	2,28	1,98
	0,65	2,93	2,17
20L	0,35	2,26	2,04
	0,50	2,35	2,06
	0,65	2,98	2,26
25L	0,35	2,48	2,30
	0,50	2,59	2,45
	0,65	3,04	2,68
30L	0,35	2,65	2,37
	0,50	2,70	2,50
	0,65	3,32	3,17
5% EAF	0,35	1,65	1,05
	0,5	1,77	1,67
	0,65	2,18	2,11
10% EAF	0,35	1,76	1,69
	0,5	2,09	1,90
	0,65	2,71	2,21
5% CCA	0,35	1,74	1,44
	0,5	1,76	1,65
	0,65	2,71	2,42

Fonte: Autora.

Quando comparadas à mistura composta com 25% de cinza de lodo (mesmo teor de adição mineral) apresentaram reduções no índice K, em média, de 31% e 29% para a mistura 5EAF e de 24% e 27%, mistura 5CCA, para os prazos de cura de 3 e 7 dias respectivamente, evidenciando a influência benéfica dessas duas adições na penetração de cloretos.

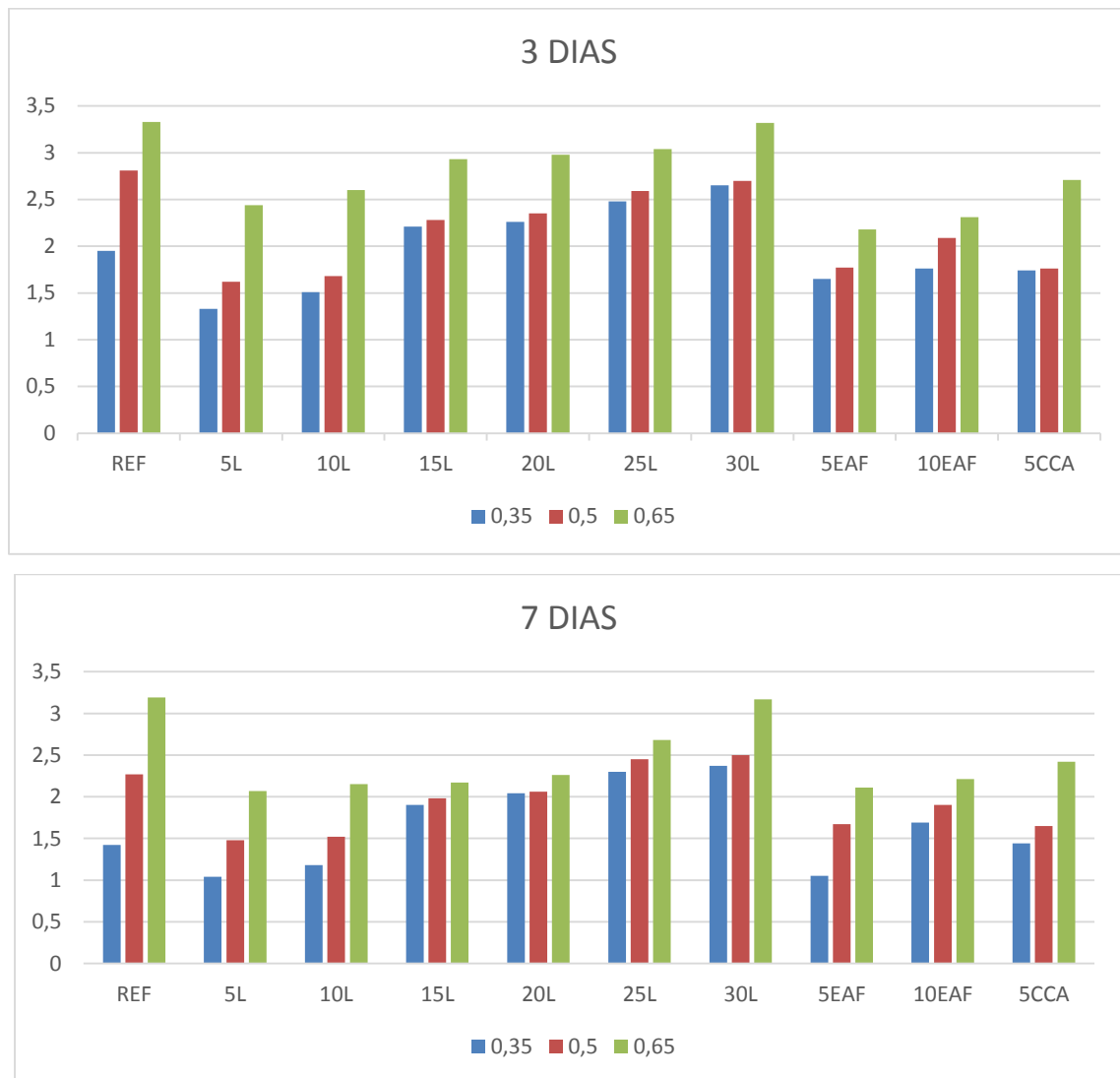
Sabe-se que o comportamento frente à penetração de cloretos de um determinado concreto, entre outros fatores, é influenciado tanto pelas alterações na sua microestrutura quanto pela quantidade de aluminatos do aglomerante, resultantes da substituição do cimento pelas adições minerais, sendo sua capacidade final de resistir à penetração de íons uma combinação desses dois fatores. A inclusão de adições minerais com baixo teor de alumina, como a cinza de casca de arroz, reduziria a capacidade de fixação dos cloretos do concreto e, por conseguinte, a resistência à penetração de íons. Comportamento contrário ocorre com a escória. No entanto, o bom desempenho da mistura ternária com CCA é creditado à modificação na estrutura de poros proporcionada por essa adição.

A mistura ternária composta com 10% EAF e 20% de cinza de lodo, designada 10 EAF, quando comparada a mistura de referência apresentou redução média na penetração de cloretos de 18% e 17% para os 3 e 7 dias de cura investigados, respectivamente. Essa mistura quando comparada àquela de mesmo teor de substituição, 30% cinza de lodo, apresentou reduções na penetração de cloretos, em média, para as três relações a/ag de 25% e 28% respectivamente, para os prazos de cura de 3 e 7 dias.

Dessa forma, verifica-se que o coeficiente de penetração nas misturas investigadas é tanto maior quanto maior for a quantidade de água na mistura. No entanto, o desempenho das misturas com cinza de lodo de ETA, em relação ao concreto de referência, depende da relação a/agl e do teor de substituição.

A Figura 33 ilustra a influência do coeficiente de penetração dos íons cloretos de acordo com a relação a/agl das misturas investigadas. Esse comportamento está de acordo com o relatado por Ngala et al (1995) que afirmam que a relação a/agl é o principal parâmetro que influencia na penetração de íons cloretos no concreto, em função do refinamento da porosidade capilar que se obtém nas baixas relações a/agl.

Figura 33 – Coeficientes de penetração de cloretos de acordo com a relação e prazo de cura úmida – 3 e 7 dias



Fonte: Autora.

Na tabela 12 são apresentados os índices de penetração de íons cloretos em relação ao concreto de referência nos períodos de cura avaliados. Confrontando as misturas com adição mineral e a de referência, observa-se que o maior acréscimo foi para mistura composta com 30% de cinza de lodo de ETA na relação a/agl 0,35 com prazo de cura de 7 dias. A mistura que teve a maior redução em relação à mistura de referência foi àquela composta com 5% de cinza de lodo de ETA na relação a/agl 0,50 e prazo de cura de 3 dias.

Tabela 12 – Índices de penetração de íons cloretos das misturas em relação ao concreto de referência com cura de 3 e 7 dias.

Mistura	Relação a/agl	Índice de penetração (%) Cura	
		3 DIAS	7 DIAS
REF	0,35	100	100
	0,50	100	100
	0,65	100	100
5L	0,35	68	73
	0,50	58	65
	0,65	73	65
10L	0,35	77	83
	0,50	60	67
	0,65	78	67
15L	0,35	113	134
	0,50	81	87
	0,65	88	68
20L	0,35	116	144
	0,50	84	91
	0,65	89	71
25L	0,35	127	162
	0,50	92	108
	0,65	91	84
30L	0,35	136	167
	0,50	96	110
	0,65	100	99
5% EAF	0,35	84	74
	0,5	63	74
	0,65	65	66
10% EAF	0,35	90	119
	0,5	74	84
	0,65	81	69
5% CCA	0,35	89	101
	0,5	62	73
	0,65	81	76

Fonte: Autora.

Saciloto (2005) investigou a penetração de cloretos em concretos compostos com 10%, 20% e 30% de CCA e comparou com o concreto de referência e àqueles compostos com 35% de cinza volante e 50% de escória de alto forno. Esses concretos foram submetidos a prazos de cura de 3, 7 e 28 dias. O autor constatou que a resistência à penetração é inversamente proporcional à relação a/ag e ao período de cura do concreto. Existe uma grande amplitude no valor de k entre as diferentes misturas estudadas. A mistura 10CCA ($a/ag = 0,35$; cura de 28 dias) apresentou o menor coeficiente de difusão, $1,12\text{mm}/(\text{semana})^{1/2}$ e a mistura 35CV ($a/ag = 0,65$; cura de 28 dias) o maior valor, k igual a $6,19\text{mm}/(\text{semana})^{1/2}$. Entre as misturas curadas por 3 e 7 dias, aquelas com EAF foram as que tiveram o melhor desempenho; com exceção das misturas 10CCA ($a/ag = 0,50$) e 20CCA ($a/ag = 0,35$ e $0,65$), ambas com cura de 3 dias, todas as demais apresentaram coeficientes de difusão inferiores aos dos concretos de referência. Na mistura 10CCA ($a/ag = 0,35$ e cura de 28 dias) o valor do k foi cerca de 42% inferior ao da mistura REF; o aumento no percentual de CCA na mistura teve clara tendência apenas para o período de cura úmida de 28 dias, onde o coeficiente de difusão de cloretos aumentou na razão direta do teor de substituição. Este comportamento pode estar relacionado à redução no teor de aluminatos do aglomerante.

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.

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%.

Segundo Wee et al. (2000) o coeficiente de penetração (k) depende, principalmente, da microestrutura e das alterações que nela ocorrem (como a fixação de íons cloreto) que restringem ou dificultam a mobilidade dos íons cloreto através da rede de poros. Em seus experimentos observaram que o prolongamento do período

de cura aumentou a resistência à compressão e reduziu o coeficiente de difusão de cloretos, tanto para os concretos com sílica ativa e escória de alto forno quanto para aqueles com cimento puro.

Csizmadia et al. (2001) relatam que existem vários mecanismos de fixação/combinção de cloretos durante a hidratação do cimento: cloretos podem ser ligados ao gel de C-S-H, como um complexo oxi-cloreto de cálcio, um sal de Friedel (um cloreto contendo uma fase AFm, $C_3A.CaCl_2.H_{10}$), ou seu análogo metálico ($C_3F.CaCl_2.H_{10}$) pode ser formado também, especialmente sob baixas temperaturas. A combinação dos cloretos com a fase C_4AF do cimento, para formação dos sais de Friedel, também foi descrita por Suryavanshi et al. (1995). 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).

5.3.2 Influência da idade de cura no índice k nas misturas com CLETA

A análise do ganho de resistência à penetração de cloretos com o aumento do tempo de cura foi realizada com base na tabela 13 que apresenta a diminuição do valor do índice k (em porcentagem) quando o tempo de cura passou de 3 para 7 dias.

A mistura de referência (REF) e àquelas compostas com 5% e 20% de cinza de lodo de ETA apresentaram reduções médias no índice k semelhantes (variaram de 15 a 18%). No entanto, verifica-se nesses concretos que as maiores reduções ocorrem nas relações a/agl 0,35 e 0,65.

Para teores de cinza de lodo de ETA de 25% e 30% as reduções médias foram de 8% para as duas misturas.

Nas misturas ternárias com teor total de substituição de 25% (5EAF e 5CCA) observa-se maior redução no índice k para a menor relação a/agl 936%). No entanto, a redução média na penetração de cloretos foi de 16%. Para a mistura ternária com teor total de substituição de cimento de 30% (10EAF) a maior redução do índice k foi observada para a maior relação a/agl (19%), sendo que a redução média foi de 11%. Assim como observado para as misturas compostas com 5% a 20% de cinza de lodo de ETA nas misturas ternárias as maiores reduções ocorrem para as relações a/agl 0,35 e 0,65.

Tabela 13 – Variação do índice k com o aumento do tempo de cura

Mistura	Relação a/agl	Redução do índice k (%)
REF	0,35	27
	0,50	19
	0,65	4
5L	0,35	22
	0,50	9
	0,65	15
10L	0,35	22
	0,50	10
	0,65	17
15L	0,35	14
	0,50	13
	0,65	26
20L	0,35	10
	0,50	12
	0,65	24
25L	0,35	7
	0,50	5
	0,65	12
30L	0,35	11
	0,50	7
	0,65	5
5% EAF	0,35	36
	0,5	5
	0,65	3
10% EAF	0,35	4
	0,5	9
	0,65	19
5% CCA	0,35	17
	0,5	6
	0,65	11

Fonte: Autora.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o propósito de atingir os objetivos preestabelecidos, foi analisada, nesta pesquisa, 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, em propriedades ligadas à durabilidade, no caso, retração total e penetração de íons cloreto.

As substituições do cimento Portland por CLETA variaram de 0 a 30%, havendo ainda misturas ternárias, 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/ag) 0,35, 0,50 e 0,65 com períodos de cura úmida de 3 e 7 dias.

O desempenho das diversas misturas foi constatado a partir dos resultados de retração total (aos 365 dias) e de penetração de cloretos após retração (aos 91 dias de imersão). Com isso, procurou-se atingir os objetivos propostos a fim de melhor compreender os efeitos dessas adições minerais nas propriedades investigadas.

As conclusões finais são apresentadas a seguir em igualdade de relação a/ag.

- De maneira geral, embora tenham sido observados valores de retração pouco maiores para a cura de 3 dias, não foi constatada variação pronunciada entre os prazos de cura, caracterizando, assim, comportamentos similares entre o prazo de 3 e o de 7 dias de cura. Essa constatação poderia ser explicada pela teoria da tensão capilar, a qual se processa durante a exposição ao ar, ocasionando ou não retração, o que dependeria da distribuição dos tamanhos dos poros e também da quantidade de água evaporável. Esta, por sua vez, é influenciada pelo grau de hidratação do material aglomerante.
- Em todas as misturas investigadas, a que apresentou menor valor de retração foi a de referência, em todas as idades de ensaio e nos dois períodos de cura. Seguido dessa, em ordem crescente de retração, vem 5 L, 10 L, 15 L, que teve na maioria das misturas um comportamento similar à de 10 L, seguido das misturas 20 L, 25 L e 30 L.

- Diferentemente daquilo que se constatou no ensaio de resistência à compressão realizado por Amaral (2015) fazendo o uso dos mesmos materiais da presente pesquisa, o emprego de escória no concreto resultou em efeitos benéficos, tanto na retração total quanto na resistência à penetração de cloretos. Em ambas as propriedades, o aumento do teor de escória proporcionou melhores desempenhos, em igualdade de relação a/ag e período de cura.
- No que diz respeito à penetração de íons cloreto, houve um aumento na resistência quando o tempo de cura passou de 3 para 7 dias, pois, na idade mais avançada, verificou-se menor valor de coeficiente k , indicando que houve a diminuição de penetração de cloretos com o aumento do tempo de cura, isto pode ser explicado por o concreto ter adquirido uma maior compacidade e com isso uma resistência maior à penetração de cloretos.
- Em relação às substituições utilizadas, a mistura de referência (REF) e aquelas compostas com 5 a 20% de cinza de lodo de ETA apresentaram reduções médias no índice k semelhantes (variaram de 15 a 18%). Para teores de cinza de lodo de ETA de 25% e 30%, as reduções médias foram de 8% para as duas misturas.

Nas misturas ternárias com teor total de substituição de 25% (5EAF e 5CCA), observou-se maior redução no índice k para a menor relação a/ag . Para a mistura ternária com teor total de substituição de cimento de 30% (10EAF), a maior redução do índice K foi observada para a maior relação a/ag .

Para todas as misturas analisadas, o aumento da relação a/ag ocasionou o aumento do coeficiente de penetração independentemente do período de cura. Constatou-se que o coeficiente de penetração nas misturas investigadas foi tanto maior quanto maior foi 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/ag .

Foi verificado o comportamento de misturas ternárias e quaternárias (cimento; CLETA e escória de alto forno e cimento; CLETA; cinza de casca de arroz e escória de alto forno) nas propriedades investigadas. Constatou-se que essas misturas

apresentaram melhores desempenhos quando comparadas às misturas binárias, compostas por CLETA e cimento Portland.

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A seguir, são mencionadas sugestões para futuros trabalhos relacionados aos mesmos concretos já investigados:

- realização dos ensaios em igualdades de resistência mecânica;
- teor de cloretos fixados;
- resistência a sulfatos;
- permeabilidade ao oxigênio;
- características da pasta: porosimetria de mercúrio, calorimetria, teor de hidróxido de cálcio remanescente, MEV, DR X.

REFERÊNCIAS

ABREU, A. G. **Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais**. 1998, 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

AÏTCIN, P.C. The durability characteristics of High-Performance Concrete: a review. **Cement & Concrete Composites**, Great Britain: Elsevier Science, v. 25, p. 409-420, 2003.

_____. **High-Performance Concrete**, New-York. E & FN Spon, 2000.

_____. **High-Performance Concrete**, New-York. E & FN Spon, 1998.

ALVAREDO, A. M.; WITTMANN, F. H. Shrinkage and cracking of normal and high performance concrete. **High Performance concrete: Properties and Design. Aedificatio**. Publishers, Freiburg, pp. 91-110. 1995.

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 CONCRETE INSTITUTE. ACI Committee 209: **Report on factors affecting shrinkage and creep of hardened concrete**, 2005.

_____. ACI Committee 233: **Ground granulated blast-furnace slag as a cementitious constituent in concrete**, 1995.

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

ANDRADE, W. P. de. **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo: Pini, 1997.

ANDRIOLO, J. L., POERSCHKE, P. R. **Cultivo do tomateiro em substratos**. Santa Maria : Centro de Ciências Rurais, UFSM, 1997. 12p. (Informe técnico, 2).

AOKI. 2007 **Considerações sobre o cimento**. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/home/>>. Acessado em outubro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

_____. **NBR 5735**: Cimento Portland de Alto forno. Rio de Janeiro, 1991. 6 p.

_____. **NBR 11578**: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

_____. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tranco de cone. Rio de Janeiro, 1998, 5 p.

_____. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos- classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

_____. NBR 5752: Cimento Portland – ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 2010. 9 p.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

_____. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro, 2014. 6 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C157/C157M**: Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete, 2014. 7 p.

_____. **ASTM C490/C490M**: Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar and concrete, 2011. 5 p.

_____. **ASTM C618**: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, 2015. 7 p.

_____. **ASTM C595/C595M**: Standard Specification for Blended Hydraulicements, 2015. 13 p.

_____. **ASTM C1202**: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, 2012. 7 p.

AWWA. **Commercial application and marketing of water plant residuals**. Subject área: watertreatment. 2001.

ANDRADE. **Evolução do Concreto Armado**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2006.

BAKKER, R. F. M. **Corrosion of Steel in Concrete**. Chapter 3: Initiation Period. RILEM Report of the Technical Committee 60-CSC, Editor Peter Schiessl. Chapman and Hall, London, 1988.

BARBOSA, R. M.; POVINELLI, J.; ROCHA, O.; ESPÍNDOLA, E. L. G. (ceadocera, crustacea). In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 27., 2000, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: AIDIS, 2000. 1 CD- ROM.

BARIGHEL-BOUNY, V. Characterization des pates de ciment et des bétons: methods, analyse, interpretations. These de doctorat de L.C.P.C., PARIS, 1994.

BISSCHOP, J. **Drying shrinkage cracking at early ages**. In: A. Bentur (ed), Proceedings of the early age cracking in cementitious systems, RILEM, France, p. 27-33, 2002.

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.

_____. 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.

BISSONNETTE, B.; PIERRE, P.; PIGEON, M. **Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials**. Cement and Concrete Research, v. 29, n. 10, p. 1655-1662, 1999.

BRANDÃO, A. M. S.; PINHEIRO, L. M. Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, n. 8. EESC-USP, 1999.

BUSH, J.W (2004). **"MIT Lecture Notes on Surface Tension, lecture 5"** (PDF). Massachusetts Institute of Technology. Consult. April 1, 2007.

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

COLLEPARDI, M.; BORSOI, A.; COLLEPARDI, S.; OLAGOT, J. J. O.; TROLI, R. Effects os shrinkage reducing admixture in shrinkage compensating concrete under non-wet curing conditions. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 6, p. 704-706, 2005.

COLLINS, F.; SANJAYAN, J. G. Effect os pore size distribution on drying shrinkage of álcali-activated slag concrete. **Cement and Concrete Research**, v.30, n. 9, p.1401-1406 ,2001.

CORDEIRO, J. S. **O problema dos lodos gerados em decantadores de estações de tratamento de águas**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000.

COSTA, J.; APPLETON, J. Análise da penetração de cloretos em estruturas de betão armado expostas ao ambiente marítimo. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**, Portugal n. 46, p. 3, 2001.

COUTINHO, J. S. The combined benefits of CPF and RHA in improving the durability f concrete structures. **Cement and Concrete Composites**, 25:51-59, 2003.

CRUZ, E. B.; BENEDUCENETO, F.; TOSETTI, J. P. V; FERREIRA NETO, J. B. **Pyrometallurgical treatment of BOF slags for the production of construction materials and refining fluxes**. São Paulo: 1999

CHEN H., MA X, DAÍ H. Reuse of water purification sludge as raw material in cement production. **Cementand Concrete Composites**. 32:436-39, 2010.

CHANG, P.; HOU, W. **A study on the hydration properties of high performance slag concrete analyzed by SRA**. 2003. Taiwan. p.183-189

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. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com adição de microssílica**. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

DAL MOLIN, D. C. C.; ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1.

DELLA, V. P. **Síntese e caracterização do pigmento cerâmico de hematita, obtida a partir de carepa de aço, encapsulada em sílica amorfa obtida a partir de casca de arroz**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2005.

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, L.; DANTAS, A. DI B.; VOLTAN, P. EN. **Métodos e Técnicas de Tratamento dos Resíduos gerados em Estações de Tratamento de Água**. 1. ed. São Carlos: LDiBeEditora, 2012. v. 1. 540 p .

DINIZ, J. Z. F; FERNANDES, J. F e KUPERMAN, S. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia. Capítulo 19. Retração e Fluência**. São Paulo: Pini, 2011.

DOTTO, J. M. R. **Corrosão do aço induzida por íons cloreto – Uma análise criticadas técnicas eletroquímicas aplicadas ao sistema aço-concreto com ou sem pozolana**. 2006, 331 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

ESPING, O. **Early age properties of self-compacting concrete -effects of fine aggregate and limestone filler**. 2007, 204 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Chalmers University of Technology, Suécia, 2007.

FAO - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura – disponível em <<https://www.fao.org.br>>. Acesso em: setembro de 2015.

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

FRIAS, M., SANCHEZ DE ROJAS, M.I., CABRERA, J. The effect that the pozzolanic reaction of metakaolin has on the heat evolution in metakaolin–cement mortars. **Cement and Concrete Research**, 30 (2) (2000): 209–216.

GASTALDINI, A. L. G. Influência das adições minerais na porosidade de pastas de cimento Portland. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 4., 1996, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ABCP, 1996. p. 119-136.

GASTALDINI, A. L. G., ISAIA, G.C., SACIOTO, A.P., MISSAU, F., HOPPE, T.F. Influence of curing time on the chloride penetration resistance of concrete containing rice husk ash: A technical and economical feasibility study. **Cement & Concrete Composites**. p.783 - 793, 2010.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1675-1683, 2008.

HE, Z.; LI, Z. J.; CHEN, M. Z.; LIANG, W. Q. Properties of shrinkage-reducing admixture-modified pastes. **Materials and Structures**, v. 39, n. 4, p. 445-453, 2006.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993, 271 f. Tese (Livre Docência em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP. São Paulo, 1993.

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

HERNANDEZ, J. F.; LARA, R. C. Estudio de la adición de arcillas calcinadas em la durabilidade de hormigones. Cuba: **Revista Ingeniería de Construcción**. v. 26, nº 1, p. 25 2010.

HOLT, E. E. Early ages autogenous shrinkage of concrete. **Technical Research Centre of Finland**, ESPOO, 2001.

HOOTON;BICKLEY;PERSHING. Design for durability: The key to improving concrete sustainability. **Construction and Building Materials**, v. 67, p. 422-430. 2005.

HOUSTON, D. F. **Rice: Chemistry and Technology**. American Association of Cereals Chemistry, Minnesota, p. 301-352, 1972.

HUNKELER F. The resistivity of pore water solution – a decisive parameter of rebar corrosion and repair methods. **Constr Build Mater**, 10(5):381–9, 1996.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Em setembro, IBGE prevê safra 8,8% maior que a de 2014**. Disponível em: <<http://www.saladeimprensa.ibge.gov.br/noticias.html?view=noticia&id=1&idnoticia=3007&busca=1&t=setembro-ibge-preve-safra-8-maior-que-2014>>. Acesso em: setembro, 2015.

ISAIA, G., GASTALDINI, A. L. G. **Concreto “verde” com teores muito elevados de adições minerais: um estudo de sustentabilidade**. Artigo apresentado na I

Conferência Latino Americana de Construções Sustentáveis. X Encontro Nacional de Tecnologias do Ambiente Construtivo. São Paulo SP, julho de 2004.
Capítulo 1. Prólogo: Concreto e desenvolvimento sustentável A. Capmas. Tradução Geraldo C. Isaia. Livro Durabilidade do Concreto - Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Estatísticas – Dezembro 2015 – Produção Siderúrgica Brasileira**. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/estatisticas.asp>>. Acesso em: setembro, 2015.

JAEGERMANN, C. Effect of water cement ratio and curing on chloride penetration into concrete exposed to mediterranean sea climate. **ACI Materials Journal**, v. 87, n.4, p. 333-339,1990.

JIANG, G., RONG, Z., SUN, W. Effects of metakaolin on mechanical properties, pore structure and hydration heat of mortars at 0.17 w/b ratio. **Construction and Building Materials**, 93(2015):564-572.

KALINTZIS, C. A. A.; KUPERMAN. S. C. Um sistema para planejamento operacional de obras de rodovias. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2001.

KOVLER,K;ZHUTOSKY,S. **Overview and future trends of shrinkage research**. Materials and Structures, v.39, pp. 827-847,2006.

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.

LIMA, M. G. **Concreto: Ciência e Tecnologia** / ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2011. 1 v.

LÜBECK, A. **Resistividade elétrica de concretos de cimento Portland branco e elevados teores de escória de alto forno**. 2008, 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

LÜBECK, A., GASTALDINI, A. L. G., BARIN, D. S., SIQUEIRA, H. C. Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag. **Cement and Concrete Composites**, 34(2012):392-399.

MASSAZZA, F.; OBERTI, G. Durability of pozzolanic cements and Italian experience in mass concrete. **ACI Spec Publ** 126, 1991.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. **Concreto: Ciência e Tecnologia** / ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2011. 1 v.

MEHTA, P.K. **Rice husk ash: a unique supplementary cementing material**. In: MALHOTRA, V.M. (Ed.). Advances in concrete technology. Ottawa: Canmet, p.403-

431. 1992.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 2008.

MALHOTA, V.M. Fly ash, slag, silica fume, and rice-husk ash in concrete: A review. **Concrete International**, v.15, n. 4, Apr. 1993.

MCGRATH, P. F.; HOOTON, R. D. Influence of Binder Composition on Chloride Penetration Resistance of Concrete. In: DURABILITY OF CONCRETE. CANMET/ACI INTERNATIONAL CONFERENCE, 4., Sydney, 1997. **Proceedings...** Farmington Hills: American Concrete Institute, 1997. p. 331-347.

MEMERDAS K, GÜNEYISI E, GESOGLU M, ÖZTURAN T. Experimental evaluation and modeling of during shrinkage behavior of metakaolin and calcined concrete. **Construction and Building Materials**, 43:337-347. 2013.

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

NETO, A. A. M. **Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada**. 2002, 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

NGALA, V.T. *et al.* Diffusion in cementitious materials: II. further investigations of chloride and oxygen diffusion in well-cured OPC and OPC/30% PFA pastes. **Cement and Concrete Research**, USA: Pergamon, v. 25, p. 819-826, 1995.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828p.

NUNES, N. L.; FIGUEIREDO, A. D. Retração do Concreto de Cimento Portland. **Boletim Técnico**. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2007.

OTSUKI, N.; NAGATAKI, S.; NAKASHITA, K. Evaluation of AgNO₃ solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials. **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 6, p. 587-592, 1992.

PAL, S. C; MUKHERJEE, A; PATHAK, S. R. **Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete**. India, 2003.

PERENCHIO, W. F. The drying shrinkage dilemma. **Concrete Construction**, v. 42, n. 4, p. 379-383, 1997.

PING-KUN CHANG. A study on the hydration properties of high performance slag concrete analyzed by SRA. **Cement and Concrete Research**, v.33, p.183-189, 2003.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico.** 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

R. DOUG HOOTON , JOHN A. BICKLEY. Design for durability: The key to improving concrete sustainability. **Construction and Building Materials.** 67:422–430, 2014.

RÊGO, J. H. S. **As cinzas de Arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento- aspectos de microestrutura das pastas.** 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

RIBEIRO, D. V; CUNHA, M. P. Deterioração das estruturas de concreto armado. In: _____. **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise.** Tradução: Daniel Ribeiro Veras. ed. 1. Rio de Janeiro: Ed. Elsevier. cap. 6, p. 272.

RIZZON, A. C.; ANDRADE, J. J. O. Determinação do coeficiente de difusão de cloretos e da vida útil de concretos de cimento branco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO-IBRACON, 48., 2006. Rio de Janeiro, **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Concreto, 2006.

ROY, D. M. The effect of blast furnace slag and related materials on the hydration and durability of concrete. In: Holm, J. and Geiker, M. (eds) *Durability of Concrete.* G. M. Idorn International Symposium, Toronto, 1990. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1992, p. 195-208 (SP-131).

SALES, A.; CORDEIRO, J. S. Imobilização da Fase Sólida de Lodo de Estações de Tratamento de Água (ETAs). In: ANDREOLI, C. V. (coord.) **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final.** Rio de Janeiro: RiMa / ABES / PROSAB, 2001. p. 245 – 257.

SANTOS, F. I. G.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Influência da cinza pesada empregada em substituição ao agregado natural nos mecanismos de transferência de umidade em argamassas. **Revista Matéria**, v. 12, n. 2, 2007.

SACILOTTO, A. P. **Comportamento frente à ação de cloretos de concretos compostos com adições minerais submetidos a diferentes períodos de cura.** 2008, 179 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

SENAI. **Etapas de fabricação do ferro fundido.** Disponível em https://pt.wikipedia.org/wiki/Tens%C3%A3o_superficial. 2012. Acessado em setembro, 2015.

SCHNEIDER, J. **Penetração de cloretos em concretos com escória de alto forno e ativador químico submetidos a diferentes tipos de cura.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SHOYA, M. Drying shrinkage and moisture loss of superplasticizer admixed concrete of low water cement ratio. **Transactions of the Japan concrete institute**, II-5, p.103-110,1979.

SILVA, C. O.; VIEIRA, S. R. S. S. Influência da temperatura de cura nas características reológicas, físico-mecânicas e microestruturais do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO-IBRACON, 43., 2001. Foz do Iguaçu-PR. **Anais** Foz do Iguaçu: Instituto Brasileiro do Concreto, 2001. 1 CD-ROM.

SILVA, E. F. **Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração**. 2007, 332p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro,2007.

SILVEIRA, A. A.; RUARO, P. A adição de cinza de casca de arroz em concretos: estudo da influência do tipo de cinza na resistência à compressão e na microestrutura do concreto. In: **Seminário da Disciplina de Novos Materiais**, PGEC/UFRGS, 1995.

SIQUEIRA, H. C. **Penetração de cloretos em concretos compostos com cimento Portland branco e escória de alto forno, ativados quimicamente**. 2008, 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

SIVASUNDARAM, V.; MALHOTRA, V. M. Properties of concrete incorporating low quantity of cement and high volumes of ground granulated slag. **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 6, p. 554-563, 1992.

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/>>. Acesso em: setembro, 2015.

SONEBI, M., LACHEMI, M., HOSSAIN, K. M. A. Optimisation of rheological parameters and mechanical properties of superplasticised cement grouts containing metakaolin and viscosity modifying admixture. **Construction and Building Materials**, 38 (2013): 126–138.

SOUZA, U. E. L.; PALIARI, J. C; AGOPYAN, V.; ANDRADE, A. C. Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: uma abordagem progressiva. **Ambiente Construído**, Porto Alegre: ANTAC, v. 4, n. 4, p. 33-46, out/dez. 2004.

SOUZA SANTOS, P. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1992. 3 v.

SOUZA, S. P. B. **Betões eco-eficientes com cinza de casca de arroz**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Portugal, 2005.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F. **Concrete**. 1 ed., New Jersey: Ed Prentice- Hall, 1981.

MOESGAARD, M.; HERFORT, D.; STEENBERG, M.; KIRKEGAARD, L.F.; YUE, Y. Physical performances of blended cements containing calcium aluminosilicate glass powder and limestone. **Cement and concrete research**, v. 41, p. 359-364, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00088846/41/3>>. Acesso em: 25 jun. 2015.

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.

RAVERDY, M., BRIVOT, F., PAILLIERE, A. M., DRON, R. “**Appreciation de L’activite pouzzolanique des constituants secondaires**” – 7° ed. Congres International de la Chimie des Ciments, v. III, 36. Paris, 1980.

REICHARD, T. W. **Creep and drying shrinkage of lightweight and normal weight concretes**. Monograph, 74. Washington.

RIBEIRO, D; CUNHA. M. P. **Deterioração das estruturas de concreto**. Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, controle e métodos de análise. Rio de Janeiro: Daniel Ribeiro Veras, 2014..

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**, London: Thomas Telford, 2ed, 1997.

TIRONI, A. et al. Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays. Argentina. **Cement & Concrete Composites**. 2013. Argentina.

TOLEDO FILHO, R. D.; GONCALVES, J. P.; FAIRBAIRN, E. M. R.; BORGES, A.; ROSA, L. P. Desenvolvimento de concretos de baixo impacto ambiental utilizando materiais cimentícios de baixo consumo de energia e emissão de CO₂. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA/IV SEMINARIO LATINO AMERICANO DE ENERGIA, 9., 2002. **Anais...** Rio de Janeiro: 2002.

TORRENTI, M. J. Retração e fluência. In: _____. **Durabilidade do Concreto. Bases Científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. IBRACON, 2014. cap. 5, p. 141-177.

TSUTUYA, M. T.; HIRATA, A. Y. Aproveitamento e Disposição Final de Lodos de Estação de Tratamento de Água do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABES, 2001.

UEDA, T.; TAKEWARA, K. Performance-based Standard Specifications for Maintenance and Repair of Concrete Structures in Japan. **Structurak Engineering International**, v.4, 2007.

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

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.

XINGHUA, F.; WENPING, H.; CHUNXIA, Y. Studies on Portland cement with large amount of slag. **Cement and Concrete Research**. v.30. p 645-649. 2000.

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, M. H.; TAM, C. T.; LEOW, M. P. Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 10, p. 1687-1694, out. 2003.

ZHANG, M. H.; LASTRA, R.; MALHOTRA, V. M. Rice-huskash paste and concrete: some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 6, p. 963-77, mar. 1996.

ZHANG, M. H.; BILODEAU, A.; MALHOTRA, V. M.; KIM, K. S.; KIM, J. C. Concrete incorporating supplementary cementing materials: effect on compressive strength and resistance to chloride-ion penetration. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 2, p. 181-189, 1999.

WHITING, D. A.; NAGI, M. A. Electrical resistivity of concrete – A literature review. 57p. R&D Serial n. 2457. **Portland Cement Association**. Skokie, Illinois, EUA., 2003.