



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL

ARON DA SILVA FRAGÔSO

**A INFLUÊNCIA DA CURA E DO METACAULIM NA PENETRAÇÃO DE
CLORETOS EM CONCRETO**

JOÃO PESSOA

2018

ARON DA SILVA FRAGÔSO

**A INFLUÊNCIA DA CURA E DO METACAUJIM NA PENETRAÇÃO DE
CLORETO EM CONCRETO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia civil da Universidade Federal da Paraíba como requisito obrigatório para a obtenção de grau em Bacharel.

Orientador (a): Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo.

JOÃO PESSOA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Catálogo na publicação Seção de Catalogação e Classificação

FB111 Fragoso, Aron da Silva.
A INFLUÊNCIA DA CURA E DO METACAULIM NA PENETRAÇÃO DE
CLORETOS EM CONCRETO / Aron da Silva Fragoso. - João
Pessoa, 2018.
62 f. : il.

Orientação: Givanildo Alves Azeredo.
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Concreto Convencional. 2. Concreto de Alto
Desempenho. 3. Durabilidade. 4. Cloretos. 5.
metacaulim. I. Azeredo, Givanildo Alves. II. Título.

UFPB/BC

FOLHA DE APROVAÇÃO

ARON DA SILVA FRAGOSO

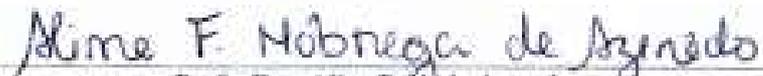
A INFLUÊNCIA DA CURA E DO METACAULIM NA PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso em 22/06/2018 perante a seguinte Comissão Julgadora:



Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CTUFPB

APROVADO



Profa. Dra. Aline F. N. de Azeredo
Instituto Federal da Paraíba - IFPB

APROVADO



Prof. Msc. Cicero Maranhão da Silva Santos
Instituto Federal da Paraíba - IFPB

APROVADO



Prof.ª Ana Cláudia Ferrandes Medeiros
Matricula Sijapc: 1668619

Prof.ª Andrea Brasiliano
Coordenadora COGEC
Suplente nº 1644657

Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

Dedico, primeiramente a Deus todo poderoso, pois Ele com sua infinita bondade me deu saúde e força para nunca desistir, à minha pessoa que apesar das críticas, sempre persistiu em busca do conhecimento, e a minha família, em especial à minha mãe, que a todo tempo esteve ao meu lado, dando-me suporte e condições para persistir em busca do meu sonho.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus pela soberania, dono dos meus pensamentos, conhecimento e provedor de toda sabedoria adquirida até aqui. Obrigado por permitir o meu acordar todas as manhãs, por me dar forças durante os momentos de estresse e tristeza durante esta caminhada e por ter me abençoado com a mais valiosa das dádivas: A VIDA.

A minha mãe, Maria de Lourdes Menezes da Silva, por ser a grande merecedora dessa conquista, pois sempre agiu de forma a proteger, cuidar e dar suporte em todas as ocasiões que necessitei não só na graduação, como durante toda a vida. Obrigado minha mãe, por ser essa pessoa tão guerreira e forte que és.

A minha família, por todo apoio e suporte nos momentos mais difíceis da caminhada. José Agamenon Fragôso, meu pai, e Anderson da Silva Fragôso, meu irmão, agradeço por me ajudar em todos os momentos que necessitei durante toda esta grande caminhada.

A minha namorada, e futura esposa, Thalita Karla Costa Farias, pela motivação, pelas palavras de ânimo e por sempre ser a “válvula de escape” dos momentos de tensão com palavras e atos carinhosos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo, por nunca ter negado conhecimento, por ter dado todo o suporte para o desenvolvimento desse trabalho e por ser uma pessoa de coração tão generoso e bom. Obrigado por ter aceitado ser meu orientador, mesmo com todas as adversidades do dia-a-dia.

Agradeço a todos os professores que enriqueceram minha caminhada acadêmica de forma geral. Em especial ao Prof. Dr. Hidelbrando J. F. Diógenes por ter repassado grande conhecimento sobre o mercado de trabalho e dia-a-dia de um engenheiro civil, durante sua disciplina, ao Prof. Dr. Clóvis Dias por ser inspiração nos conhecimentos de projetos de pavimentação e por todo suporte durante o Estágio Supervisionado Curricular, a Prof. Dra. Andréa Brasiliano Silva por repassar todo o conhecimento que possui na área de Análise Estrutural, e a Prof. Dra. Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga por toda calma e paciência no atendimento, enquanto coordenadora do curso, em todas as vezes que precisei.

Aos amigos da Empresa Júnior de Engenharia Civil e Arquitetura - PLANEJ, local onde pude ser útil e me sentir um profissional realizado no que exerci durante 1 (um) ano.

Aos amigos da Gerência de Habitação da Caixa Econômica Federal (GIHAB/JP), por todo conhecimento e ajuda durante os 2 (dois) anos de estágio profissional no setor de avaliação

de imóveis. Em especial, aos meus coordenadores Eng.^a Roberta Biancha, Arq. Hilmara Mascena e o Eng.^o Leonardo Eudes, por serem profissionais com corações genuínos, que me acolheram como família, repassando ensinamentos que vão além do meio profissional. Obrigado por toda compreensão e amizade que levarei como exemplo para o restante da vida.

Aos amigos que adquiri durante toda a vida acadêmica, em especial a Gracielle Ferreira por toda a ajuda durante o curso, palavras de apoio e, principalmente, por ser uma amiga única, a Ana Rachel por toda a confiança, apressos e palavras de apoio, Thiago Galvão por ser um grande amigo e ter ajudado em momentos de bastante dificuldade durante as disciplinas.

A todos os funcionários que compõem o quadro do LABEME, em especial a Sebastião por todo o apoio, perseverança e ajuda durante o ensaio que embasa este trabalho, a Delby Filho por toda ajuda, calma e paciência durante os cortes das amostras para obtenção das amostras e, durante os rompimentos por compressão diametral, rompimento este de suma importância no prosseguimento do ensaio, a Claudio Mathias por ter se disponibilizado a ajudar na caracterização dos materiais utilizados para obtenção do concreto convencional, ao estagiário Danilo por ter ajudado na produção do concreto durante dois dias.

Ao curso de Engenharia Civil e a Universidade Federal da Paraíba pelo encontro.

“ A imaginação é mais importante que a ciência, porque a ciência é limitada, ao passo que a imaginação abrange o mundo inteiro. ” – Albert Einstein

RESUMO

Devido a influência maléfica dos íons cloretos nas armaduras de aço presentes no interior das peças de concreto armado e a necessidade do desenvolvimento de concretos com maior resistência, pesquisas foram desenvolvidas com o objetivo de obter materiais que, quando adicionados à mistura que resulta no concreto, causasse um melhoramento nas propriedades mecânicas e nas propriedades de durabilidade, ocorrendo a diferenciação entre o concreto convencional (CC) e o concreto de alto desempenho (CAD), em relação as características mecânicas e o desempenho no meio do qual estão inseridos. Objetiva-se analisar a difusividade de íons cloretos em corpos de prova de concreto convencional e CAD. E como objetivos específicos: verificar a influência do teor de substituição da massa cimentícia pela massa de metacaulim, na difusividade de íons cloretos no concreto convencional, verificar a influência do teor de pasta cimentícia presente na mistura para obtenção do CAD, na difusividade de íons cloretos no mesmo, verificar a influência do tipo de cura dos corpos de prova na difusividade de íons cloretos no concreto convencional. Foram estudados 8 traços, sendo 4 de concretos convencionais e 4 de CAD para avaliar a influência da cura e da substituição de massa cimentícia por metacaulim na durabilidade do concreto. No estudo foi utilizado o teste de migração rápida proposto pela **NordTest NT Build 492**, afim de se obter o coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário. Ao final, concluiu-se que as adições minerais são materiais de suma importância para melhoria das propriedades do concreto, tanto mecânicas como propriedades relacionadas a durabilidade e que o metacaulim se mostrou excelente alternativa para melhoria nas propriedades do concreto, pois além de apresentar excelentes resultados frente à penetração de cloretos, cabendo ao profissional responsável por elaborar o traço, estudar o material afim de chegar num percentual ideal, pois como foi mostrado, após certo teor de substituição (20%, no caso do presente trabalho) o concreto não apresentou melhoras significativas nas propriedades de durabilidade frente a difusão de íons cloretos, também notou-se que com certo percentual de substituição o tipo de cura não influencia nas propriedades frente a agentes agressivos (cloretos, no caso do presente trabalho).

Palavras-chave: Concreto convencional, Concreto de Alto Desempenho, Durabilidade. Cloretos. metacaulim.

ABSTRACT

Due to the harmful influence of chloride ions on the steel reinforcement in the interior of the reinforced concrete pieces and the need for the development of more resistant concretes, researches were developed with the objective of obtaining materials that, when added to the mixture that results in the concrete, improved mechanical properties and durability properties. Making the differentiation between conventional concrete (CC) and high performance concrete (CAD), in relation to the mechanical characteristics and performance in which they are inserted. The aim of this work was to analyze the diffusivity of chloride ions in conventional concrete and CAD specimens. And as specific objectives: to verify the influence of the substitution content of the cementitious mass by the metacaolim mass, in the diffusivity of chloride ions in the conventional concrete; To verify the influence of the cementitious paste content present in the mixture to obtain the CAD, in the diffusivity of chloride ions in it; To verify the influence of the types of curing of the specimens in the diffusivity of chloride ions in conventional concrete. As objects of study 8 traces, 4 of conventional concrete and 4 of CAD to evaluate the influence of curing and replacement of cementitious mass of metakaolin on the durability of concrete. In the study, the rapid migration test proposed by NordTest NT Build 492 was used in order to obtain the non-stationary diffusion coefficient of chlorides. At the end, it was concluded that the mineral additions are extremely important materials for improving concrete properties, both mechanical and properties related to durability, and that metakaolin has proved to be an excellent alternative for the improvement of concrete properties, as well as excellent results in comparison to the chloride penetration, it is up to the professional responsible for drawing the trace, to study the material in order to arrive at an ideal percentage, because as shown, after some substitution content (20%, in the case of the present study) the concrete did not show improvement the properties of chloride-ion diffusion durability, it was also observed that with a certain percentage of substitution the type of curing does not influence the properties against aggressive agents (chlorides, in the case of the present work).

Keywords: Convencional Concrete. High Perfomance Concrete. Durability. Chloride. metacaolim.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características físicas, químicas e mecânicas do CP II-Z 32	33
Tabela 2 - Características físicas – Agregado Miúdo.....	34
Tabela 3 - Características físicas – Agregado Graúdo	35
Tabela 4 - Características físicas, químicas e mecânicas - Metacaulim.....	36
Tabela 5 - Resumo das moldagens - Concreto Convencional.....	36
Tabela 6 - Resumo das moldagens – Concreto de Alto Desempenho.....	37
Tabela 7 - Equipamentos utilizados na fabricação e moldagem	38
Tabela 8 - Equipamentos utilizados durante o teste de migração.....	38
Tabela 9 - Diferença de potencial e duração do ensaio de migração de um provete.....	44
Tabela 10 - Data e horários dos corpos de prova de concretos convencionais	48
Tabela 11 - Data e horários dos corpos de prova de CAD	49
Tabela 12 - Correntes e voltagens em corpos de prova (concreto convencional).....	50
Tabela 13 - Correntes e voltagens em corpos de prova (CAD).....	51
Tabela 14 - Profundidade de penetração de cloretos (concreto convencional).....	52
Tabela 15 - Profundidade de penetração de cloretos (CAD).....	52
Tabela 16 - Coeficiente de difusão (concreto convencional)	53
Tabela 17 - Coeficiente de difusão (CAD).....	54
Tabela 18 - Coeficientes de difusão médio de cada traço	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Edifício com estruturas em concreto armado	20
Figura 2 - Estrutura química (Hidróxido de Cálcio)	24
Figura 3 – Representação da forma de penetração dos íons cloretos	27
Figura 4 - Representação da ação dos íons cloretos no processo corrosivo da armadura	28
Figura 5 - Representação do CTH Test.....	30
Figura 6 - Curva Granulométrica - Agregado Miúdo.....	34
Figura 7 - Curva Granulométrica - Agregado Graúdo	35
Figura 8 - Marcação das medidas no corpo de prova para obtenção das amostras	40
Figura 9 - Técnico do LABEME cortando os corpos de prova	40
Figura 10 - Exemplo de provete após o corte.....	41
Figura 11 - Solução de CaO com água (provetes imersos)	41
Figura 12 - Provetes isolados	42
Figura 13 - Esquema de teste (solução catódica e anódica nas amostras).....	42
Figura 14 - Esquema de ligação para passagem de corrente	43
Figura 15 - Esquema de medição da corrente em um provete	44
Figura 16 - Configuração final do teste.....	45
Figura 17 - Teste de compressão diametral.....	46
Figura 18 - Área de reação do nitrato de prata com os cloretos	46
Figura 19 - Ilustração da medição das profundidades de penetração dos cloretos.....	47
Figura 20 - Amostra queimado após o teste	53
Figura 21 - Redução, em percentual, do coeficiente de difusão (concreto convencional)	55
Figura 22 - Diferença percentual entre traços com e sem cura úmida	56
Figura 23 - Diferença percentual entre os traços de CAD e o traço de referência	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Areia
AASTHO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
B	Brita
C	Cimento
$Ca(OH)_2$	Hidróxido de cálcio
Ca^{2+}	Íon de cálcio
C_3A	Aluminato tricálcico
CC	Concreto Convencional
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CAGEPA	Companhia de Esgotos da Paraíba
CAR	Concreto de Alta Resistência
CCR	Concreto Compactado a Rolo
CaO	Cal hidratada
cm	Centímetros
CO_2	Dióxido de carbono
CP	Corpo de Prova
CP1	Corpos de Prova do Traço 1
CP2	Corpos de Prova do Traço 2
CP3	Corpos de Prova do Traço 3
CP4	Corpos de Prova do Traço 4
CP II-Z	Cimento portland com adição de pozolana
CAA	Concreto Auto Adensável
CTH	<i>Threshold chloride level</i>
g	Gramas
kg	Quilogramas
LABEME	Laboratório de ensaios de materiais e estruturas
mA	MiliAmpère
MET	Metacaulim
mm	Milímetros

MPa	MegaPascal
NaCl	Cloreto de Sódio
NBR	Norma Brasileira Reguladora
NM	Norma Mercosur
NaOH	Hidróxido de sódio
NT	<i>Nord Test</i>
QTDE	Quantidade
SiO_2	Dióxido de silício
V	Volts

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA	19
2.1. Concreto.....	19
2.1.1. Concreto Convencional (CC)	20
2.1.2. Concreto de Alto Desempenho (CAD).....	20
2.2. Metacaulim	25
2.3. Cloretos	26
2.3.1. Testes para avaliação da penetração de íons cloreto de maneira direta	28
3. METODOLOGIA	31
4. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	33
4.1. Água	33
4.2. Cimento.....	33
4.3. Agregado miúdo	33
4.4. Agregado graúdo.....	35
4.5. Metacaulim	36
4.6. Traços utilizados	36
4.7. Equipamentos e materiais usados no teste de migração	38
5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	39
5.1. Moldagem dos corpos de prova	39
5.2. Teste de migração de cloretos	39
6. RESULTADOS.....	48
6.1. Solução CaO e Água	48
6.2. Teste de Migração	49
6.3. Penetração dos íons cloretos	51
6.4. Coeficiente de Difusão em regime não-estacionário (D).....	53
7. CONCLUSÃO	58
REFERÊNCIAS	60

1. INTRODUÇÃO

Sendo o material de construção mais utilizado pelo homem, chegando a marcas de mais de 2 toneladas per capita (BARBOSA, 2014), o concreto armado é um material indispensável para o desenvolvimento de qualquer sociedade, pois pode ser utilizado para diversos fins como construção de residências de pequeno porte, edifícios de dimensões faraônicas, rodovias, entre outras. Devido o mesmo atender todas as necessidades de construção no pós-Segunda Guerra Mundial, época em que houve a necessidade da reconstrução em várias sociedades, foram desenvolvidos novos modelos de cálculos afim de buscar uma maior produtividade com menores custos (TROIAN, 2010). Além de ser um material que ajudou bastante na reconstrução das edificações de várias sociedades, o concreto armado em conjunto com outros materiais cimentícios, supriram necessidades em várias áreas da humanidade como segurança, higiene, transporte, ensino, saúde, lazer, entre outras (AMORIM, 2010).

A necessidade de se obter construções cada vez mais complexas e de alto grau de responsabilidade, aliada a necessidade de economia tanto financeira como de recursos, levou ao desenvolvimento de concretos que atendam às especificações técnicas com a obtenção de menores custos e sem comprometer a qualidade final das peças estruturais utilizadas nessas construções (CARMO; PORTELLA, 2008). Vários métodos foram desenvolvidos durante o passar dos anos, para o desenvolvimento de concretos mais duráveis e de resistência característica elevadas, sendo os mais importantes o advento dos aditivos superplastificantes e as adições minerais (materiais pozolânicos).

Como o concreto armado foi-se demonstrando um material que possui grande maleabilidade e capacidade de resolver diversos tipos de problemáticas, de maneira satisfatória, o concreto começou a ser utilizado em diversos meios, muitos dos quais prejudiciais à durabilidade do mesmo, como por exemplo locais que possuem alto teor de cloretos e sulfatos.

Segundo HELENE (1993), na presença de íons cloreto, dependendo da relação Cl/OH, pode ocorrer a destruição do filme protetor que é formado naturalmente nas armaduras quando em contato com concretos jovens e de elevada alcalinidade. Quando isso ocorre dá-se início ao processo de corrosão do aço, o que se não for identificado precocemente, poderá acarretar no colapso da estrutura sem aviso prévio.

Devido a influência maléfica dos íons cloretos nas armaduras de aço presentes no interior das peças de concreto armado e a necessidade do desenvolvimento de concretos com maior resistência característica quando submetidos à esforços de compressão, com o passar dos anos

pesquisas foram desenvolvidas com o objetivo de obter materiais que, quando adicionados à mistura que resulta no concreto, causasse um melhoramento nas propriedades mecânicas (resistência característica) e nas propriedades de durabilidade (porosidade, microestrutura, entre outras).

A resistência mecânica era a única propriedade empregada como parâmetro de controle da qualidade do concreto. No entanto, a necessidade de se construir estruturas resistentes a ambientes de elevada agressividade fez com que fossem desenvolvidos concretos com excelentes propriedades relacionadas a trabalhabilidade, resistência e, principalmente, durabilidade. (SILVA; LIBORIO, 2005).

Desse modo, pode-se fazer a diferenciação entre o concreto convencional (CC) e o concreto de alto desempenho (CAD), em relação as características mecânicas e o desempenho no meio do qual estão inseridos. CARVALHO; FILHO (2014) confirma essa teoria quando diz que o CAD é o concreto que a resistência à compressão aos 28 dias de idade supera os 50 Mpa, tendo uma resistência à compressão superior à de concretos convencionais, além de possuir melhorias em outras propriedades que, principalmente, elevam a durabilidade das estruturas.

Com base em (SILVA, 2000), o emprego de adições minerais resulta em um bom mecanismo de aperfeiçoamento das propriedades do concreto, como aumentos significativos na resistência à compressão e nas propriedades de durabilidade. Portanto, a metacaulim é uma adição mineral (pozolanas) que a sua utilização em substituição ao cimento promove um refinamento da estrutura dos poros da pasta de cimento (KHATIB; WILD, 1996), promovendo uma redução significativa na porosidade do concreto, o que leva a um melhoramento na microestrutura do mesmo fazendo que o mesmo seja menos suscetível a ataques de agentes agressivos, fazendo com que haja uma melhora significativa nas propriedades de durabilidade.

Devido a presente problemática, este trabalho tem como propósito analisar a difusividade de íons cloretos em corpos de prova de concreto convencional e CAD, através do cálculo do coeficiente de difusão de cloretos em estado não estacionário.

E, possui como objetivos específicos:

- Verificar a influência do teor de substituição da massa cimentícia pela massa de metacaulim, na difusividade de íons cloretos no concreto convencional;
- Verificar a influência do teor de pasta cimentícia presente na mistura para obtenção do CAD, na difusividade de íons cloretos no mesmo;

- Verificar a influência do tipo de cura dos corpos de prova, na difusividade de íons cloretos no concreto convencional;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

Esta etapa da pesquisa consiste na revisão bibliográfica de livros, artigos sobre as seguintes temáticas: Concreto convencional, concreto de alto desempenho, cloretos, metacaulim, durabilidade do concreto e testes que analisam o grau de penetração de cloretos no concreto.

2.1. Concreto

O concreto é um material obtido através da mistura entre água, cimento e agregados miúdo e graúdo, basicamente, sendo possível a adição de outros materiais que visam aumentar a capacidade de suporte a esforços de maior magnitude, aumentar a durabilidade do mesmo, entre outras características.

A evolução dos métodos empregados nos dimensionamentos de peças estruturais em concreto armado acarretou muitos benefícios com relação à economia de materiais, estética, entre outras, porém assim como IBRACON (2005) relata, também acarretou consequências negativas às construções, como por exemplo o aumento da esbeltez das estruturas e o cobrimento das armaduras passivas.

De acordo com CARVALHO; FILHO (2014):

“[...] concreto e aço, deverão trabalhar solidariamente, o que é possível devido as forças de aderência entre a superfície do concreto e do aço, pois as barras de aço tracionadas (armadura tracionada) só funcionam quando, pela deformação do concreto que as envolve, começam a ser alongadas, o que caracteriza as armaduras passivas. É a aderência que faz com que o concreto armado se comporte como material estrutural.”

Devido à necessidade de se obter construções com graus de dificuldade cada vez mais desafiadores, dimensões verticais cada vez mais elevadas, produtividade e, principalmente, segurança nas edificações, vários tipos de concreto são utilizados no dia-a-dia da população mundial. Dentre eles podemos citar os mais comuns:

- Concreto Convencional (CC);
- Concreto de Alto Desempenho (CAD);
- Concreto de Alta Resistência (CAR);
- Concreto Compactado a Rolo (CCR);
- Concreto protendido;

A seguir serão detalhadas as definições de Concreto Convencional (CC) e Concreto de Alto Desempenho (CAD), tipos de concreto estes que foram utilizados no decorrer dos estudos para desenvolvimento deste trabalho.

2.1.1. Concreto Convencional (CC)

O Concreto Convencional (CC) é aquele resultante da associação entre cimento, agregados graúdos e miúdos, e água com quantidades pré-determinadas através de cálculos que tomam como base uma estimativa de ganho de resistência ao longo do tempo e a trabalhabilidade do mesmo durante o lançamento através da medida do abatimento.

Figura 1 - Edifício com estruturas em concreto armado



Fonte: BARBOSA (2014)

Para AMORIM (2010), o concreto convencional é concreto em que é feito o lançamento manual através de carrinhos de mão, latas, calhas, caçambas. É aplicado em todo tipo de estrutura como: fundações, pilares, vigas, lajes, muros de arrimo, cortinas, caixas d'água, com consistência medida através do ensaio de abatimento em torno 60 mm.

Já SILVA (2000) diz que por mais de um século, o concreto estrutural tem sido, rotineiramente, produzido para obtenção de resistência aos 28 dias de idade, numa faixa de variação entre 15 MPa e 30 Mpa (para concretos com controles rígidos durante a produção e o lançamento do mesmo), ou seja, qualquer concreto que se encaixe nessa faixa de resistência aos 28 dias de idade é considerado como Concreto Convencional.

2.1.2. Concreto de Alto Desempenho (CAD)

O Concreto de Alto Desempenho (CAD) é um concreto que possui resistência característica aos 28 dias de idade superior à do Concreto Convencional, além de possuir

características melhoradas, como por exemplo a redução do número de vazios internos, aumento da durabilidade, menor consumo de cimento, entre outras.

O CAD inicialmente era denominado de Concreto de Alta Resistência (CAR), devido a sua elevada resistência aos 28 dias de idade, porém com o passar dos anos, a necessidade de se construir estruturas resistentes a ambientes de elevada agressividade, fez com que a resistência mecânica deixasse de ser o único parâmetro para medição da qualidade do concreto (SILVA e LIBORIO, 2005).

Para COUTINHO (1988), o CAD é um concreto que apresenta uma resistência à compressão no intervalo de 50 MPa a 100 Mpa, sendo o Concreto de Ultra-Alto Desempenho aquele que possui um valor de resistência característica maior que esse intervalo.

UCHIKAWA (1993) faz uma classificação entre Concreto Convencional, CAD e Concreto de Ultra-Alto Desempenho a partir de faixas de resistência característica aos 28 dias de idade. Para ele, um concreto que possua 45 MPa ou menos, será classificado como Concreto Convencional, que possua uma resistência característica maior que 45 MPa e menor que 90 MPa será um CAD e, um concreto que possua uma resistência característica maior que 90 MPa será classificado como Concreto de Ultra-Alto Desempenho.

Como percebe-se com as definições citadas, muitos autores consideram (ou consideravam) apenas o parâmetro da resistência à compressão aos 28 dias de idade como determinante para se definir um CAD. Devido a isso, há certa confusão na diferenciação entre um Concreto de Alto Desempenho e um Concreto de Alta Resistência.

Com o passar dos anos, devido a evolução no ramo de pesquisas das propriedades dos materiais, o concreto também começou a ter suas propriedades melhoradas pois notou-se que além do melhoramento da resistência característica, outras propriedades também são melhoradas com a adição de outros materiais na composição do concreto. LIBORIO et al. (2003, apud. SILVA; LIBORIO, 2005), relata que não somente a resistência mecânica dos concretos foi aumentada, mas a quantidade e o tipo de material utilizado também foram modificados. É citado que na década de 1960, para um concreto de resistência característica entre 30 MPa e 35 MPa, utilizava-se 350 kg de cimento/m³ com um fator água/cimento de 0,45. Já no ano de 1985, utilizou-se 250 kg de cimento/m³ com um fator água/cimento de 0,60 e, logicamente, com propriedades diferentes. Com o melhoramento das propriedades do concreto, o CAD também foi ganhando novas definições, principalmente para diferenciar o mesmo do Concreto de Alta Resistência.

Para SILVA; LIBORIO (1999), o CAD deve ser visto, caracterizado e definido em função das suas características globais, que são demonstradas pelo seu comportamento através de solicitações mecânicas, de durabilidade, da sua característica da microestrutura e do meio ao qual o mesmo está inserido.

Para se determinar que um concreto é um CAD, segundo SILVA (2000), além do atributo da resistência são necessários requisitos especiais, como desempenho global ao meio ao qual está inserido, resistência à abrasão, resistência ao congelamento, perda de massa, estabilidade volumétrica, resistência à penetração de agentes agressivos como íons cloretos (objeto desse estudo), carbonatação, lixiviação, entre outras, caracterizando dessa forma, requisitos de durabilidade desse material.

Nota-se, portanto, que se pode definir o CAD como sendo um concreto que possui uma resistência à compressão superior à de concretos convencionais, além de possuir melhorias em suas propriedades, as quais farão com que o mesmo possua um melhor desempenho frente a solicitações mecânicas e de durabilidade no meio em que está inserido.

O concreto em si, analisando de forma bem simples, é um material composto basicamente de dois grupos de materiais: O aglomerante (pasta de cimento) e os agregados. O aglomerante tem como função envolver os agregados de forma a uni-los para torná-los um material, apenas (concreto).

Os agregados normalmente usados para obtenção do concreto, normalmente são densos e resistentes, devido a isso, características como a permeabilidade e a própria resistência característica do concreto são determinadas pela porosidade e pelo tipo de produtos presentes na pasta de cimento (SILVA, 2000).

A quantidade de água utilizada para se produzir o concreto é um fator determinante para a sua durabilidade. A quantidade de água durante a produção do concreto está diretamente ligada a trabalhabilidade do mesmo. Quanto maior o consumo de água, mais fluido e maleável é o concreto, porém em contrapartida se a quantidade de cimento e agregados manter-se constante, haverá perda de resistência à compressão e de baixa nas propriedades ligadas à durabilidade, (AMORIM, 2010), sendo esses dois problemas causados pela porosidade do concreto, já que a mesma aumentará em decorrência do maior consumo de água.

Como foi citado anteriormente, com o passar dos anos o consumo de cimento para produzir concretos de resistências próximas diminuiu consideravelmente, ou seja, tornou-se

possível atingir resistências à compressão altas com um consumo de cimento cada vez menor. Contudo, na maioria das vezes utiliza-se concretos com grande quantidade de água, devido à falta de atenção no controle da relação água/cimento, resultando em concretos com alta porosidade, permeabilidade, etc., o que facilita a entrada de agentes agressivos no interior do concreto, causando riscos de despassivação da armadura.

FIGUEIREDO et al. (2014) relata que as preocupações ambientais causadas pela extração de matérias primas e emissão de CO₂ na produção do cimento portland levaram a pressões para a redução do consumo deste constituinte do concreto.

O advento dos aditivos superplastificantes e da introdução de adições minerais (materiais pozolânicos), facilitou de maneira expressiva o desenvolvimento de concretos com propriedades mais eficazes, ou seja, facilitou o desenvolvimento de concretos que podem ser classificados como CAD. O uso desses dois tipos de materiais (aditivos e adições minerais) mostrou-se bastante eficaz, devido a desenvolver uma melhor trabalhabilidade do concreto, além de diminuir consideravelmente a porosidade do mesmo, fazendo com que o concreto ficasse menos passível aos ataques de agentes agressivos.

As adições minerais, também chamadas de pozolanas, são materiais silicosos ou sílico-aluminosos, naturais ou artificiais, que contêm um elevado teor de sílica reativa, com estrutura pouco cristalina ou mesmo não cristalina (MEDINA, 2011). Apesar de não possuírem propriedades ligantes em seu estado isolado, quando em contato com água e algum material que possua hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) ou Ca^{2+} em sua composição, reagem quimicamente a temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes, como silicatos e aluminatos de cálcio.

SOKOLOVICZ (2013) define as adições minerais como sendo compostos inorgânicos, geralmente de natureza sílico-aluminosa que adicionados ao concreto promovem uma melhoria no desempenho com relação a durabilidade e propriedades mecânicas.

ISAIA (1995) detalha que a função das adições minerais ao CAD, propiciam ao mesmo uma microestrutura mais uniforme e compacta, resultando num desempenho bem superior ao Concreto Convencional (sem adições), no que diz respeito à durabilidade, desempenho e vida útil das estruturas que venham a usar esse tipo de concreto.

As adições minerais promovem um melhoramento na durabilidade do CAD, principalmente por reduzirem drasticamente a porosidade do mesmo, conseqüentemente

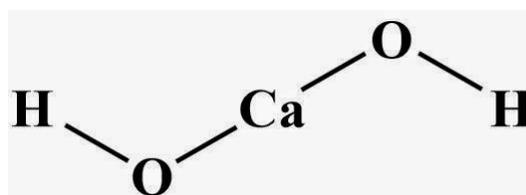
reduzindo a probabilidade de ingresso de agentes agressivos no interior do concreto, protegendo dessa forma a armadura da ação de agentes agressivos. Como SOKOLOVICZ (2013) relata, a redução de porosidade proporcionada pela alteração da microestrutura ocasiona um aumento da compactidade e, conseqüentemente, dificulta o ingresso de agentes agressivos.

Segundo SILVEIRA (1996), adições provenientes de materiais naturais são aquelas derivadas de rochas ou minerais vulcânicos (exceto as terras diatomáceas), que passam por processos de britagem, moagem e classificação, mas que possuem algumas impurezas que diminuem sua atividade pozolânica.

Já adições provenientes de resíduos ou subprodutos industriais são, na realidade, materiais que são utilizados na indústria de maneira secundária, podendo ou não sofrer algum processamento (SILVEIRA, 1996). Torna-se necessário salientar, que há diferenças entre resíduo e subproduto. Sabe-se que qualquer material acumulado que não tenha destinação, deve ser tratado como resíduo. Caso esse material tenha um destino, ele passa a ser considerado um subproduto.

SABIR et al. (2001, apud. REZENDE et al., 2012), relata que o cimento portland quando totalmente hidratado, produz cerca de 28% de seu peso em $Ca(OH)_2$, sendo que essa produção não interfere nas suas propriedades mecânicas, porém o excedente de $Ca(OH)_2$ reage com o material pozolânico, resultando em silicatos de cálcio adicionais que proporcionam as melhorias nas propriedades de durabilidade, vida útil, entre outras.

Figura 2 - Estrutura química (Hidróxido de Cálcio)



Fonte: Blog Patrícia Hoyos (2014)

Há vários tipos de adições minerais sendo utilizadas para melhoramento das propriedades do concreto, como por exemplo cinzas volantes, cinza da casca de arroz, metacaulim, entre outras.

O metacaulim surge como uma boa alternativa de substituição de parte do cimento portland, devido ao seu alto valor reativo frente ao hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento portland.

A seguir será detalhado o conceito de metacaulim já que o mesmo é parte integrante do objeto do estudo o qual este trabalho se refere.

2.2. Metacaulim

FIGUEIREDO et al. (2014) define o metacaulim como sendo um material pozolânico, altamente reativo, cuja mineralogia sílico-aluminosa retrata que sua constituição é de SiO_2 (50 a 55%) e Al_2O_3 (40 a 45%).

Devido a sua elevada área superficial específica, o metacaulim contribui para a retenção de água, aumento da coesão, redução da exsudação e segregação, o que acaba facilitando o acabamento final nas peças de concreto (MEDINA, 2011). Além disso, devido as suas partículas “superfinas” (em torno de 99% possuem diâmetro menor que $16\mu m$), o metacaulim quando incorporado ao concreto, melhora o empacotamento da matriz cimentícia através de um efeito de microfiller, o que leva a um refinamento da estrutura de poros do concreto (FIGUEIREDO et al., 2014), melhorando consideravelmente a durabilidade do mesmo.

Cabe salientar que a influência do metacaulim nas propriedades do concreto dependerá, além de sua pureza e consequente reatividade, do teor de cimento presente no concreto e do período e tipo de cura (REZENDE et al., 2012). Além disso, outro fator que deve ser destacado é o teor de metacaulim presente na mistura.

De acordo com vários autores, a substituição do cimento portland por metacaulim aumenta a resistência à compressão do concreto, isso dito para teores de substituição na ordem de 10 a 20%. Com relação as propriedades de durabilidade, a bibliografia não relata um percentual ideal ou limite para que a influência do metacaulim deixe de ser relevante.

Segundo OLIVEIRA; CASCUDO (2008), o teor ótimo de uma adição mineral ao concreto (em substituição ao cimento) é definido pela sua finura, de modo que quanto mais fino o material, menor o teor ótimo.

Além de todas as vantagens que as adições minerais (como o metacaulim) promovem no concreto, há também vantagens tanto no meio econômico como no meio socioambiental. Como CARMO; PORTELLA (2008) citam, um dos benefícios em se utilizar adições minerais é que há crescente busca pela redução na quantidade de aglomerantes hidráulicos usados, aumento da durabilidade do concreto e o uso de subprodutos industriais que estejam saturando aterros sanitários dos grandes centros urbanos. Além disso, há o fato da diminuição do consumo de

cimento e, por consequência, reduzindo a emissão de CO_2 para a atmosfera advindo da produção do cimento portland.

O metacaulim pode ser obtido através da calcinação em altas temperaturas – algo em torno de 800 °C, segundo Shvarzman et al. (2003, apud. MEDINA, 2011) - de argilas caulínicas e/ou caulins, em um processo que provoca a desidroxilação da estrutura da caulinita presente nos materiais, formando um material em fase de transição de alta reatividade (metacaulim). Devido a sua alta reatividade e finura, o interesse pela aplicação do metacaulim, seja como adição ou substituição do cimento, vem crescendo principalmente pelos resultados obtidos pela atividade como material pozolânico (SABIR et al., 2001), fazendo com que propriedades como resistência mecânica e porosidade adquiram ganhos significativos, por exemplo.

2.3. Cloretos

De acordo com TROIAN (2010), as armaduras de aço são protegidas pela massa de concreto que as envolvem dificultando dessa forma a corrosão das mesmas, num processo conhecido como passivação do aço. Essa passivação, conforme HELENE (1993), pode ser entendida como uma camada de óxidos que serve de barreira contra a corrosão.

Vários autores que abordam temas relacionados a durabilidade do concreto, apontam a ação de íons cloretos como um dos principais causadores da corrosão das armaduras do mesmo.

TRINDADE (2011), por exemplo, diz que o agente agressivo mais comum é o íon cloreto, o qual é considerado como um dos maiores causadores da corrosão prematura das armaduras nas estruturas de concreto, dessa forma influenciando diretamente na resistência à compressão, estabilidade global e, principalmente, na durabilidade do concreto.

Segundo AGUIAR (2006), existe muita controvérsia a respeito da quantidade de íons cloretos que é suficiente para romper a camada passivadora que envolve as armaduras e daí iniciar a corrosão das mesmas. A NBR 6118 (ABNT, 2014), por exemplo, não cita em nenhum momento a quantidade de cloretos considerada como perigosa para as armaduras de aço, porém ela faz um lembrete no tópico 6.3.3.2, como é mostrado a seguir.

“ Consiste na ruptura local da camada de passivação, causada por elevado teor de íon-cloro. As medidas preventivas consistem em dificultar o ingresso dos agentes agressivos ao interior do concreto. O cobrimento das armaduras e o controle da fissuração minimizam este efeito, sendo recomendável o uso de um concreto de pequena

porosidade. O uso de cimento composto com adição de escória ou material pozolânico é também recomendável nestes casos.”

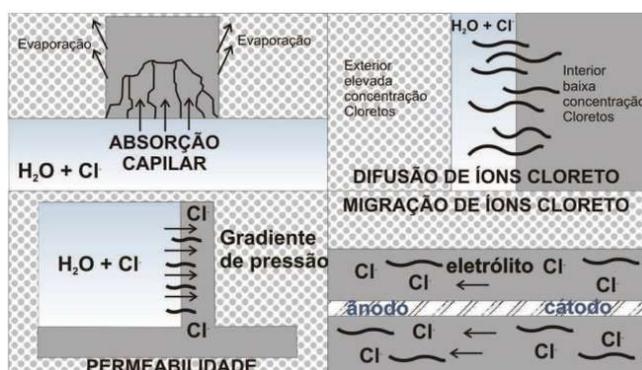
Como podemos perceber, a própria norma reguladora aconselha o uso de materiais pozolânicos como adição (ou substituição) no uso de cimentos. Como foi dito no tópico anterior, os materiais pozolânicos são excelentes materiais na produção de concreto devido a sua finura, principalmente. Devido a sua característica de material fino (por exemplo, o metacaulim é considerado um material superfino), as adições minerais promovem uma redução elevada na quantidade de vazios, o que reduz drasticamente a porosidade dos concretos que possuem esse tipo de material presente na sua estrutura.

A porosidade do concreto é uma característica que influencia bastante com relação a penetração de íons cloretos no interior do concreto. ANDRADE (1993 apud. TROIAN, 2010) diz que o concreto por apresentar uma estrutura porosa, não se torna uma barreira perfeita contra a penetração de agentes agressivos que podem promover a corrosão, o que leva a crer que dentro de algum tempo, a armadura será atacada e o processo de corrosão se iniciará.

CASCUDO (1997, apud. TROIAN, 2010) relata que os cloretos podem ser transportados para dentro do concreto através de absorção capilar, difusão, permeabilidade e migração. A figura 3 demonstra, de maneira resumida, como ocorre cada uma dessas formas de transporte.

Sabe-se que os cloretos atacam a armadura de maneira pontual, promovendo uma corrosão localizada, o que é extremamente perigoso, pois dessa forma não há avisos de que a armadura está sendo corroída e, por consequência, com o passar do tempo, poderá levar ao colapso da estrutura sem aviso prévio. A figura 4 mostra como é a atuação dos íons cloretos na atividade de corrosão da armadura de aço.

Figura 3 – Representação da forma de penetração dos íons cloretos



Fonte: Helene (1993, apud. TROIAN, 2010)

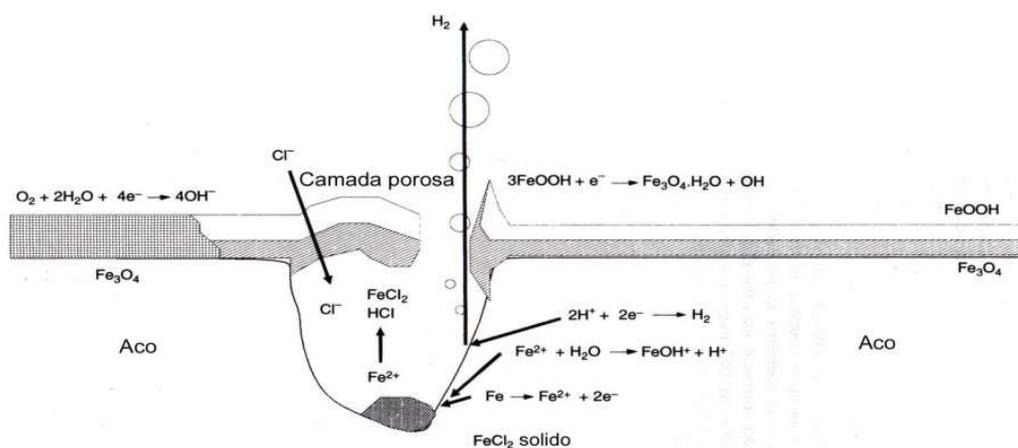
Como foi dito anteriormente, a microestrutura do concreto influencia diretamente na absorção de cloretos já que ela determina o quão poroso é o mesmo. Além da microestrutura, outro parâmetro bem importante é a capacidade de fixação de íons, por parte do concreto, pois esse parâmetro é benéfico ao concreto já que reduz substancialmente o transporte de cloretos no interior do mesmo, devido a formação do composto conhecido como sal de Friedel, a partir da reação química entre os íons cloretos e o aluminato tricálcico (C_3A), composto anidro presente no cimento portland. Dessa forma, percebe-se que cimentos que possuem maior quantidade de C_3A em sua composição são os mais indicados para garantir a integridade do aço em peças de concreto armado que estejam presentes em locais ricos em cloretos (FIGUEIREDO et al., 2014).

As adições minerais também possuem papel importante na criação do sal de Friedel, quando incorporados à mistura para obtenção do concreto. Acredita-se que isso se deve ao fato da alta quantidade de aluminatos presente na composição dos materiais pozolânicos. TALERO et al. (2011, apud. FIGUEIREDO et al., 2014) relata que durante seu estudo, a quantidade de sal de Friedel formado a partir da reação com a alumina reativa de cada pozolanas do seu estudo é bem maior do que aquela referente a reação entre os cloretos e o C_3A .

2.3.1. Testes para avaliação da penetração de íons cloreto de maneira direta

Há vários testes que possuem como objetivo testar a capacidade dos concretos de evitar a penetração de íons cloreto. Os métodos citados baseiam-se nos diversos meios de penetração e transporte de fluidos no concreto.

Figura 4 - Representação da ação dos íons cloretos no processo corrosivo da armadura



Fonte: Broomfield (1997, apud. SILVA e LIBORIO, 2005)

Salienta-se que não haverá descrição completa de todos os testes, sendo apenas descrito com maior profundidade, os testes de migração rápida, pois eles baseiam o teste que foi utilizado neste trabalho.

- **AASTHO T259 – Standard Method of test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration – Salt Ponding Test:** Esse teste consiste em submeter uma das faces de amostras com espessura menor a 75 mm, a uma solução de cloretos com 3% de NaCl por 90 dias seguidos, com suas faces laterais sendo totalmente seladas. No decorrer do teste, é medida a concentração de cloretos em cada fatia de 12,7 mm (0,5 polegadas). Segundo a literatura existente, esse método não é aconselhável para analisar a concentração de cloretos em CAD, já que a concentração de cloretos é muito baixa num período de 90 dias;

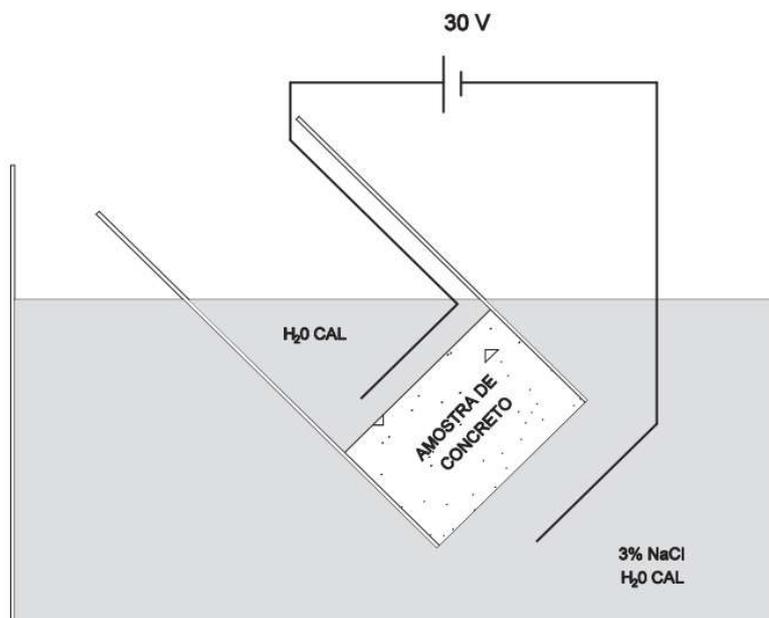
- **Nord Test NT Build 443 – Bulk Diffusion Test:** Procedimento semelhante ao especificado pela AASTHO T259, porém com algumas mudanças. Uma das modificações está na preparação da amostra, já que a mesma deve ser imersa numa solução de água e cal hidratada, para evitar uma sorção inicial. Além disso, outra modificação é que, além das faces laterais, a face inferior também deve ser selada. O tempo de duração é outro fator diferenciado. Para concretos convencionais, o teste deve ocorrer em 35 dias, apenas, porém para CAD, o teste deve durar até os 90 dias;

Devido a duração dos testes citados ser muito prolongada, com o passar dos anos métodos acelerados foram desenvolvidos por pesquisadores.

- **The Rapid Migration Test – CTH Test:** Proposto por TANG; NILSON (1991, apud. TROIAN, 2010), o teste consiste em aplicar uma tensão de 30V, em uma solução de NaCl não monitorada, e após 8 horas de ensaio a amostra é partida, sendo aspergidas com nitrato de prata, em concentração de 0,1N, logo em seguida. O nitrato de prata serve apenas como técnica colorimétrica para indicar a presença dos íons cloretos na amostra. A figura 5 demonstra como é a técnica do ensaio.

- **Nord Test NT build 492 – Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coeficiente from non-steady-state migration experiments:** Semelhante ao teste proposto por TANG; NILSON (1991), esse teste possui algumas modificações importantes. A tensão de 30V é utilizada apenas como tensão inicial, podendo ser corrigida de acordo com a corrente medida na amostra. Além disso, o tempo de teste é variável, dependente da corrente na amostra após a correção da tensão;

Figura 5 - Representação do CTH Test



Fonte: Tang; Nilson (1991, apud. TROIAN, 2010)

Há outros métodos, de acordo com a bibliografia, como os métodos de medição indireta, porém não serão citados devido a não possuírem relação alguma com o teste que baseia os resultados deste trabalho.

O presente trabalho utilizou como procedimento experimental o teste relatado na **NT build 492**. Apesar de não ser um teste muito utilizado por pesquisadores da área, devido ao que foi proposto a se estudar, o mesmo se adequou de maneira satisfatória, muito devido ao curto período de tempo do estudo.

3. METODOLOGIA

Metodologicamente, este trabalho é de cunho bibliográfico e para conhecer a importância da metodologia do determinado trabalho alguns conceitos serão expostos. E ao longo da revisão bibliográfica, teorias apontadas. Quanto a natureza aplicada com novos conhecimentos para prática, abordagens, objetivos e processos da pesquisa trata-se como descritiva.

Dentro desse processo descritivo, quanto ao método de abordagem do problema traz uma combinação do qualitativo e quantitativo, visto em trabalhos científicos como (quanti-quali), pois apresenta números como base e resultados através de percepções e análises, descrevendo a complexidade do determinante e a interação de variáveis.

Como procedimento a pesquisa de laboratório coleta informações relevantes, valorizando a observação do fenômeno que gerará dados para poderem embasar o trabalho por si só. Analisando ou observando de forma direta ou indireta o estudo de caso se preocupa com dados numéricos, pois a partir deles, as conclusões acerca do estudo em questão serão retiradas.

A importância metodológica de um trabalho pode ser justificada pela necessidade de embasamento científico adequado, pela busca da melhor abordagem para endereçar as questões da pesquisa (MIGUEL, 2010).

Já sobre o tipo qualitativo temos a seguinte definição:

O estudo qualitativo é o fato de não ter como objetivo principal números e ou medir os eventos estudados, nem emprega instrumentos estatístico na análise de dados. Ao contrário, o estudo envolve obtenção de dados descritos por pessoas, a análise de lugares e processos interativos por contato direto do pesquisador com a situação estudada, procurando atender os fenômenos segundo a perspectiva dos sujeitos (GODOY, 1995).

Ainda segundo GODOY (1995, p.22-23):

Partindo de questões amplas que vão se aclarando no decorrer da investigação, o estudo qualitativo pode, no entanto, ser conduzido através de diferentes caminhos. Considerando que a abordagem qualitativa, enquanto exercício de pesquisa, não se apresenta como uma proposta rigidamente estruturada, ela permite que a imaginação e a criatividade levem os investigadores a propor trabalhos que explorem novos enfoques.

No sentido descritivo:

HYMANN (1967), indica pesquisa como descritiva, na qual descreve um fenômeno e registra a maneira que ocorre e, também como experimental, quando há interpretações

e avaliações na aplicação de determinados fatores ou simplesmente dos resultados já existentes dos fenômenos.

Já no sentido quantitativo:

Seguindo ensinamentos de RICHARDSON (1989), este método caracteriza-se pelo emprego da quantificação, tanto nas modalidades de coleta de informações, quanto no tratamento dessas através de técnicas estatísticas, desde as mais simples até as mais complexas. Conforme supramencionado, ele possui como diferencial a intenção de garantir a precisão dos trabalhos realizados, conduzindo a um resultando com poucas chances de distorções.

Nessa sequência, a metodologia apresentada é mais apropriada para analisar o quanto determinados tipos de concreto são resistentes a ação dos íons cloretos, tendo como objetos de estudo 8 (oito) traços, sendo 4 (quatro) de concretos convencionais e 4 (quatro) de CAD. Além disso, a metodologia apresentada será utilizada para avaliar a influência da cura na durabilidade do concreto.

4. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Neste item serão apresentadas todas as características dos materiais utilizados para elaboração dos traços de concretos, bem como sua produção. Cabe salientar que todos os materiais foram adquiridos na região da cidade de João Pessoa, capital do estado da Paraíba.

4.1. Água

A água utilizada para elaboração dos traços de concreto foi proveniente da rede pública de abastecimento da CAGEPA – Companhia de Água e Esgotos da Paraíba.

4.2. Cimento

O cimento utilizado para elaboração dos traços de concreto convencional foi o cimento portland CP II-Z 32 da marca ZEBU.

Na tabela 1, mostrada a seguir, são apresentadas as características fornecidas pelo fabricante.

Tabela 1 – Características físicas, químicas e mecânicas do CP II-Z 32

COMPONENTE	FAIXA DE CONCENTRAÇÃO (%)
Silicato Tricálcico	20 - 70
Silicato Dicálcico	10 - 60
Ferro-Aluminato de Cálcio	5 - 15
Sulfato de Cálcio	2 - 8
Aluminato Tricálcico	1 - 15
Carbonato de Cálcio	0 - 10
Óxido de Magnésio (livre)	0 - 6
Óxido de Cálcio (livre)	0 - 3
pH em solução aquosa	12 ≤ pH ≤ 14
Massa específica (g/cm ³)	2,8 - 3,2
Massa unitária (g/cm ³)	0,9 - 1,2

4.3. Agregado miúdo

Durante a elaboração dos traços foi utilizada areia de origem quartzosa, proveniente da região da cidade de João Pessoa. Salienta-se que todo o material utilizado no ensaio para se obter as características físicas da areia, foi previamente seco em estufa a 100 °C por 2 dias.

Os ensaios de massa unitária e massa específica seguiram as normas NBR NM 45 – Método C (ABNT, 2006) e NBR NM 52 (ABNT, 2003), respectivamente.

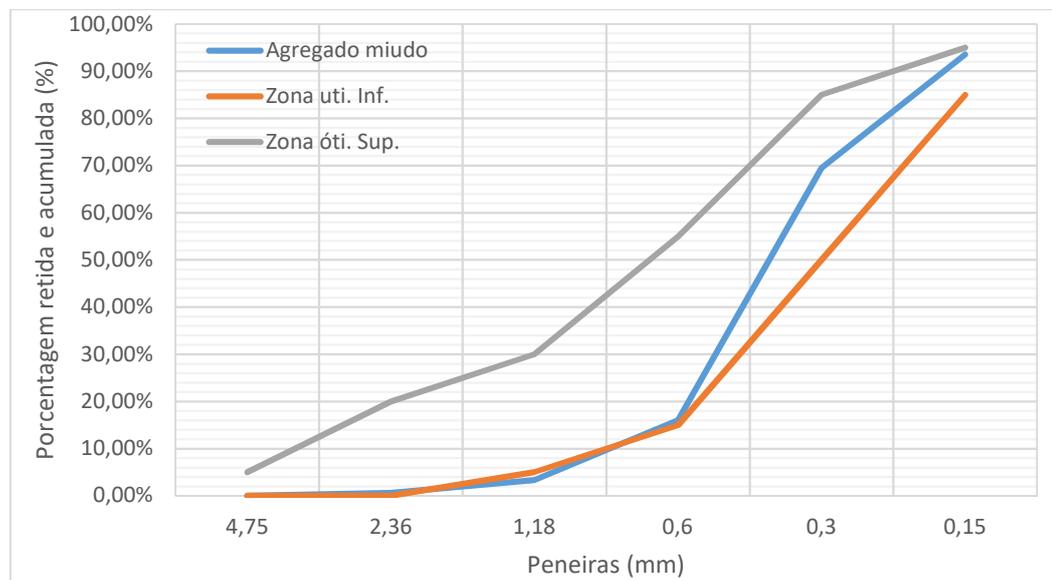
Os ensaios de determinação da granulometria, diâmetro máximo característico e módulo de finura seguiram a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Na tabela 2, mostrada a seguir, são apresentadas as características físicas do agregado miúdo.

Tabela 2 - Características físicas – Agregado Miúdo

Peneiras (mm, µm)	Peso retido (g)	P. retida (%)	P. Retida Acumulada (%)
4,75	0,0	0,00%	0,00%
2,36	6,5	0,65%	0,65%
1,18	26,5	2,66%	3,32%
0,6	126,5	12,71%	16,02%
0,3	532,7	53,52%	69,54%
0,15	239,0	24,01%	93,55%
Resíduo	64,2	6,45%	100,00%
Total	995,4	100%	-
Módulo de finura			2,83
D. máx. característico (mm)			1,18
Massa unitária (g/cm³)			1,56
Massa específica (g/cm³)			2,66

Figura 6 - Curva Granulométrica - Agregado Miúdo



Pela distribuição granulométrica e demais parâmetros, de acordo com NBR 7211 (ABNT, 2005), o agregado miúdo utilizado enquadra-se como sendo ótimo, sendo apropriado para ser utilizado na produção de concretos.

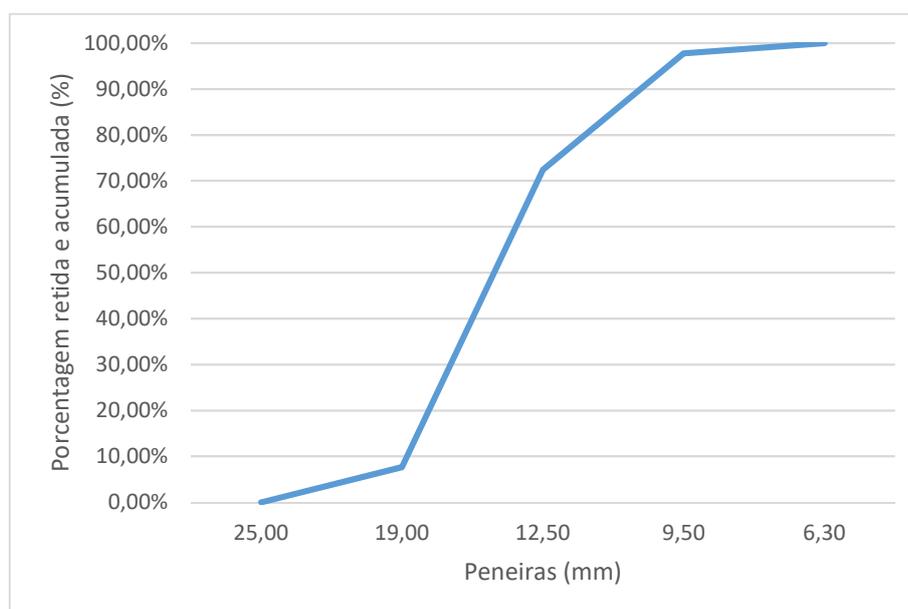
4.4. Agregado graúdo

Para o agregado graúdo foi utilizada brita de origem basáltica, cujas características físicas estão demonstradas na tabela 3. O mesmo foi previamente lavado para retirada de impurezas e finos, e colocado para secar ao ar livre.

Tabela 3 - Características físicas – Agregado Graúdo

Peneiras (mm)	Peso retido (g)	P. retida (%)	P. Retida Acumulada (%)
25,00	0,0	0,00%	0,00%
19,00	385,0	7,70%	7,70%
12,50	3235,0	64,70%	72,40%
9,50	1270,0	25,40%	97,80%
6,30	110,0	2,20%	100,00%
Total	5000,0	100%	-
Módulo de finura			2,78
D. máx. característico (mm)			19,00
Massa unitária (g/cm³)			1,40
Massa específica (g/cm³)			2,77

Figura 7 - Curva Granulométrica - Agregado Graúdo



Pela distribuição granulométrica e demais parâmetros, de acordo com NBR 7211 (ABNT, 2005), o agregado graúdo utilizado é classificado na faixa granulométrica compreendida entre 9,5 e 25 mm.

4.5. Metacaulim

O metacaulim utilizado no processo de obtenção dos concretos foi o fornecido pela empresa metacaulim BZ. As características do mesmo estão expostas na tabela 4.

Tabela 4 - Características físicas, químicas e mecânicas - Metacaulim

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	
RETENÇÃO EM PENEIRA ASTM 200	1%
FINURA BLAINE	1500 m ² / kg
COR	Rosa
NOME QUÍMICO	Silicato de Alumínio
ESTABILIDADE	Estável
PERCENTAGEM MÉDIA	
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	$\geq 95\%$
PERDA AO FOGO (L.O.I.)	$\leq 2\%$

4.6. Traços utilizados

Para o Concreto Convencional utilizou-se um traço de 1:1,3:1,6 e fator água/cimento máximo de 0,40. Esse traço foi obtido com o objetivo de o concreto possuir resistência à compressão de 25 MPa aos 28 dias de vida. Além disso, substituiu-se o cimento por metacaulim nas proporções de 10%, 20% e 30%. Salienta-se que foram moldados 8 corpos de prova para cada tipo de traço, com dimensões de 100mm de diâmetro e 200mm de altura, e que 4 foram submetidos à cura úmida e 4 não foram submetidos a qualquer tipo de cura. A tabela 5 mostra um resumo das moldagens feitas com Concreto Convencional.

Tabela 5 - Resumo das moldagens - Concreto Convencional

TRAÇO	C (KG)	B (KG)	A (KG)	ÁGUA (L)	MET. (%)	MET. (KG)	QTDE. CP'S	DATA DA MOLDAGEM
CP - 0	9,0	14,4	11,7	3,6	0,0	0,0	8	26/04/2018
CP - 10	8,1	14,4	11,7	3,6	10,0	0,9	8	27/04/2018
CP - 20	7,2	14,4	11,7	3,6	20,0	1,8	8	27/04/2018
CP - 30	6,3	14,4	11,7	3,6	30,0	2,7	8	27/04/2018
TOTAL	30,6	57,6	46,8	14,4	-	5,4	32	-

Onde: **CP - 0** - corpos de prova do traço com nenhuma substituição;

CP - 10 - corpos de prova do traço com 10% de substituição;

CP - 20 - corpos de prova do traço com 20% de substituição;

CP - 30 - corpos de prova do traço com 30% de substituição;

C – Cimento;

B – Brita;

A – Areia;

MET – metacaulim;

Para o CAD, utilizou-se 4 tipos de traços diferentes, sendo os materiais componentes de cada um, mostrados na tabela 6 a seguir. Além disso, substituiu-se o cimento por metacaulim na proporção de 20%. Salienta-se que foram moldados 4 corpos de prova para cada tipo de traço, com dimensões de 100mm de diâmetro e 200mm de altura, e que todos foram submetidos à cura úmida.

Tabela 6 - Resumo das moldagens – Concreto de Alto Desempenho

TRAÇO	C (kg)	MET (kg)	A (kg)	B (kg)	ÁGUA (L)	SP (kg)
CPM1	26,3	6,7	36,8	30,2	13,9	0,5
CPM5	19,9	5,1	38,5	36,5	10,5	0,4

Onde: **CPM1** - corpos de prova do traço 1;

CPM5 - corpos de prova do traço 2;

C – Cimento;

B – Brita;

A – Areia;

MET – metacaulim;

SP – Super Plastificante;

Salienta-se que foram utilizados mais dois traços para moldagem de corpos de prova com CAD. Os mesmos, no item 7 estão apresentados como CPM6 e CPM7, porém os mesmos possuem a mesma composição do CPM5, e devido a isso não foram colocados na tabela 6.

4.7. Equipamentos e materiais usados no teste de migração

Para fabricação e moldagem dos corpos de prova utilizou-se os equipamentos dispostos na tabela 7.

Tabela 7 - Equipamentos utilizados na fabricação e moldagem

Equipamento	Qtde.
Betoneira de eixo vertical	1
Moldes cilíndricos (D = 100mm, H = 200mm)	32
Balança de precisão (Precisão de 0.1g)	2
Baldes plásticos (V = 15L)	4
Pá	1
Colher de pedreiro (nº 10)	1

Na tabela 8 são demonstrados todos os materiais e equipamentos utilizados durante a realização do teste de migração. Salienta-se que os materiais e equipamentos demonstrados na tabela 8, são relativos a uma amostra de 3 provetes, e não os quantitativos totais.

Tabela 8 - Equipamentos utilizados durante o teste de migração

Equipamento / Material	Qtde.
Fonte 60V	1
Reservatório Catódico (V = 12L)	1
Balança de precisão (Precisão de 0.1g)	1
Termômetro	1
Manga de Borracha de Silicone	3
Placa catódica de aço inoxidável	1
Placa anódica de aço inoxidável	3
Multímetro	1
Sal de cozinha (kg)	1
Hidróxido de Sódio (NaOH) (g)	18

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A seguir, será relatado os procedimentos utilizados para realização da moldagem dos corpos de prova e, em seguida, os procedimentos utilizados para realização do teste de migração de cloretos.

5.1. Moldagem dos corpos de prova

Para realização da moldagem dos corpos de prova dos traços de concreto convencional, segue-se um padrão na ordem da mistura. Para isso, foram seguidos os seguintes passos, descritos a seguir:

a) Em primeiro lugar, colocou-se toda a quantidade de brita dentro da betoneira, metade da quantidade de água, a quantidade total de cimento e, por fim, a quantidade de areia com a outra metade da quantidade de água. Nos traços em que houve substituição do cimento pelo metacaulim, com teores de 20 e 30%, foi necessária a inclusão do aditivo super plastificante. O teor utilizado foi de 0,5%, apenas;

b) Em seguida, os corpos de prova foram moldados conforme recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015), com adensamento manual, com 12 golpes distribuídos em cada uma das duas camadas. Para cada traço de concreto convencional foram moldados 8 corpos de prova, em moldes metálicos com 100mm de diâmetro e 200mm de altura, cada;

c) Em seguida, 4 corpos de prova de cada traço foram submetidos a cura úmida durante 28 dias e, os outros 4 corpos de prova não foram submetidos a algum tipo de cura;

5.2. Teste de migração de cloretos

Para se realizar o teste de migração de cloretos, utilizou-se o procedimento descrito na **NT build 492**, como já foi dito anteriormente. A seguir será relatado o procedimento desde o início, na obtenção das amostras de concreto, até o final, na obtenção do coeficiente de difusão em regime não estacionário.

a) Inicialmente, após definir os corpos de prova que serão utilizados no teste, deve-se obter dois provetes com 5 cm de altura. Isso é feito a partir do corte em distâncias previamente definidas. As distâncias são, respectivamente: 2.3, 7.7, 12.3 e 17.7 cm. As medidas devem ser marcadas a partir da face inferior ou superior do corpo de prova. A figura 8 demonstra como é feita essas marcações;

Figura 8 - Marcação das medidas no corpo de prova para obtenção das amostras



Fonte: Própria (2018)

b) Em seguida, com o auxílio de uma serra mármore ou qualquer objeto que possa cortar, corta-se o corpo de prova nas marcações, com o intuito de se retirar as amostras, como mostra a figura 9. Na figura 10, mostra-se um exemplo de provete após o corte.

Figura 9 - Técnico do LABEME cortando os corpos de prova



Fonte: Própria (2018)

Figura 10 - Exemplo de provete após o corte



Fonte: Própria (2018)

c) Após isso, mergulha-se 3 provetes numa solução de CaO hidratada e água. Não se definiu uma proporção exata, entre água e quantidade de CaO, cabe salientar. Os mesmos devem ficar imersos dentro dessa solução por 16 horas, pelo menos;

Figura 11 - Solução de CaO com água (provetes imersos)



Fonte: Própria (2018)

d) Após a retirada dos corpos de prova da solução de CaO e água, o próximo passo é isolar as laterais das amostras. Isso é feito através do uso de uma manga de borracha rígida, com o auxílio de abraçadeiras de rosca sem fim. O objetivo é fazer com que as laterais das amostras não permitam a passagem de qualquer substância líquida, pois como será descrito mais à frente, não deverá haver contato entre as soluções catódica e anódica. A figura 12 mostra como o resultado final, após o uso das abraçadeiras e da manga de borracha;

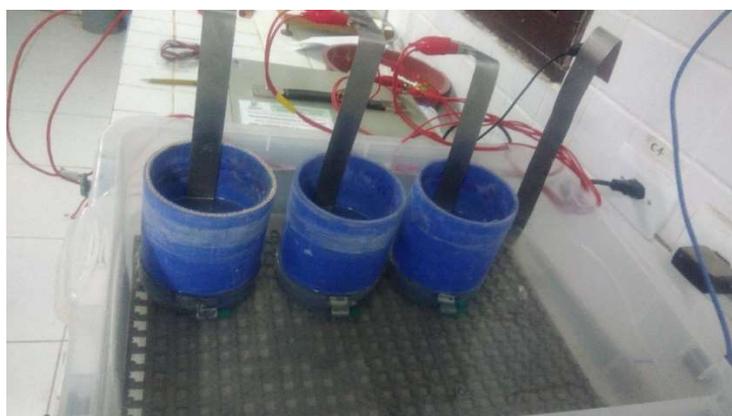
Figura 12 - Provetes isolados



Fonte: Própria (2018)

e) Após isso, prepare-se duas soluções. Uma solução catódica, que será composta por 1 kg de sal de cozinha (NaCl) e 9 litros de água. E uma solução anódica, que será composta por 300 g de água e 6 g de hidróxido de sódio (NaOH). Com as soluções prontas, coloque as amostras dentro de um reservatório (reservatório catódico) que possui no seu interior uma placa de aço inoxidável (placa catódica) e a solução catódica. Na face superior de cada provete, coloque uma placa de aço inoxidável (placa anódica), além da solução anódica;

Figura 13 - Esquema de teste (solução catódica e anódica nas amostras)



Fonte: Própria (2018)

f) Na sequência, o teste de migração é iniciado. Para isso, deve-se inicialmente ajustar a fonte elétrica com uma voltagem de 30 V. Após isso, deve-se verificar com o auxílio de um multímetro, se a mesma está realmente gerando a voltagem no valor pré-fixado. Em caso positivo, se faz a ligação entre a placa de aço inoxidável (ânodo) que está na face superior de cada provete, a placa de aço inoxidável (cátodo) que está submersa na solução catódica e a fonte. Isso é feito através de cabos que possuem em suas extremidades garras do tipo “jacaré”. A figura 14 mostra como essa ligação deve ser realizada;

Figura 14 - Esquema de ligação para passagem de corrente



Fonte: Própria (2018)

g) Após a ligação, assim como foi feito com a fonte, com o auxílio de um multímetro verifica-se a voltagem que está sendo repassada para cada provete. Caso não haja uma variação significativa entre as voltagens das amostras, prossegue-se o teste;

h) Não havendo variação significativa entre as voltagens medidas nas amostras, o próximo passo é a verificação da corrente que percorre cada provete quando o mesmo está ligado à fonte. Com o auxílio do multímetro, verifica-se essa corrente (corrente inicial do teste). Caso não haja variação significativa, assim como na voltagem, deve-se partir para o próximo passo. A figura 15 mostra a medição da corrente em um provete;

i) De posse da corrente inicial, utiliza-se a tabela 9 para corrigir-se a voltagem aplicada durante o teste. Verifica-se em qual intervalo a corrente medida se encaixa (primeira coluna), após isso, aplica-se o valor da nova voltagem (segunda coluna);

Figura 15 - Esquema de medição da corrente em um provete



Fonte: Própria (2018)

Tabela 9 - Diferença de potencial e duração do ensaio de migração de um provete

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

Fonte: LNEC E 463 (2004)

j) Repete-se os passos f, g e h, sendo que no passo h ao invés de verificar a corrente pela primeira coluna da tabela 9, deverá ser verificada com base nos valores da terceira coluna (Nova corrente inicial admissível). Caso a nova corrente de algum provete esteja fora do intervalo atribuído à voltagem aplicada, este deve ser retirado do teste;

k) Após a verificação da corrente atuante, estima-se a duração total do ensaio a partir da tabela 9 (quarta coluna). Com o tempo de ensaio completado, deve-se repetir os passos g e h, com o intuito de se obter as voltagens e correntes finais em cada provete. A figura 16 mostra a configuração final do teste;

Figura 16 - Configuração final do teste



Fonte: Própria (2018)

l) Retira-se as amostras das soluções e prossegue-se ao rompimento por compressão diametral. O objetivo do rompimento por compressão diametral é separar o provete em duas partes. Para realização do teste de compressão diametral utilizou-se duas barras de ferro (uma na parte superior e outra na parte inferior da amostra, conforme figura 17), com o objetivo de fazer com que a carga aplicada fosse distribuída uniformemente pela extensão da altura da amostra;

Figura 17 - Teste de compressão diametral



Fonte: Própria (2018)

m) Após o rompimento por compressão diametral, escolhe-se uma das partes (a que estiver com melhor planicidade) para identificar a profundidade de penetração dos cloretos. Para fazer essa identificação, asperge-se nitrato de prata por toda a área superficial do rompimento, esperando no mínimo 15 minutos para ocorrer a reação entre os cloretos e o nitrato de prata. O nitrato de prata quando reage com íons cloretos apresenta uma cor clara (rosada), aproximando-se do branco, como mostra a figura 18;

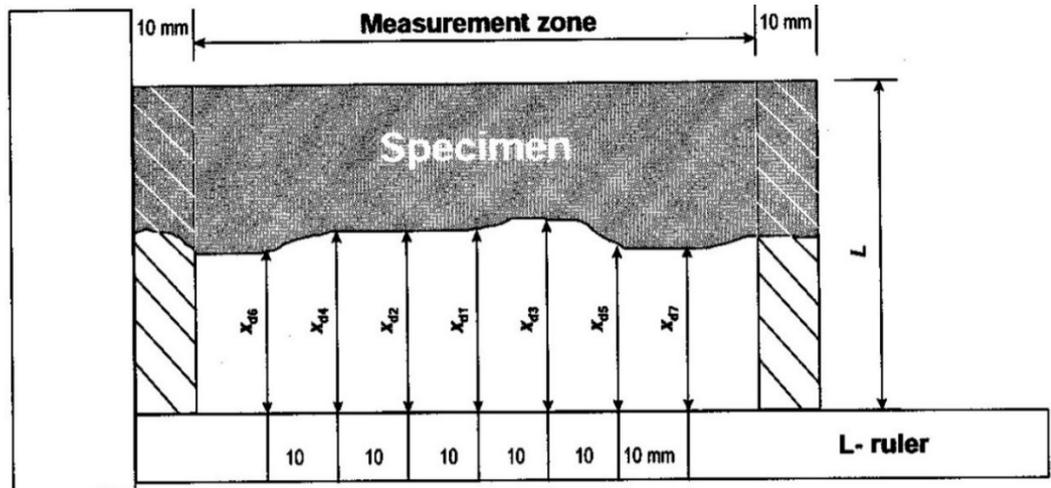
Figura 18 - Área de reação do nitrato de prata com os cloretos



Fonte: Própria (2018)

n) Faz-se 7 medidas da profundidade de cloretos ao longo do diâmetro da amostra, sendo cada uma feita a cada 10 mm, desconsiderando os primeiros 10 mm (bordas) devido ao efeito de borda, e qualquer medida que seja impossibilitada devido a presença de agregado. A figura 19 demonstra o esquema para se fazer essas medições;

Figura 19 - Ilustração da medição das profundidades de penetração dos cloretos



Fonte: LNEC E 463 (2004)

o) Por fim, com todas as medidas realizadas, utiliza-se a equação 1 para se obter o coeficiente de difusão dos cloretos no estado não estacionário;

$$D = \frac{0,0239 \cdot (273 + T) \cdot L}{(U - 2) \cdot t} * \left[x_d - 0,0238 * \sqrt{\frac{(273 + T) \cdot L \cdot x_d}{U - 2}} \right] \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

D, é o coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário, em $\times 10^{-12} m^2/s$;

U, é o valor absoluto da voltagem aplicada, em V (volts);

T, é o valor médio das temperaturas inicial e final no ânodo, em °C;

L, é a espessura da amostra, em mm;

x_d , é o valor médio da profundidade de penetração, em mm;

t, é a duração do ensaio, em horas;

6. RESULTADOS

Após a realização do experimento, seguindo à risca todos os procedimentos descritos no item anterior, obteve-se os resultados apresentados a seguir.

6.1. Solução CaO e Água

Tabela 10 - Data e horários dos corpos de prova de concretos convencionais

CP	Solução CaO + H ₂ O			
	Data - Entrada	Hora - Entrada	Data - Saída	Hora - Saída
CP - 0 - I S	30/05/2018	17:09	31/05/2018	18:20
CP - 0 - II S	30/05/2018	17:09	31/05/2018	18:20
CP - 0 - III S	30/05/2018	17:09	31/05/2018	18:20
CP - 0 - I C	31/05/2018	18:23	01/06/2018	20:05
CP - 0 - II C	31/05/2018	18:23	01/06/2018	20:05
CP - 0 - III C	31/05/2018	18:23	01/06/2018	20:05
CP- 10 - I S	05/06/2018	20:45	06/06/2018	16:40
CP- 10 - II S	05/06/2018	20:45	06/06/2018	16:40
CP- 10 - III S	05/06/2018	20:45	06/06/2018	16:40
CP- 20 - I S	06/06/2018	21:35	07/06/2018	18:22
CP- 20 - II S	06/06/2018	21:35	07/06/2018	18:22
CP- 20 - III S	06/06/2018	21:35	07/06/2018	18:22
CP- 30 - I S	07/06/2018	21:35	08/06/2018	19:40
CP- 30 - II S	07/06/2018	21:35	08/06/2018	19:40
CP- 30 - III S	07/06/2018	21:35	08/06/2018	19:40
CP- 10 - I C	08/06/2018	20:35	09/06/2018	20:25
CP- 10 - II C	08/06/2018	20:35	09/06/2018	20:25
CP- 10 - III C	08/06/2018	20:35	09/06/2018	20:25
CP- 20 - I C	09/06/2018	20:30	10/06/2018	20:30
CP- 20 - II C	09/06/2018	20:30	10/06/2018	20:30
CP- 20 - III C	09/06/2018	20:30	10/06/2018	20:30
CP- 30 - I C	10/06/2018	20:30	11/06/2018	20:30
CP- 30 - II C	10/06/2018	20:30	11/06/2018	20:30
CP- 30 - III C	10/06/2018	20:30	11/06/2018	20:30

Onde:

CP - 0 – Corpo de prova de concreto convencional com 0% de substituição da massa de cimento por metacaulim;

CP - 10 - Corpo de prova de concreto convencional com 10% de substituição da massa de cimento por metacaulim;

CP - 20 - Corpo de prova de concreto convencional com 20% de substituição da massa de cimento por metacaulim;

CP - 30 - Corpo de prova de concreto convencional com 30% de substituição da massa de cimento por metacaulim;

S – Sem cura;

C – Com cura úmida por 28 dias;

Tabela 11 - Data e horários dos corpos de prova de CAD

CP	Solução CaO + H ₂ O			
	Data - Entrada	Hora - Entrada	Data - Saída	Hora - Saída
CPM5 - I*	09/05/2018	17:18	10/05/2018	12:39
CPM5 - I**	09/05/2018	17:18	10/05/2018	12:39
CPM5 - II*	09/05/2018	17:18	10/05/2018	12:39
CPM5 - II**	14/05/2018	17:37	15/05/2018	11:53
CPM6 - I*	14/05/2016	17:37	15/05/2018	11:54
CPM6 - I**	14/05/2018	17:37	15/05/2018	11:55
CPM6 - II*	16/05/2018	17:30	17/05/2018	13:09
CPM6 - II**	16/05/2018	17:30	17/05/2018	13:09
CPM7 - I*	20/05/2018	11:20	21/05/2018	12:32
CPM7 - I**	20/05/2018	11:20	21/05/2018	12:32
CPM7 - II*	20/05/2018	11:20	21/05/2018	12:32
CPM7 - I**	21/05/2018	18:44	22/05/2018	14:46
CPM7 - II**	21/05/2018	18:44	22/05/2018	14:46
CPM1 - I*	21/05/2018	18:44	22/05/2018	14:46
CPM1 - I**	22/05/2018	18:42	30/05/2018	16:32
CPM1 - II*	22/05/2018	18:42	30/05/2018	16:32
CPM1 - II**	22/05/2018	18:42	30/05/2018	16:32

Onde:

CPM1 – Corpo de prova de CAD do traço 1;

CPM5 – Corpo de prova de CAD do traço 5;

CPM6 – Corpo de prova de CAD do traço 6;

CPM7 – Corpo de prova de CAD do traço 7;

I* - Amostra n° 1 retirado do corpo de prova n° 1;

I** - Amostra n° 2 retirado do corpo de prova n° 1;

II* - Amostra n° 1 retirado do corpo de prova n° 2;

II** - Amostra n° 2 retirado do corpo de prova n° 2;

6.2. Teste de Migração

Nas tabelas 12 e 13 estão apresentadas, respectivamente, as voltagens e correntes medidas nos corpos de prova moldados com concretos convencionais e nos corpos de prova moldados com CAD.

Tabela 12 - Correntes e voltagens em corpos de prova (concreto convencional)

CP	Voltagens e Correntes					
	Vi (V)	Ii (mA)	Vc (V)	Ic (mA)	Vf (V)	If (mA)
CP - 0 - I S	29,8	132,6	19,8	86,4	19,8	82,1
CP - 0 - II S	29,6	98,0	19,8	64,3	19,7	73,7
CP - 0 - III S	29,4	100,6	19,6	66,1	19,5	64,5
CP - 0 - I C	29,7	120,7	19,6	80,0	19,6	67,4
CP - 0 - II C	29,6	112,7	19,7	72,9	19,7	75,2
CP - 0 - III C	29,7	89,7	19,8	59,2	19,8	66,5
CP - 10 - I S	29,7	41,7	29,7	41,7	29,6	53,4
CP - 10 - II S	29,8	44,5	29,8	44,5	29,8	54,4
CP - 10 - III S	29,7	42,1	29,7	42,1	29,7	54,7
CP - 10 - I C	29,9	35,9	34,8	43,4	34,7	75,6
CP - 10 - II C	29,8	31,4	34,8	37,3	34,7	62,3
CP - 10 - III C	29,8	39,5	34,5	46,6	34,4	58,5
CP - 20 - I S	29,6	15,6	39,9	21,3	39,8	48,6
CP - 20 - II S	30,0	26,5	39,9	38,3	39,9	52,6
CP - 20 - III S	29,6	25,3	39,8	34,8	39,8	43,2
CP - 20 - I C	29,9	17,6	49,9	30,4	49,6	56,0
CP - 20 - II C	29,9	16,4	49,9	28,1	49,8	43,8
CP - 20 - III C	29,8	15,3	49,8	26,6	49,7	46,7
CP - 30 - I S	30,0	24,0	39,8	32,7	39,7	120,5
CP - 30 - II S	30,0	35,8	39,8	48,8	39,7	102,5
CP - 30 - III S	30,0	21,5	39,8	29,8	39,7	94,6
CP - 30 - I C	29,7	14,3	59,7	29,7	59,6	73,5
CP - 30 - II C	29,8	13,4	59,9	27,7	59,7	63,3
CP - 30 - III C	29,6	16,9	59,6	35,7	59,5	95,2

Onde:

Ii – Corrente inicial, medida com auxílio de um multímetro;

Ic – Corrente corrigida, medida com auxílio de um multímetro;

If – Corrente final, medida com auxílio de um multímetro;

Vi – Voltagem inicial, medida com auxílio de um multímetro;

Vc – Voltagem corrigida, medida com auxílio de um multímetro;

Vf – Voltagem final, medida com auxílio de um multímetro;

Tabela 13 - Correntes e voltagens em corpos de prova (CAD)

CP	Voltagens e Correntes					
	Vi (V)	Ii (mA)	Vc (V)	Ic (mA)	Vf (V)	If (mA)
CPM1 - I*	30,0	17,6	32,7	20,6	-	-
CPM1 - I**	29,9	17,6	49,8	31,2	49,7	43,4
CPM1 - II*	29,6	14,9	49,5	26,1	49,7	38,5
CPM1 - II**	29,9	20,0	49,9	34,1	49,8	39,5
CPM5 - I*	29,9	270,0	10,0	71,7	10,0	35,5
CPM5 - I**	29,9	260,0	10,0	71,1	10,0	35,8
CPM5 - II*	29,9	220,0	10,0	60,5	10,0	30,1
CPM5 - II**	30,0	51,4	32,9	58,7	33,0	65,7
CPM6 - I*	29,8	39,1	32,9	26,2	32,9	52,1
CPM6 - I**	29,6	16,2	32,8	18,3	32,9	19,1
CPM6 - II*	29,9	39,7	32,9	42,7	32,7	50,0
CPM6 - II**	29,7	17,3	32,9	20,6	32,6	50,0
CPM7 - I*	29,9	45,4	29,7	45,2	29,8	51,3
CPM7 - I**	29,8	18,3	-	-	-	-
CPM7 - II*	30,0	48,5	29,7	49,0	29,9	34,0
CPM7 - I**	30,0	21,1	32,6	23,5	-	-
CPM7 - II**	29,9	17,4	32,7	19,6	-	-

Onde:

Ii – Corrente inicial, medida com auxílio de um multímetro;

Ic – Corrente corrigida, medida com auxílio de um multímetro;

If – Corrente final, medida com auxílio de um multímetro;

Vi – Voltagem inicial, medida com auxílio de um multímetro;

Vc – Voltagem corrigida, medida com auxílio de um multímetro;

Vf – Voltagem final, medida com auxílio de um multímetro;

6.3. Penetração dos íons cloretos

Nesta seção são apresentadas, nas tabelas 14 e 15, as medidas de profundidade que demonstram o quanto os cloretos penetraram no interior das amostras durante o teste de migração. Os valores nulos apresentados nas tabelas, correspondem aos locais onde haviam agregados que impossibilitavam a medição, sendo descartados no cálculo da média final (assim como estipula a **NT build 492**).

Tabela 14 - Profundidade de penetração de cloretos (concreto convencional)

CP	Medidas (mm)							Média
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	
CP - 0 - I S	27	27	28	28	27	31	31	28,43
CP - 0 - II S	26	24	24	28	24	20	0	24,33
CP - 0 - III S	30	30	29	0	20	27	28	27,33
CP - 0 - I C	21	23	25	25	25	24	26	24,14
CP - 0 - II C	23	23	0	23	30	19	22	23,33
CP - 0 - III C	25	0	23	16	17	25	0	21,20
CP - 10 - I S	13	10	11	10	12	11	13	11,43
CP - 10 - II S	12	13	11	9	11	7	15	11,14
CP - 10 - III S	16	11	11	11	11	11	11	11,71
CP - 10 - I C	12	10	9	0	0	12	0	10,75
CP - 10 - II C	10	7	7	11	14	7	8	9,14
CP - 10 - III C	10	12	0	0	10	11	11	10,80
CP - 20 - I S	7	0	4	0	6	0	0	5,67
CP - 20 - II S	0	5	4	5	4	0	0	4,50
CP - 20 - III S	4	6	6	4,5	9	7	0	6,08
CP - 20 - I C	7	7	0	0	5	0	7	6,50
CP - 20 - II C	10	0	4	6	7	4	4	5,83
CP - 20 - III C	7	6	7	7	0	7	7	6,83
CP - 30 - I S	10	7	6	6	8	8	0	7,50
CP - 30 - II S	0	5	6	7	6	6	9	6,50
CP - 30 - III S	0	8	12	6	8	0	0	8,50
CP - 30 - I C	0	11	11	12	14	7	0	11,00
CP - 30 - II C	6	0	6	13	7	0	0	8,00
CP - 30 - III C	11	11	11	10	12	0	0	11,00

Tabela 15 - Profundidade de penetração de cloretos (CAD)

CP	Medidas (mm)							Média
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	
CPM1 - I*	0	0	3	7	7	5	0	5,5
CPM1 - I**	7	5	4	4	4	7	10	5,86
CPM1 - II*	6	5	0	5	8	6	7	6,17
CPM1 - II**	9	16	6	5,5	8,5	6	8	8,43
CPM5 - I*	1	1	2	2	4	4	2	2,29
CPM5 - I**	5	4	2	1	2	2	1	2,43
CPM5 - II*	0	0	0	0	0	0	0	0
CPM5 - II**	2	2	2,5	5	2	0	3,5	2,83
CPM6 - I*	8	7	6	6	8	7	8	7,14
CPM6 - I**	4	4	5	0	5	5	4	4,5
CPM6 - II*	2	2,5	2,5	3,5	0	4	3	2,92
CPM6 - II**	5	5	0	2,5	3	3,5	4	3,83
CPM7 - I*	0	0	0	0	0	0	0	0
CPM7 - II*	0	0	0	0	0	0	0	0
CPM7 - I**	8	4	0	5	4	6	4	5,17
CPM7 - II**	3	0	0	0	0	0	0	3

As medidas das amostras CPM5 – II*, CPM7 – I* e CPM7 – II* não foram realizadas, pois após o término do ensaio notou-se que houve contato entre as soluções, resultando na queima e deterioração da amostra. Devido a isso, preferiu-se descartar as amostras pois os mesmos poderiam apresentar inconsistência nos resultados. A figura 20 demonstra a situação da amostra após o término do teste.

Figura 20 - Amostra queimado após o teste



Fonte: Própria (2018)

6.4. Coeficiente de Difusão em regime não-estacionário (D)

De posse dos dados apresentados anteriormente, calculou-se inicialmente o coeficiente de difusão em cada amostra de cada tipo de concreto, através da equação 1. Nas tabelas 16 e 17 são mostrados os resultados para as amostras moldadas com concreto convencional e CAD, respectivamente.

Tabela 16 - Coeficiente de difusão (concreto convencional)

CP	D ($\times 10^{-12}$) (m^2/s)	CP	D ($\times 10^{-12}$) (m^2/s)
CP - 0 - I S	2544,73	CP - 20 - I S	232,47
CP - 0 - II S	2167,00	CP - 20 - II S	182,31
CP - 0 - III S	2443,30	CP - 20 - III S	250,12
CP - 0 - I C	2149,52	CP - 20 - I C	214,45
CP - 0 - II C	2075,02	CP - 20 - II C	191,49
CP - 0 - III C	1879,31	CP - 20 - III C	225,77
CP - 10 - I S	647,10	CP - 30 - I S	311,40
CP - 10 - II S	630,04	CP - 30 - II S	268,21
CP - 10 - III S	663,57	CP - 30 - III S	354,71
CP - 10 - I C	518,42	CP - 30 - I C	307,51
CP - 10 - II C	438,01	CP - 30 - II C	221,55
CP - 10 - III C	520,92	CP - 30 - III C	307,51

Tabela 17 - Coeficiente de difusão (CAD)

CP	D ($\times 10^{-12}$) (m ² /s)	CP	D ($\times 10^{-12}$) (m ² /s)
CPM1 - I*	273,09	CPM6 - I*	359,32
CPM1 - I**	192,51	CPM6 - I**	220,83
CPM1 - II*	203,13	CPM6 - II*	139,02
CPM1 - II**	280,81	CPM6 - II**	186,00
CPM5 - I*	340,77	CPM7 - I**	255,82
CPM5 - I**	366,21	CPM7 - II**	143,13
CPM5 - II**	134,40		

Com os valores dos coeficientes de difusão apresentados nas tabelas 16 e 17, pode-se observar que a adição de metacaulim na mistura para obtenção do concreto, como já era esperado devido a outros estudos, resultou em uma significativa melhora nas propriedades que se relacionam com a penetração de íons cloretos no concreto.

Para uma melhor análise dos resultados, optou-se por trabalhar com os valores médios dos coeficientes de difusão de íons cloretos para cada traço. Esses valores médios estão apresentados na tabela 18.

Tabela 18 - Coeficientes de difusão médio de cada traço

VALORES MÉDIOS			
CC		CAD	
Traço	D _{méd} ($\times 10^{-12}$) (m ² /s)	Traço	D _{méd} ($\times 10^{-12}$) (m ² /s)
CP1 - C	2034,62	CPM1	237,39
CP1 - S	2385,01		
CP2 - C	492,45	CPM5	210,35
CP2 - S	646,90		
CP3 - C	210,57	CPM6	226,29
CP3 - S	221,63		
CP4 - C	278,85	CPM7	199,47
CP4 - S	311,44		

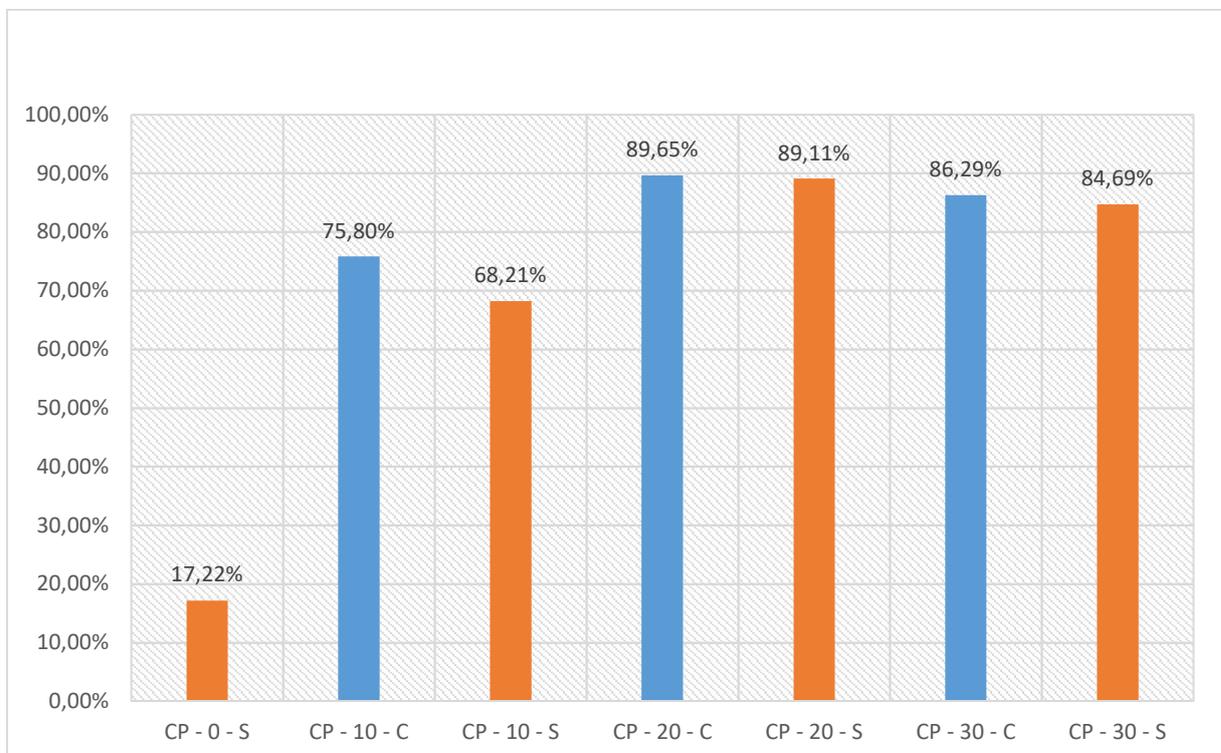
Com base nos valores médios obtidos para cada traço utilizado nesse estudo, podemos notar que há uma significativa melhora nas propriedades de durabilidade com relação à penetração de íons cloretos, mesmo com uma pequena substituição da massa cimentícia pela massa de metacaulim.

Tomando-se como base o valor médio do coeficiente de difusão de íons cloretos para o traço “CPI – C”, que é algo coerente, já que o mesmo representa um traço de concreto convencional submetido à cura úmida, esta que é comumente utilizada nos mais variados tipos de construção, nota-se que a simples substituição de 10% da massa cimentícia que compõe este traço pela mesma quantidade de massa de metacaulim, faz com que o concreto apresente uma redução no coeficiente de difusão variando entre 68% e 76%. Essa variação se deu devido a influência da cura, o que também já era esperado, pois de acordo com a bibliografia consultada no embasamento dessa pesquisa, a cura é um dos fatores que influencia diretamente nas propriedades de durabilidade do concreto.

A figura 21 mostra a porcentagem de redução nos valores médios dos coeficientes de difusão para cada traço de concreto convencional.

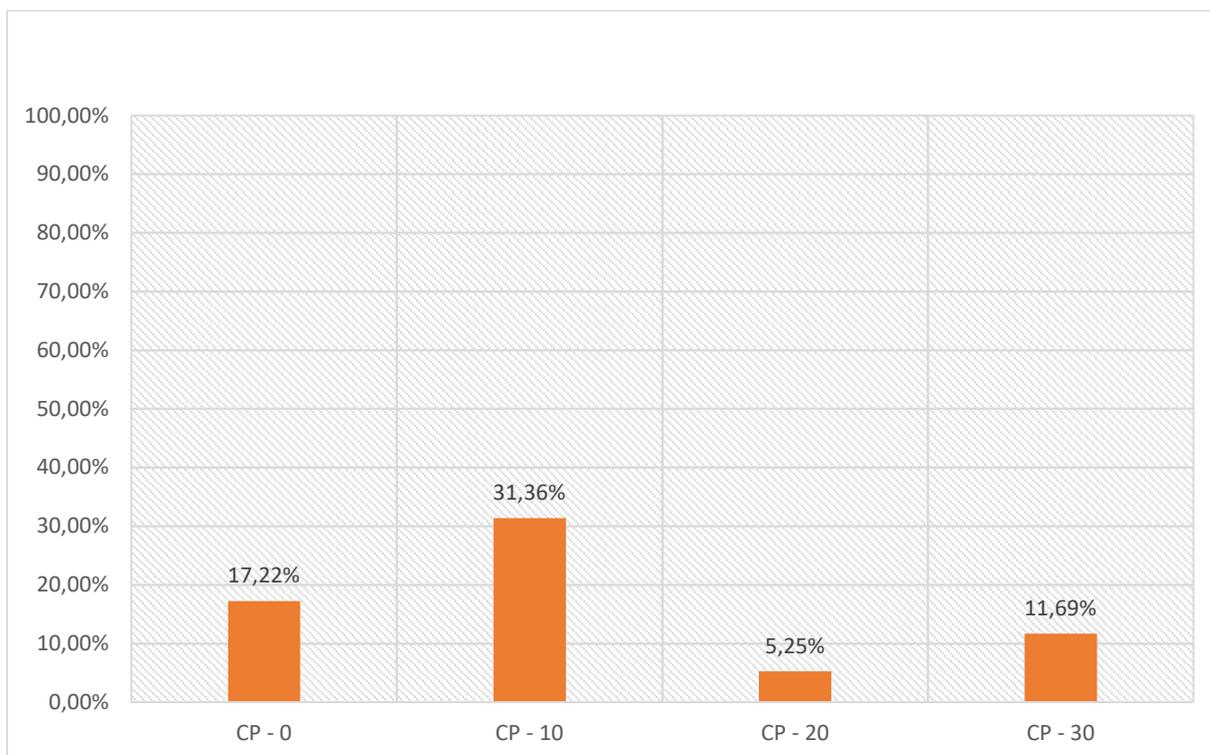
Como pode-se notar, não há diferença considerável entre os traços com 20% e 30% de substituição da massa cimentícia pela massa de metacaulim, tanto para os provetes provenientes de corpos de prova com cura ou sem cura, o que demonstra que o teor ideal de substituição é de até 20% da quantidade de massa cimentícia.

Figura 21 - Redução, em percentual, do coeficiente de difusão (concreto convencional)



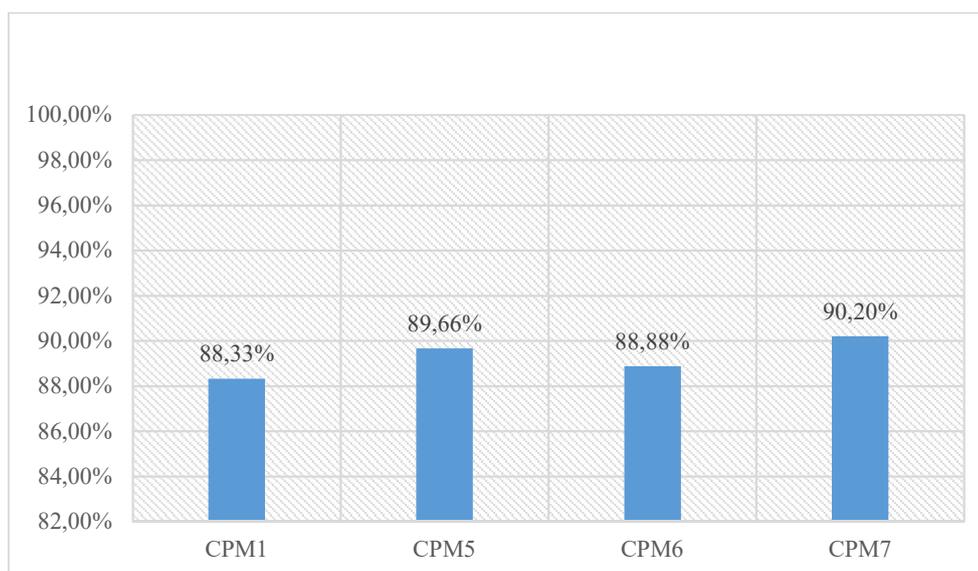
A seguir, a figura 22 mostra a diferença percentual entre os traços com e sem cura úmida.

Figura 22 - Diferença percentual entre traços com e sem cura úmida



Nota-se, a partir do gráfico da figura 22, que a cura úmida influenciou de maneira considerável (de 17 a 32% de melhora) nas misturas com substituição de até 10% da massa cimentícia. Nas misturas com substituições acima de 10%, nota-se que não há uma redução significativa nos valores dos coeficientes de difusão, mesmo para diferentes tipos de cura, o que corrobora com o que foi apresentado na figura 21, de que o teor ótimo para substituição de massa cimentícia fica em torno de 20%.

Na figura 23 demonstra-se a comparação entre os valores médios dos coeficientes de difusão das amostras moldadas com CAD e das amostras moldadas com o traço tomado como referência (CP1 – C).

Figura 23 - Diferença percentual entre os traços de CAD e o traço de referência

Como esperado, os traços apresentaram uma redução significativa com relação ao traço de referência, já que os mesmos possuem um teor de substituição de massa cimentícia por massa de metacaulim, em torno de 20%. Como já havia sido mostrado na figura 21, traços com substituição em torno de 20% da massa cimentícia pela massa de metacaulim, apresentaram redução no valor médio do coeficiente de difusão, na faixa de 88% a 90%, o que é comprovado quando feita a comparação entre as amostras obtidos através dos corpos de prova moldados com CAD.

Além disso, nota-se que para traços de CAD, que mantêm o mesmo teor de substituição da massa cimentícia (nesse estudo, algo em torno de 20%), a quantidade de pasta presente na mistura não influencia de maneira relevante, nas propriedades que se relacionam com a durabilidade frente à difusão de cloretos.

Por fim, nota-se que há grande influência na melhoria das propriedades de durabilidade do concreto, quando da incorporação de uma adição mineral (neste trabalho o metacaulim), na mistura para obtenção do concreto. Além disso, comprova-se que um concreto para ser classificado como CAD, deve apresentar além de uma resistência mecânica à compressão superior à de um concreto convencional, também deve apresentar melhoria significativa nas propriedades de durabilidade, que neste estudo foi a propriedade de resistência à difusividade de íons cloretos no interior dos mesmos.

7. CONCLUSÃO

A partir dos dados obtidos e se atentando aos objetivos propostos para o presente trabalho, as considerações estão expostas a seguir.

Com relação a influência do teor de substituição da massa cimentícia pela massa de metacaulim, na difusividade de íons cloretos no concreto convencional, chegou-se a seguinte conclusão:

- Há significativa melhora nas propriedades com relação à durabilidade, frente a difusão de íons cloretos, quando da substituição de massa cimentícia pela massa de metacaulim. Os resultados demonstram, tomando como base um traço de referência (CP1 – C), que há uma redução de 68 a 76%, na difusão de íons cloretos, com apenas 10% de substituição de massa cimentícia, chegando ao ápice de 89% quando da substituição de 20% da massa cimentícia. Porém, nota-se também que o teor ideal de substituição da massa cimentícia gira em torno de 20%, já que não houve uma diferença significativa na redução, quando se aumentou o teor de substituição para 30% (ocorrendo uma leve queda, na realidade, o que é justificável pelas variáveis externas envolvidas, como moldagem, clima, temperatura, entre outras);

Com relação a influência do teor de pasta cimentícia presente na mistura para obtenção do CAD, na difusividade de íons cloretos, chegou-se a seguinte conclusão:

- Para traços de CAD que mantém o percentual de adição ou substituição da massa cimentícia pela massa de metacaulim, nota-se que não há influencia relevante do teor de pasta cimentícia frente à difusão de íons cloretos. Se comparados os valores médios obtidos durante o teste, nota-se, comparando com o traço de referência (CP1 – C), que a redução no valor do coeficiente de difusão de íons cloretos ficou no intervalo de 88 a 90%, para os quatro traços, o que corrobora com o traço de concreto convencional que teve o mesmo teor de substituição (20%) da massa cimentícia. Logo nota-se que, para às propriedades relacionadas à durabilidade frente a difusão de íons cloretos, as adições minerais (Metacaulim, no presente estudo) possuem papel bastante relevante na melhoria das mesmas, sendo a quantidade de pasta cimentícia irrelevante para estas propriedades;

Com relação a influência da cura úmida dos corpos de prova, na difusividade de íons cloretos no concreto convencional, chegou-se a seguinte conclusão:

- Parâmetro bastante citado por diversos autores, a cura é preponderante para as propriedades de durabilidade de concretos convencionais. Mostrou-se na análise dos resultados, que os coeficientes de difusão de íons cloretos apresentou maiores valores em todos as amostras obtidos de corpos de prova que não foram submetidos a nenhum tipo de cura. Porém, notou-se que essa influência é mais relevante em concretos que possui poucos teores de substituição da massa cimentícia pela massa de metacaulim. Para um teor de 10% de substituição de massa cimentícia, notou-se que houve uma diferença em torno de 30%, no valor médio do coeficiente de difusão. Para as substituições em torno de 20 e 30%, apesar do coeficiente de difusão apresentar valores superiores para as amostras obtidos de corpos de prova sem cura, a diferença não foi tão relevante (para 20% de substituição houve uma diferença de 5%, por exemplo). Pode-se explicar isso, devido a finura dos materiais pozolânicos. Os concretos que os utilizam em suas composições além de possuir um fator de empacotamento maior (GUERRA, 2013), possuem uma melhora significativa na porosidade, o que torna bem mais dificultosa a difusão de íons cloretos no interior do concreto.

Por fim, conclui-se este trabalho afirmando que as adições minerais são materiais de suma importância para melhoria das propriedades do concreto, tanto mecânicas como as propriedades relacionadas a durabilidade. O metacaulim se mostrou ser uma boa alternativa para melhoria nas propriedades do concreto, apesar do seu custo elevado se comparado ao cimento, é de fácil obtenção, além de apresentar excelentes resultados frente à penetração de cloretos, cabendo ao profissional responsável por elaborar o traço, estudar o material afim de chegar num percentual ideal, pois como foi mostrado, após certo teor de substituição (20%, no caso do presente trabalho) o concreto não apresentou melhoras significativas nas propriedades de durabilidade frente a difusão de íons cloretos.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, José E. de, **Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis**. Belo Horizonte, 2006.
- AMORIM, Anderson Anacleto de. **Durabilidade das estruturas de concreto armado aparentes**. Belo Horizonte, 2010.
- ANDRADE, C. **O limite do tempo**. Técnica, São Paulo, Pini, n.3, 1993, p. 20-23.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento de moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015, p. 9.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2013, p. 238.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005, p. 11.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003, p. 6.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003, p. 6.
- BARBOSA, Normando P. **Notas de aula da disciplina “Materiais de Construção Civil II”**. João Pessoa, 2014.
- BROOMFIELD, J. P. **Corrosion of steel in concrete**. St. Edmundsbury Press, 1997.
- CARMO, J. B. M. do; PORTELLA, K. F. **Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto**. Cerâmica, 2008, p. 309-318.
- CARVALHO, Roberto Chust; FILHO, Jasson R. de F. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado segundo a NBR 6118:2014**. 4.ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014.
- CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras de concreto**. São Paulo: PINI, 1997.
- CERVO, Amado; BERVIAN, Pedro. A pesquisa. In: CERVO, Amado; BERVIAN, Pedro. **Metodologia Científica**. São Paulo: Mc Graw-Hill do Brasil, 1976. p. 65-70.
- COUTINHO, A. de Souza, **Fabrico. e propriedades do betão**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, vol. I, p. 401.
- FIGUEIREDO, C. P. et al., **O papel do metacaulim na proteção dos concretos contra a ação deletéria de cloretos**. IBRACON, vol. 7, 2014, p. 685-708.
- GODOY, A. S. **Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades**. Revista de Administração de Empresas, São Paulo, v.35, n.2, p. 57-63, abr. 1995.
- GODOY, A. S. **Pesquisa qualitativa tipos fundamentais**. Revista de Administração de Empresas, São Paulo, v. 35, n.3, p, 20-29 mai./jun. 1995. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rae/v35n3/a04v35n3.pdf>> Acesso em 18 maio 2018.

GUERRA, Ruy S. de T. **Empacotamento (1) - explicações**. 2013. Disponível em: <<http://www.clubedoconcreto.com.br/2013/12/empacotamento-1-explicacoes.html>> Acesso em 15 de junho de 2018.

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

HYMANN, Hebert. **Planejamento e análise da pesquisa: princípios, casos e processos**. Rio de Janeiro: Lidador, 1967.

IBRACON. **Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações**. Editor G. C. ISAIA – vol. 1 e vol. 2. São Paulo, 2005.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TECNICAS. **NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Montevideú, 2009, p. 14.

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

KHATIB, J. M.; WILD, S. **Pore size distribution of metakaolin paste**. *Cement and Concrete Research*, v. 26, p. 1545-53, 1996.

KHATIB, J.M. ; WILD, S. **Pore size distribution of metakaolin paste** *Cement and Concrete Research*, vol.26, n.10, p.1545-1553, 1996.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, **LNEC E-463: Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário**, Portugal, 2004, p. 8.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. Pesquisa. In:LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Técnica de pesquisa. 3. ed. rev. e ampl.** São Paulo: Atlas, 1996. p. 15-123.

LIBORIO, J. B. L. et al. **Desenvolvimento tecnológico dos concretos nos últimos 50 anos**. In: CONCRETO COLLOQUIA 2003. São Carlos, 2003.

LIMA, Telma; MIOTO, Regina. **Procedimentos metodológicos na construção do conhecimento científico: a pesquisa bibliográfica**. 2007. Scielo. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rk/v10nspe/a0410spe>> Acesso em 19 maio 2018.

MEDINA, Engler A. **Pozolonicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento portland e hidróxido de cálcio**. São Paulo, 2011.

MIGUEL, P. A. C. (org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

NEVES, J. L. **Pesquisa qualitativa – características, uso e possibilidades**. *Cadernos de pesquisa em administração*, São Paulo. V. 1, nº 3, 2ºsem. 1996.

NORDTEST METHOD, **NT BUILD 492: Concrete, mortar and cementbased repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments**. Approved 1999-11.

- OLIVEIRA, A. M.; CASCUADO, O. **Influência do teor de metacaulim na capacidade de proteção da armadura no concreto sujeito à corrosão.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL DEFECTS AND REPAIRS, 4., Aveiro, 2008. Anais. Aveiro (Portugal): CINPAR, 2008.
- REZENDE, Maria L. de S. et al., **Uso de metacaulim em concreto seco: uma abordagem por superfície de resposta.** Porto Alegre, v. 12, n. 3, 2012, p. 135-146.
- RICHARDSON, Roberto Jarry. **Pesquisa social: métodos e técnicas.** São Paulo: Atlas, 1989.
- SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. **Metakaolin and Calcined Clays as Pozzolans For Concrete: a review.** Cement and Concrete Composites, v. 23, n. 2, p. 441-454, 2001.
- SHVARZMAN, et al. **The effect of dehydroxilation/amorphization degree on pozzlanic activity of kaolinite.** Cement and Concrete Research, v. 33, 2003, p. 405-416.
- SILVA, Fernanda Giannotti; LIBORIO, Jefferson B. L. **Durabilidade do concreto de alto desempenho com sílica de Fe-Si ou silício metálico em ambientes marinhos.** Rio Grande, 2005, p. 35-47.
- SILVA, I. J.; LIBÓRIO, J. B. L. **A estrutura porosa de pasta, argamassa e concreto de cimento portland e sua influência na durabilidade do concreto.** In: 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica. 10p. Anais. Florianópolis, 1999.
- SILVA, Isac J. da. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: Propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura.** São Carlos, 2000.
- SILVEIRA, Adriana Augustin, **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos: Estudo do ataque por sulfatos.** Porto Alegre, 1996.
- SILVEIRA, Denise Tolfo; CÓRDOVA, Fernanda Peixoto. **A pesquisa científica.** In: GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. **Métodos de pesquisa.** Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009. Cap. 2, p. 31-42.
- SOKOLOVICZ, Bóris C. **Microestrutura e durabilidade a cloretos de protótipos de concreto com cinza de casca de arroz com e sem moagem prévia.** Santa Maria, 2013.
- TALERO, R. et al. **Comparative and semi-quantitative XRD analysis of Friedel's salt originating from pozzolan and portland cement.** Construction and Building Materials, v. 25, 2011, p. 2370-80.
- TANG, L.; NILSSON, L. O. **Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying na electrical field.** ACI Materials Journals, v. 89, n. 1, 1993, p. 49-53.
- TRINDADE, Guilherme H. **Durabilidade do concreto com cinza de casca de arroz natural sem moagem: Mitigação da reação álcali-sílica e penetração de cloretos.** Santa Maria, 2011.
- TROIAN, Aline. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloretos.** São Leopoldo, 2010.
- UCHIKAWA, H., **Characterization and material design of high-strength concrete with superior workability.** Cement Technology. Edited by E. M. Gartner & H. Uchikawa, Ceramic Transactions, vol. 40, p. 143-186.