

UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU

Leonardo Gomes Lima Beltran

Lucas Almeida da Silva

Matheus Novais Paz dos Santos

INFLUÊNCIA DO TEOR DE MATERIAIS SUPLEMENTARES E
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NA CARGA PASSANTE DE
ÍONS CLORETO EM CONCRETOS: UMA REVISÃO
SISTEMÁTICA

Engenharia Civil

Prof. Dr. Ramoel Serafini

São Paulo

2022

RESUMO

A penetração de íons cloreto é um dos principais mecanismos degradadores de estruturas de concreto. A partir da sua introdução por diferentes mecanismos, causam a diminuição da vida útil das estruturas de concreto armado principalmente por degradarem aço, iniciando o processo de corrosão do mesmo. Desse modo, a quantidade de íons de cloretos que penetram no concreto é uma informação vantajosa para a determinar o emprego do concreto mais viável. Este trabalho buscou avaliar a resistência à penetração de íons cloreto em concretos que utilizam cimentos Portland especiais contendo substituição parcial de clínquer por escória de alto forno, e concretos com adições de cinza volante e cinza de casca de arroz por meio de uma revisão sistemática da literatura. As resistências dos concretos à penetração de íons cloreto foram avaliadas aos 28 dias em conjunto com as resistências à compressão, sendo utilizado o procedimento preconizado pela norma americana ASTM 1202. Os resultados obtidos demonstram que a diminuição da quantidade de água usada na dosagem dos concretos diminui consideravelmente a quantidade de carga de íons de cloretos passantes no corpo de prova. A principal razão de tal situação é a diminuição da porosidade do concreto endurecido ao utilizar menor fator a/lig. Nos traços que continham adições de escória de alto forno e as adições das pozolanas (cinza volante e cinza de casca de arroz) apresentaram relevantes melhorias nas resistências à penetração de cloretos. Nos concretos que continham sílica ativa também mostram resultados semelhantes, já que esses materiais suplementares tendem a diminuir a porosidade do concreto em razão de sua finura. Desse modo, todas as adições avaliadas visam fortalecer a matriz cimentícia influenciando a penetrabilidade do concreto e reduzindo a carga iônica passante.

Palavras-chave: cloretos; durabilidade; adições; migração de íons; Teste Rápido de Penetração de Cloretos

ABSTRACT

The penetration of chloride ions is one of the main degrading mechanisms of concrete structures. From their introduction by different mechanisms, they cause a decrease in the useful life of reinforced concrete structures mainly by degrading steel, initiating the process of corrosion of the same. Thus, the amount of chloride ions that penetrate the concrete is advantageous information to determine the use of the most viable concrete. This work sought to evaluate the resistance to penetration of chloride ions in concretes that use special Portland cements containing partial replacement of clinker by blast furnace slag, and concretes with additions of fly ash and rice husk ash through a systematic review of the literature. The resistance of the concrete to the penetration of chloride ions was evaluated at 28 days together with the resistance to compression, using the procedure recommended by the American standard ASTM 1202. The results obtained demonstrate that the decrease in the amount of water used in the dosage of the concrete considerably the amount of charge from chloride ions passing through the specimen. The main reason for this situation is the decrease in the porosity of the hardened concrete when using a lower a/lig factor. The mixes containing additions of blast furnace slag and additions of pozzolans (fly ash and rice husk ash) showed significant improvements in resistance to chloride penetration. Concretes containing silica fume also show similar results, since these supplementary materials tend to decrease the porosity of the concrete due to its fineness. Thus, all additions evaluated aim to strengthen the cementitious matrix, influencing the penetrability of the concrete and reducing the passing ionic charge.

Keywords: chlorides; durability; additions; ion migration; Fast Chloride Penetration Test

SUMÁRIO

1.	Introdução	7
1.1.	Objetivos	8
2.	Revisão Bibliográfica	9
2.1.	Concreto Armado	9
2.1.1.	Cimento	9
2.1.2.	Fabricação do Cimento Portland	10
2.1.3.	Hidratação do cimento	12
2.2.	Adições no cimento	14
2.2.1.	Escória	14
2.2.2.	Pozolanas	15
2.2.3.	Sílica Ativa	17
2.3.	Aço	18
2.3.1.	Corrosão	19
2.4.	Mecanismos de penetração de íons cloreto no concreto	20
2.5.	Teor Crítico de Cloretos	22
2.6.	Ensaio de resistência à penetração de cloretos no concreto	23
2.6.1.	AASHTO T259	24
2.6.2.	NT BUILD 443-95	25
2.6.2.1.	Procedimento normativo	25
2.6.3.	UNE 83987-14	29
2.6.4.	ASTM C1202-12	32
2.6.4.1.	Procedimento Normativo	33
3.	Metodologia	37
4.	Resultados e Discussões	40
4.1.	Influência dos teores de materiais suplementares	40
4.2.	Comportamento de adições de sílica ativa	41
4.3.	Comportamento de adições de cinza de casca de arroz	41

4.4	Comportamento de adições de cinza volante e escória de alto forno	42
4.5	Influência da resistência à compressão na carga passante	44
4.6	Comportamento da resistência à compressão em relação ao teor de material suplementar 44	
4.7	Comportamento em relação ao fator a/lig	45
5	Conclusões	47
6	Referências	48

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Processo de produção do cimento via úmida.....	10
Figura 2 - Processo de produção do cimento via seca.....	11
Figura 3 - Curvas esquemáticas mostrando a taxa de liberação de calor (A) e a concentração do Ca ²⁺ em solução (B), em conjunto a indicação das fases de hidratação do cimento.....	14
Figura 4 – Estrutura composta por elementos protendidos.....	19
Figura 5 - Camada de revestimento da armadura. Legenda: c=espessura de revestimento.....	20
Figura 6 - Representação esquemática dos mecanismos de transporte de íons cloreto no concreto.....	21
Figura 7- Procedimento de teste AASTHO T295.....	24
Figura 8 - Corpos de prova impermeabilizados.....	26
Figura 9 - Corpos de prova em imersão na solução salina.....	27
Figura 10 - Análise de regressão.....	29
Figura 11 – Ilustração do procedimento normativo.....	30
Figura 12 - Ensaio em andamento.....	30
Figura 13 – Diagrama do circuito armado.....	31
Figura 14 - Procedimento de leitura de tensão.....	31
Figura 15 - Aparato de ensaio para teste de migração de cloretos.....	32
Figura 16 - Célula de tensão aplicada (projeto de construção).....	33
Figura 17 - Amostras com laterais seladas.....	34
Figura 18 - Processo de Saturação das amostras.....	34
Figura 19 - Diagrama do circuito do ensaio de migração.....	35
Figura 20 - Ensaio de Migração de Cloretos.....	36
Figura 21 - Teor de Material Complementar x Carga Passante.....	40
Figura 22 - Teor de Sílica Ativa x Carga Passante.....	41
Figura 23 - Teor de Cinza de Casca de Arroz x Carga Passante.....	42
Figura 24 – Teor de Cinza Volante x Carga Passante.....	43
Figura 25- Teor de Escória x Carga Passante.....	43
Figura 26- Resistência à Compressão x Carga Passante.....	44
Figura 27 – Teor de Material Suplementar x Resistência à Compressão.....	45
Figura 28 - Fator a/lig x Carga Passante.....	46

1. Introdução

O uso do concreto como principal material construtivo foi empregado por diversas civilizações ao longo do tempo. Os romanos que já utilizavam argamassa para o assentamento de alvenarias, passaram a adicionar areia e pedra, ao calcário e água para criar o primeiro concreto da história (NEVILLE, 2016). A partir do avanço da sociedade, a busca e necessidade por estruturas maiores, mais eficientes e com vasta durabilidade ao longo dos anos visando maximizar o uso dos insumos, tornou-se um grande tópico de estudo da engenharia. Tal circunstância desencadeou importantes análises em relação ao comportamento do concreto em diferentes áreas, suas propriedades e capacidades associadas ao grau de eficiência a resistir tanto aos esforços propostos, quanto aos ataques do ambiente presente.

Devido ao Brasil possuir uma vasta costa litorânea, a importância do estudo específico dos agentes patológicos neste contexto é imprescindível para assegurar a durabilidade de estruturas localizadas no mesmo. A água do mar é constituída por diversos compostos, em especial íons que podem ser deletérios ao concreto. Neste âmbito, pode-se considerar a maior preocupação patológica do concreto como a corrosão do aço, que é definida como a interação destrutiva de um material com o meio ambiente, seja por ação física, química, eletroquímica, ou a combinação destas (HELENE, 1993).

As manifestações patológicas se iniciam através do comprometimento estético da estrutura, sendo o mais grave, contudo, a perda de sua resistência mecânica. Em alguns casos, estas manifestações podem levar a estrutura ao colapso parcial, ou até mesmo total (HELENE, 2007). Um dos principais fatores que contribuem para a degradação das estruturas de concreto armado, está associado à ação dos íons de cloretos ao aço (AL-KHAJA, 1997). Ao entrarem em contato com a armadura mais próxima à superfície, os íons cloretos em uma quantidade chamada de concentração crítica, dão início a um processo corrosivo das armaduras (W. MAZER, G. MACIOSKI e N. SOTO, 2015).

Em razão da agressividade ao aço causada pela penetração destes íons no concreto, torna-se fundamental o conhecimento do coeficiente de difusão dos íons cloreto. Este indicador é essencial para avaliar a durabilidade da estrutura e testificar a capacidade dos concretos em evitar a penetração dos íons. Para determiná-lo podem ser utilizados diversos métodos de

avaliação, que dependem de fatores relacionados à estrutura dos poros do concreto, propriedades da mistura e a presença de fissuras (TROIAN, 2010).

Neste contexto, o presente trabalho de conclusão de curso tem o objetivo de analisar a resistência à penetração de íons de cloretos em diferentes concretos com materiais cimentícios suplementares para maior entendimento das suas propriedades mecânicas e durabilidade dos mesmos quando expostos a estes agentes agressivos, sendo tal análise realizada por meio de uma revisão sistemática da literatura.

1.1. Objetivos

O objetivo geral do trabalho é avaliar o efeito de diferentes classes de concreto com materiais suplementares na resistência à penetração de íons de cloretos por meio da carga elétrica resultante do teste rápido de penetração de íons cloretos, preconizado pela norma ASTM C1202 (2022). Com o intuito de atingir o objetivo geral deste trabalho de conclusão de curso, foram estabelecidos objetivos específicos descritos a seguir:

- Compilar dados na literatura de concretos com diferentes materiais suplementares submetidos ao teste rápido de penetração de cloretos, de acordo com a norma ASTM C1202;
- Relacionar o efeito dos diferentes percentuais de adições de materiais suplementares, resistência à compressão e fator água/ligante na resistência à penetração de cloretos no concreto obtido pelo teste rápido de penetração de cloretos;
- Justificar a tendência das correlações apresentadas.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Concreto Armado

A união do concreto simples com armaduras de aço forma o concreto armado. O emprego da mistura desses dois materiais visa resistir aos esforços solicitantes da estrutura, composta pelos mesmos, de modo mais eficiente, sendo a aderência entre os dois o aspecto primordial em sua solidarização (PINHEIRO, 1986).

Ao unir estes dois materiais na execução de estruturas são obtidos novos benefícios como a redução do custo, ao comparar com um método diferente de construção, já que os compostos formadores do concreto são relativamente fáceis de adquirir. Em conjunto com a adaptabilidade do concreto armado, que pode ser moldado de acordo com a fôrma executada, proporcionando a realização de diferentes projetos arquitetônicos. Além das resistências mecânicas melhoradas com a solidarização do concreto e aço, em conjunto com a resistência ao fogo, choques e vibrações, que também são fatores otimizados ao empregar os dois materiais simultaneamente (BASTOS, 2017).

2.1.1. Cimento

O cimento é definido como um material pulverulento com propriedades ligantes, sendo capaz de endurecer ao entrar em contato com água, porém após entrar em contato com água novamente este ligante não se decompõe. A partir da sua mistura com areia, pedra britada, cal, entre outros, é formado os concretos e argamassas utilizados na construção civil (ABCP, 2002). O cimento Portland foi patenteado em 1824 por Joseph Aspdin, pedreiro e construtor, que aquecia uma mistura de argila moída e calcário para a dispersão total do CO₂ da mistura. Porém, a base do cimento utilizado atualmente foi produzida por Isaac Johnson em 1845 ao aquecer uma mistura de argila e giz até a chamada “clinquerização”, desse modo a mistura em questão passou a apresentar compostos de grande potencial ligante (NEVILLE, 2016).

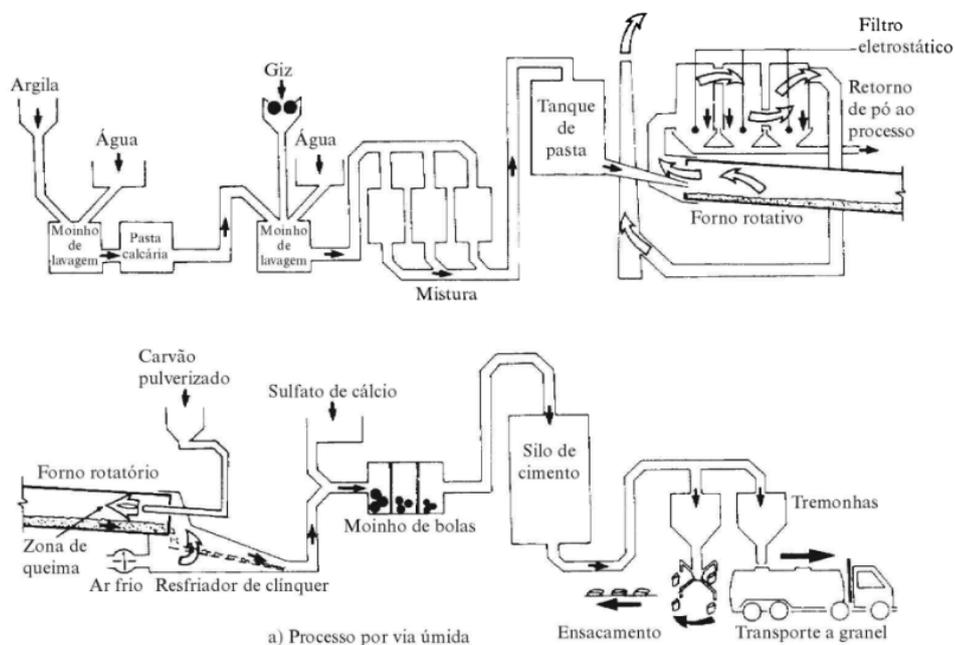
2.1.2. Fabricação do Cimento Portland

As matérias primas do cimento portland são minerais de calcário e argila, sendo representados quimicamente como silicatos de cálcio, aluminatos e ferroaluminato de cálcio. Também são incorporados bauxita ou minério de ferro como matérias-primas secundárias, visando suprir a deficiência da argila em alumina e óxido de ferro (MONTINI, 2009).

O cimento Portland pode ser produzido por dois processos: via úmida e via seca. No processo úmido, a argila e o calcário são fragmentados em moinhos e misturados com água. A pasta forma é conduzida para tanques, onde posteriormente será seca e calcinada (NEVILLE, 2016).

Quando a pasta atinge um teor necessário de calcário, é deslocada para o forno onde será aquecida gradativamente conforme se movimenta no interior do forno. Primeiramente, a água da mistura é evaporada e o CO_2 liberado. Na parte mais quente do forno, ocorre as reações entre o calcário, sílica e alumina e a fusão de 20% e 30% do material originando o clínquer (NEVILLE, 2016).

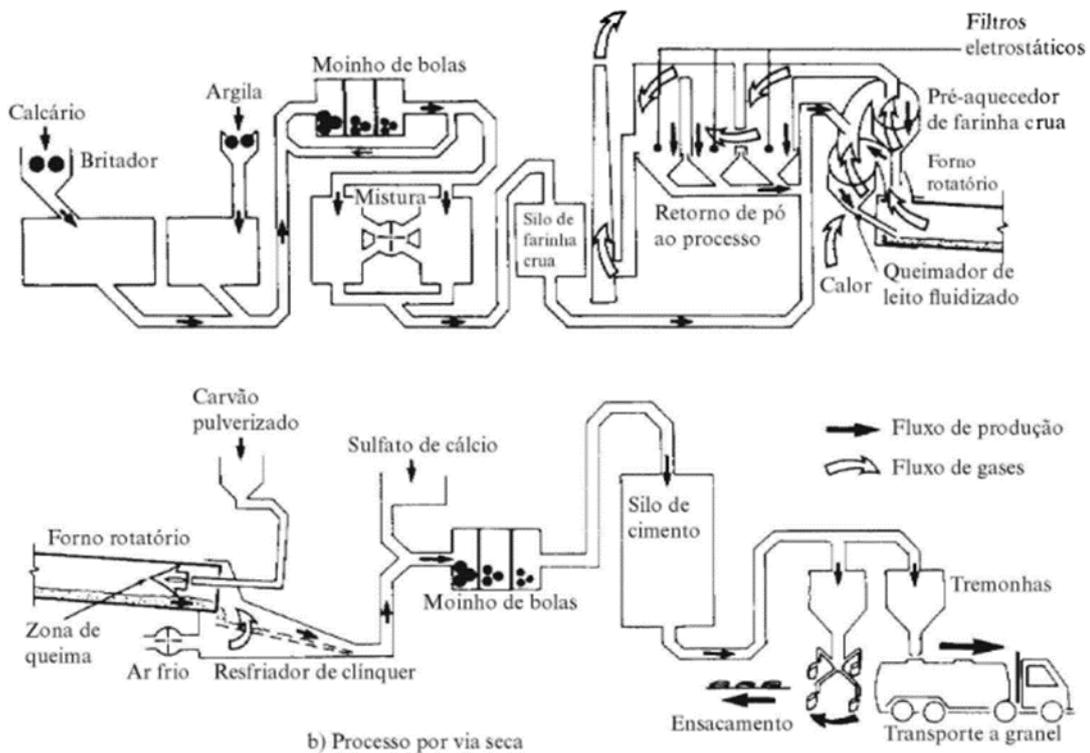
Figura 1 - Processo de produção do cimento via úmida.



FONTE: NEVILLE (2016)

No processo por via seca, as matérias primas são britadas, secas e afinadas para a formação de um pó chamado farinha crua, mesmo com a formação desse pó ainda é adicionado materiais para o ajuste final das proporções. Sequentemente, é adicionado 12% de água em relação a massa da mistura, formando péletes duros, sendo pré-aquecido para assim poderem entrar no forno, seguindo processo semelhante ao úmido. É necessário aquecer previamente, pois só é possível o fluxo de ar e a troca de calor necessárias para a criação do clínquer dentro do forno quando a mistura já adentra quente no mesmo, além de aumentar a decarbonatação (dissociação do CaCO_3) visando aumentar o rendimento do clínquer. A Figura 2 ilustra o processo de produção do cimento via seca.

Figura 2 - Processo de produção do cimento via seca.



FONTE: NEVILLE (2016)

As fases dentro do forno ocorrem de acordo com a temperatura atingida, sendo elevada gradativamente, onde aos (MONTINI, 2009):

- 700°C: ocorre a desidroxilação dos minerais da argila
- 700 a 900°C: acontece a decarbonatação do CaCO_3 , formação de aluminatos e ferroaluminatos de cálcio

- 900 a 1200°C: transformação dos aluminatos e ferroaluminatos e formação da belita ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)
- 1250 a 1350°C: aparecerá a fase líquida devido à fusão das fases de aluminatos e ferroaluminatos de cálcio e início da cristalização da alita ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) a partir da belita e do CaO não combinado.
- Acima de 1350°C: desenvolvimento dos cristais de alita (C_3S) e belita (C_2S) na fase líquida.

Após o clínquer sair do forno e ser resfriado, o mesmo é moído, mesclando pequenas adições de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) na mistura para retardar as reações da nova mistura. Ao realizar uma comparação entre o método seco e úmido, o seco é empregado mais comumente na fabricação de cimento, pois economiza energia para o aquecimento do clínquer (NEVILLE, 2016).

2.1.3. Hidratação do cimento

Os produtos das reações do clínquer (composto matriz antecedente ao cimento) com o sulfato de cálcio, cal livre, os álcalis e a água, todos presentes no cimento, ocasiona a formação de hidratos que por si só resultam no processo de pega e endurecimento da pasta, ou seja, a profunda mudança físicas e mecânicas da pasta (SOUZA, 2007). Estes hidratados correspondem ao gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), sendo este o principal responsável pela resistência mecânica da pasta, e o hidróxido de cálcio ou portlandita (CH), sendo estes originados majoritariamente dos silicatos (ZAMPIERI, 1989). A Tabela 1 resume os principais compostos do cimento Portland.

Tabela 1 – Principais compostos do cimento Portland

Composto	Abreviatura
Silicato tricálcico	C_3S
Silicato dicálcico	C_2S
Aluminato tricálcico	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	C_4AF

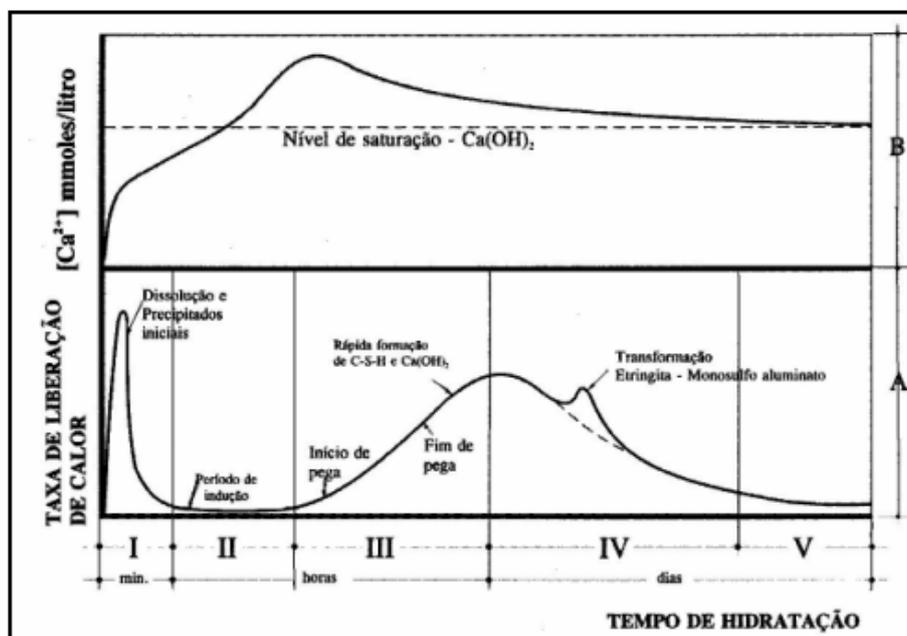
Hidróxido de cálcio	CH ou $[(Ca(OH)_2]^2$
Silicato de cálcio hidratado	C-S-H

FONTE: NEVILLE (2016)

O processo de hidratação do cimento é uma reação exotérmica, sendo viável analisar os estágios de evolução pela liberação de calor dos compostos. A Figura 3 mostra os cinco estágios da hidratação do cimento, sendo cada definido como (ZAMPIERI, 1989):

1. **Estágio Inicial:** O contato imediato da água com o cimento inicia o período de pré-indução, onde ocorre a libertação dos íons K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , Ca^{2+} . Seguidamente, acontece a formação inicial do CSH com a hidratação dos silicatos (C_3S) e aluminatos (C_3A e C_4AF). A principal característica desta fase é a alta liberação de calor, já que as reações de hidratação inicial dos compostos do cimento acontecem de forma rápida.
2. **Estágio de Indução:** É caracterizado principalmente pela diminuição das reações de hidratação, não sendo formado hidratos em grandes concentrações, evidenciado principalmente pela baixa liberação de calor nesta fase. Considera-se esta fase como as primeiras horas após o contato do cimento com a água e é encerrada quando é observado o crescimento do CSH na mistura.
3. **Estágio de Aceleração:** Neste estágio predomina a formação rápida do C-S-H e CH, solidificando a pasta e dando início a mudança nas propriedades mecânicas da mistura, onde os produtos das reações de hidratação começam a preencher os espaços que continham água previamente. Esta fase é caracterizada por um pico de liberação de calor e pela gradual diminuição desta mesma liberação de forma gradativa.
4. **Estágio de Desaceleração:** é caracterizada pela diminuição da liberação de calor na pasta, em razão das reações de hidratação estarem gradualmente desacelerando. Ainda é formado CSH e CH em taxas reduzidas.
5. **Estágio Final:** Os vazios da pasta continuam a serem preenchidos por C-S-H e CH, agora em taxas significativamente menores, assim gradualmente ocorre a densificação da pasta.

Figura 3 - Curvas esquemáticas mostrando a taxa de liberação de calor (A) e a concentração do Ca^{2+} em solução (B), em conjunto a indicação das fases de hidratação do cimento.



FONTE: ZAMPIERI (1989)

2.2. Adições no cimento

2.2.1. Escória

O tratamento do minério de ferro na indústria metalúrgica produz um resíduo chamado escória. É composta por óxido de cálcio, alumina e sílica, sendo este a mesma mistura existente no cimento. Sendo assim, o seu uso é empregado na mistura com o calcário para a formação de do clínquer que resultará em um cimento de semelhantes propriedades se comparado ao formado por um clínquer convencional. Dessa forma, este insumo não é considerado um material cimentício com atividade pozolânica. A escória de alto forno também pode ser moída para ser usada diretamente como material cimentício, pois apresenta características de um ligante hidráulico. Este uso em específico é utilizado para argamassas para alvenaria (NEVILLE, 2016).

O modo que a escória é resfriada altera grandemente sua atividade hidráulica, já que o processo em si altera a composição química da mesma, sendo formado três partículas (PEREIRA, 2010):

- partículas vítreas reativas;
- partículas vítreas contendo cristais de várias formas (sendo esta a mais reativa);
- partículas cristalizadas (não reativas).

Pelo grau de vitrificação da escória que é definido sua capacidade hidráulica, já que uma escória no estado não cristalino não apresenta nenhuma atividade hidráulica. Para que a escória propriedades ligantes, é necessário resfriá-la rapidamente desde o estado líquido para o sólido. Este resfriamento rápido é conhecido como granulação (MASSUCATO, 2005).

Uma característica importante da escória de alto forno são as lentas reações de hidratação, esta propriedade é usual em cimento com base nesta adição, sendo estes semelhantes aos cimentos de baixo calor de hidratação. Porém, algumas escórias apresentam composição que necessitam de ativadores para a aceleração do processo de hidratação, de modo a não limitar seu uso comercial (PEREIRA, 2010).

O primeiro tipo de ativador utilizado seria o de origem química, que ao serem adicionados contribuem para a aceleração das reações de hidratação da escória, já que ao serem comparadas com as do cimento, são mais lentas, o que retardaria a formação do C-S-H de modo indesejado. Sendo assim, normalmente é adicionado sulfatos (SO_4^{2-}), pois facilitam a dissolução da escória, favorecendo a precipitação dos silicatos de cálcio hidratados (MASSUCATO, 2010).

Outro tipo de ativador seria os físicos, que representam as propriedades da escória, como sua granulometria e temperatura, já que ao alterar a finura da escória utilizada infringi mudanças tanto no tempo de hidratação, resistência à compressão e nos parâmetros térmicos, já que o aumento da área superficial da escória resulta no aumento das reações de hidratação da mesma (NEVILLE, 2016).

2.2.2. Pozolanas

Pozolanas são definidas como um material de origem natural ou artificial que apresentam em sua composição sílica reativa, que ao estar com uma finura determinada reagem com o hidróxido de cálcio na presença de água gerando materiais com propriedades cimentícias (NEVILLE, 2016).

Este material tem como base química sílica ou alumínio, e é empregado substituindo parte do cimento ou é adicionado em proporções viáveis a mistura. Seu principal atributo é a

reação com o hidróxido de cálcio (CH), produto das reações de hidratação do cimento, e a partir disso, gerar uma produção adicional de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), contribuindo para a estabilidade do cimento hidratado, aumentando sua resistência e durabilidade (COSTA, 2015).

Uma das principais pozolanas artificiais é a cinza volante, material formado pela combustão de carvão natural. É dividida pelo teor de cálcio na sua composição, onde cinzas com o teor menor que 10% de hidróxido de cálcio são originadas da combustão de carvões betuminosos e cinzas com valores de 15% a 40% são originadas de carvões de lignita ou sub-betuminosos (COSTA, 2015).

Suas principais características são a finura e reatividade. Cinzas mais finas contribuem para a resistência do cimento e redução de água, além de contribuir para o empacotamento das partículas, já que as mesmas são majoritariamente esféricas. Sua reatividade é determinada pelo teor de vidro em sua composição, onde cinzas com boa qualidade se apresentam 70% a 85% em fase vítrea. Porém, é necessário maior controle em relação a cura úmida, pois as reações da cinza volante demandam um longo período de tempo (NEVILLE, 2016).

Um outro tipo de pozolana comumente conhecida é a cinza da casca de arroz, obtida através da queima da casca de arroz para geração de energia elétrica em usinas. O produto da queima é um resíduo negro composto majoritariamente de sílica com até 15% de carbono. O uso desta adição é amplo, podendo substituir mais de 70% do cimento do concreto, mas já é possível usufruir de seus benefícios, que vão desde o aumento da resistência mecânica até a diminuição da permeabilidade, favorecendo a proteção a agentes agressivos, realizando apenas de 10% e 20% de substituição (TIBONI, 2007).

Em contrapartida, o uso da cinza da casca de arroz acarreta uma maior demanda de água, em razão principal da sua área superficial formada por microporos, desse modo é primordial o uso de aditivos para compensar a maior necessidade de água. Em conjunto, seu uso é limitado comercialmente, já que por possuir grande teor de carbono em sua composição, os concretos que utilizam esta adição adquirem uma coloração cinza-escura, não sendo prestigiado no mercado (TIBONI, 2007).

2.2.3. Sílica Ativa

A sílica ativa é um resíduo obtido através do processamento de ligas de silício. Sua composição é majoritariamente formada por dióxido de silício (SiO_2), e suas características são diretamente relacionadas ao tipo de liga que foi originada, forno e a matéria prima utilizada. São utilizadas como pozolanas pela sua capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio (CH), mas também auxiliam no empacotamento das partículas do cimento agindo como um filer (VIEIRA, 2003).

Seu uso beneficia majoritariamente a resistência inicial e na diminuição da permeabilidade, razão de ser utilizada como pozolana. Em conjunto, auxilia na porosidade do concreto, principalmente na interface com o agregado, diminuindo o ingresso de agentes agressivos. Porém, o manuseio desta adição é de grande dificuldade, em razão da sua grande finura, desse modo, a sílica ativa é disponibilizada em uma forma densificada de micropéletes, ou como uma pasta composta por água e sílica em quantidades iguais (NEVILLE, 2016).

2.3. Aço

O aço encontra-se entre os materiais mais importantes e utilizados na engenharia, em razão de suas nobres propriedades mecânicas que atendem satisfatoriamente a grande maioria das aplicações, além de possuir um custo acessível devido sua simples composição química e processo de fabricação (GOMES, 2013).

Entre suas principais propriedades, vale evidenciar a grande maleabilidade e durabilidade, elasticidade e a expressiva resistência que contribui para a utilização em massa do material nas diversas áreas da indústria mundial.

- Maleabilidade: Capacidade do material de dobrar e deformar facilmente sem ocorrer fratura.
- Durabilidade: Durabilidade é a capacidade do aço em preservar as suas características funcionais sem necessitar de manutenção ou reparações excessivas.
- Elasticidade: A elasticidade é a capacidade do metal de retornar ao tamanho original, uma vez que é aplicada e removida a força atuante dentro do regime elástico.
- Resistência: A resistência do aço à grandes esforços é resultado da presença do carbono em sua composição química, tornando-o mais resistente quando comparado a outros metais.

No âmbito da construção civil, o aço é comumente utilizado em estruturas de concreto com o intuito de aumentar a resistência à compressão e compensar a deficiência do concreto de resistência à força de tração. Dessa forma, torna-se imprescindível sua utilização para promover a implantação de maiores e mais seguras estruturas no mercado da construção civil. Também é comum a combinação do concreto simples com armadura ativa, usualmente conhecida como concreto protendido, que possui a finalidade de ampliar a resistência à tração do concreto, possibilitando às estruturas o alcance de longos vãos sem a presença de grandes quantidades de apoios. A Figura 4 ilustra uma estrutura constituída por elementos protendidos.

Figura 4 – Estrutura composta por elementos protendidos



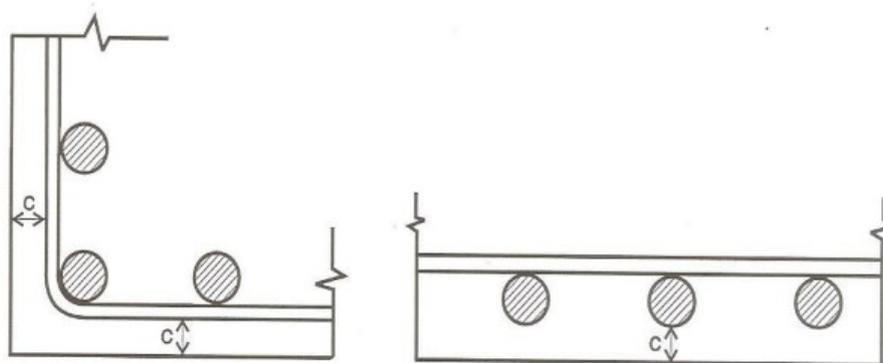
FONTE: KLEIN (2002)

2.3.1. Corrosão

Dentre as manifestações patológicas que atingem o concreto armado, a corrosão de armadura é considerada um dos principais fenômenos responsáveis por sua deterioração, desencadeando múltiplos problemas que envolvem riscos à segurança. O processo corrosivo do aço é definido como a deterioração do material através de ações químicas ou eletroquímicas que ocorrem no meio ambiente, resultando na perda de massa do material em questão (SOUSA, 2014). Esta perda está diretamente relacionada com a redução da durabilidade e desempenho, prejudicando a eficiência e tornando o material desapropriado para o uso (GENTIL, 2007).

Geralmente o concreto possui boas condições de proteção ao aço contra a corrosão por meio da espessura de cobrimento, que quando bem executada possui a função de proteger a armadura contra os agentes agressivos externos. A Figura 5 exemplifica a camada de cobrimento da armadura em uma estrutura de concreto.

Figura 5 - Camada de cobrimento da armadura. Legenda: c =espessura de cobrimento.



FONTE: FUSCO (2007)

No entanto, esta condição é perdida à medida que o concreto é degradado por ações originadas como produto da redução da alcalinidade devido a carbonatação do concreto, lixiviação dos álcalis ou presença de quantidade significativa de íons cloreto no concreto (BASHEER, 2002). Mediante a despassivação da armadura, o aço reage com elementos não metálicos presentes no ambiente, oxigênio (O_2), enxofre (S), sulfeto de hidrogênio (H_2S), gás carbônico (CO_2) entre outros. Reação extremamente prejudicial à matéria levando a perda de suas propriedades.

2.4. Mecanismos de penetração de íons cloreto no concreto

A corrosão de armaduras promovida pela ação de íons cloreto está entre os principais e mais agressivos problemas que afetam a durabilidade das estruturas (YILDIRIM, ILICA e SENGUL, 2011). O ingresso dos íons nestas estruturas ocorre de diversas formas, entre elas: através da contaminação de materiais utilizados na composição do concreto; utilização de aditivos que contenham Cloreto de Cálcio ($CaCl_2$); contato frequente com água marinha e grande exposição ao ambiente pelágico (FIGUEIREDO, 2005).

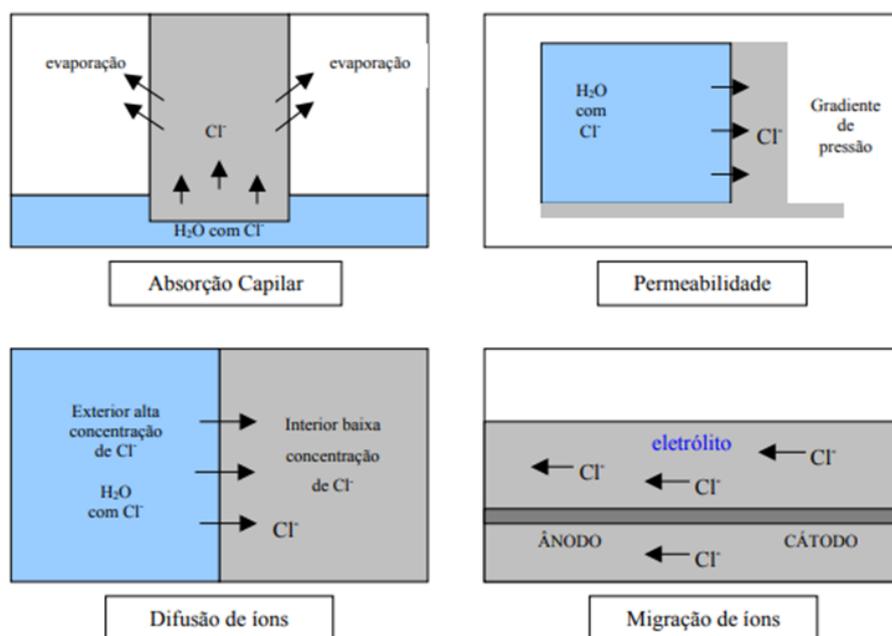
Os íons penetram nos poros existentes no concreto por meio de mecanismos como a absorção capilar, difusão, permeabilidade e a migração. A absorção capilar é responsável pelo transporte de líquidos através dos poros capilares devido às forças de atração presentes na superfície da estrutura. Presente em corpos que possuem características porosas, o mecanismo é considerado o mais comum e possui a necessidade de poros secos para que seja permitida a absorção do líquido (HELENE, 1993).

Difusão corresponde ao processo que produz o transporte de substâncias devido a diferença do gradiente de concentração entre duas áreas, dessa forma, a movimentação dos íons é gerada até que ocorra o equilíbrio da concentração. O mecanismo em questão é predominante na penetração de soluções em situações em que há baixa porcentagem de poros ou em situações que o concreto esteja com alta saturação (CASCUDO, 1997).

A permeabilidade é definida pela movimentação de um fluido sujeito à ação da força gradiente de pressão, que está sob dependência do diâmetro e da interligação dos poros presentes na estrutura. Este mecanismo permite determinar o grau de estanqueidade do concreto, propriedade a qual é fundamental para avaliar a facilidade com que gases e líquidos o penetram (NEVILLE, 2013).

Caracterizada pelo transporte de soluções através dos poros do concreto, a migração ocorre em razão da ação de um campo elétrico existente, o qual induz a movimentação dos íons devido à diferença de potencial elétrico entre dois meios. A velocidade de penetração do íon submete-se à carga passante e a dimensão do íon (LOPES, 1999).

Figura 6 - Representação esquemática dos mecanismos de transporte de íons cloreto no concreto



FONTE: HELENE (1993)

2.5. Teor Crítico de Cloretos

Apenas a simples penetração dos íons não se faz suficiente para o início do processo corrosivo, logo, precisa-se de uma quantidade significativa destes íons, denominada como teor crítico ou limite crítico de cloretos (GOUDA, 1970). Este teor é influenciado diretamente por diversas variáveis, dentre elas estão: as características dos materiais que compõe o concreto, o meio que cerca a estrutura, condições e composições químicas do aço, resistividade elétrica do concreto, teor e tipo de adições, relação a/lig, tipo de cátion, teor de aluminato tricálcico (C3A), fonte de cloreto e a interface aço-concreto. Entre as variáveis, o teor e tipo de adições utilizadas em substituição ao cimento se destaca em virtude da enorme influência com o pH da solução nos poros do concreto.

Embora não haja um consenso entre a comunidade científica em relação aos limites aceitáveis de cloretos no concreto, devido as séries de variáveis existentes, o conhecimento do teor crítico de cloretos é de suma importância para obter a previsão e detectar a vida útil de uma estrutura de concreto exposta à ambientes com índices significantes íons cloretos (GENG, 2010). De toda forma, existem algumas recomendações que sugerem valores para limite do teor crítico. A *Comisión Permanente del hormigón* adota limites de 0,4% em relação a massa do cimento para concreto armado; já a *British Standard* adere 0,4% para concreto armado e 0,1% para concretos protendidos (DIAS, 2015). A NBR 12655:2006 estabelece, em porcentagem, os teores máximos de concentração de íons cloretos no concreto em relação à massa de cimento utilizada conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto

Tipo de Estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl) no concreto (% sobre a massa de cimento)
Concreto Protendido	0,05
Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço na estrutura	0,15
Concreto armado em condições de exposição não severas (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço na estrutura)	0,40
Outros tipos de construção em concreto armado	0,30

FONTE: (NBR 12655:2006)

2.6. Ensaio de resistência à penetração de cloretos no concreto

A velocidade de penetração de íons cloreto não é simples de se quantificar já que tal informação depende da geometria dos poros no concreto, reações químicas, condições ambientais e problemas na execução (MCGRATH e HOOTON, 1999). Ensaio comumente utilizados para determinar as resistências à penetração de cloretos em concretos, tem como base tanto o processo de difusão quanto o processo de migração, os ensaios baseados no processo de difusão se constituem basicamente na imersão de corpos de prova em solução iônica com certa concentração de cloretos por um determinado período, após o término do ensaio é possível avaliar a resistência dos corpos de prova em relação a difusão dos íons cloretos em sua estrutura.

Já nos ensaios baseados em migração de íons cloretos frequentemente são utilizados duas câmaras contendo soluções separadas pelo corpo de prova, uma delas contendo Cl^- , após a montagem do ensaio aplica-se uma diferença de potencial entre as duas câmaras, de maneira que os cloretos tendem a migrar até a câmara oposta por meio do corpo de prova, sendo possível estudar a maneira que o concreto se comporta a tal processo.

Uma das principais diferenças entre os testes utilizados para avaliar a resistência de penetração de íons cloretos no concreto está no tempo de realização dos ensaios, comumente os ensaios que empregam a difusão duram algumas semanas, como é caso do ensaio descrito nas normas AASHTO T 259 e a norma nórdica NT BUILD 443-95. No entanto, os ensaios que propõe a migração são consideravelmente mais rápidos conforme o ensaio proposto pelas normas UNE 83987 e ASTM C1202, que tem duração de aproximadamente 6 horas.

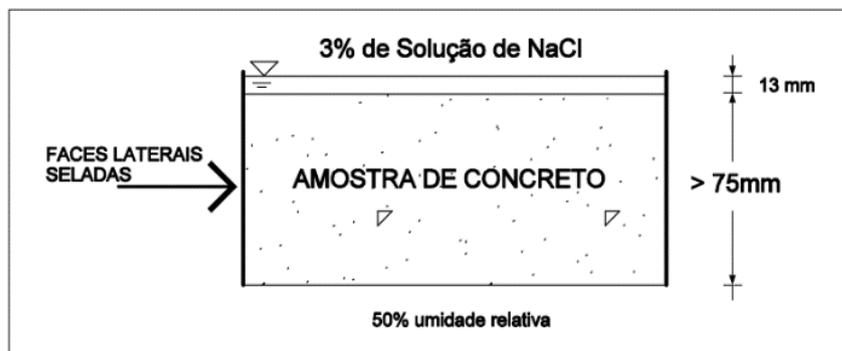
A difusão é definida pelo movimento de massa de uma área com alta concentração para uma área de menor concentração, imposto por gradiente de concentração ou diferença de potencial químico, o processo de penetração de íons de cloretos por difusão se dá na região dos poros no concreto preenchidos com água não sendo necessário a movimentação de água neste processo, mas sim uma concentração de íons entre o núcleo e a região de superfície do concreto. (TANG, 1999)

O processo de migração de íons cloreto é alavancada pelo campo elétrico formado através de um fator externo comumente utilizado sendo a pilha de corrosão eletroquímica. A presença desses íons no concreto reduz a resistividade elétrica e aumenta a condutividade do eletrólito, favorecendo o aumento da corrosão nas armaduras. (MISSAU, 2004).

2.6.1. AASHTO T259

O método descrito pela T 259 (AASHTO, 2017) é realizado em regime não estacionário e propõe a determinação da resistência de amostras de concreto frente à penetração de íons cloreto. Este método corrobora a influência das variações nas propriedades dos concretos obtidas por meio de suas composições, sob a penetração dos íons. A norma americana, método de teste para resistência do concreto à penetração de íons de cloreto - Teste de Lagoa de sal (*Standard Method of test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration - Salt Ponding Test*), indica que após o determinado período de cura dos corpos de prova condicionados ao teste possuindo área superficial mínima de 17500 mm², é feita a impermeabilização das laterais e as amostras são submetidas aos testes com uma das faces expostas por 90 dias em uma solução contendo concentração de íons cloreto de 3% de cloreto de sódio (NaCl) e no decorrer do ensaio é medida a concentração de cloretos em cada amostra de 0,5 polegadas.

Figura 7- Procedimento de teste AASTHO T295



FONTE: TROIAN (2010)

Ainda há certa dificuldade em determinar o que os resultados significam. Parte dos problemas se deve às complicadas condições de teste, mas parte também se deve à crieza da avaliação. Poucas informações estão sendo coletadas sobre o perfil de cloreto. Apenas as concentrações médias de cloreto em cada fatia de 0,5 polegada são determinadas, não a variação real da concentração de cloreto sobre essa 0,5 polegada.

Uma situação hipotética pode ser proposta onde há dois corpos de prova de mesma concentração média de cloretos em sua face exposta, uma das amostras contém uma concentração de cloretos aproximadamente uniforme, enquanto o outro tem uma concentração

mais alta próximo a superfície. Consequentemente, a primeira situação irá resultar em uma concentração mais crítica de íons cloreto em algumas profundidades mais cedo que a segunda situação, mas tal distinção não seria detectada. Isso influenciou na necessidade de estender o período de duração para permitir uma melhor qualidade nas avaliações dos concretos.

Um novo teste de difusão foi desenvolvido a fim de superar algumas das deficiências do teste da lagoa de sal, o NordTest (NT BUILD 443-95) é a primeira versão formalmente padronizada do teste de difusão em massa. Uma das diferenças é que no procedimento de teste da norma americana a condição inicial da umidade da amostra deve ser seca por 28 dias, já a nórdica os corpos de prova passam pelo processo de saturação de água e cal, evitando assim quaisquer efeitos iniciais de absorção quando submetidos ao teste em solução de cloretos.

2.6.2. NT BUILD 443-95

O presente ensaio ditado pela norma nórdica NT BUILD 443-95 (*concrete hardened accelerated chloride penetration*) especifica um procedimento de para a determinação dos parâmetros de penetração para estimar a capacidade do concreto de resistir ao ataque de íons cloretos. A norma se aplica para amostras de concreto com maturidade de mais de 28 dias, com diâmetro mínimo de 75mm e comprimento de ao menos 100mm, os corpos de prova devem estar livres de falhas como cavidades e rachaduras, é importante salientar que os valores da penetração de cloretos estão ligados a composição, acabamento, revestimento, cura e idade do concreto, principalmente em concretos contendo adições de pozolanas.

2.6.2.1. Procedimento normativo

De acordo com o procedimento após o período de cura por imersão o corpo de prova deve ser seco e receber a aplicação de tinta impermeabilizante deixo exposta apenas uma das faces da amostra, por onde os cloretos tendem a passar durante o processo de ensaio, ao término da secagem da camada de impermeabilização deve-se imergir a amostra em solução saturada de cal Ca(OH)_2 a cerca de 23 °C em recipiente plástico devidamente fechado, o recipiente deve ser preenchido até o topo a fim de evitar a carbonatação do líquido, após um dia de exposição a solução a massa na condição seca é determinada (msd) pesando o corpo de prova. O armazenamento na solução concentrada de Ca(OH)_2 prossegue até a taxa de variação de msd não mudar em mais de 0,1% em massa por 24 horas, a importância da saturação da amostra se

dá pelo fato de que se trata de um procedimento que visa quantificar os valores de difusão de cloretos no concreto sendo assim necessário mitigar quaisquer processos de absorção capilar no concreto ensaiado.

Figura 8 - Corpos de prova impermeabilizados



FONTE: MITTRI (2016)

Após o processo de saturação da amostra inicia-se o processo de imersão em solução salina contendo aproximadamente 165g de cloreto de sódio (NaCl) por litro de solução sendo que este líquido é usado por 5 semanas até ser substituído por uma nova solução contendo cloreto de sódio (NaCl) puro sendo necessário realizar a verificação da concentração de cloreto de sódio na solução ao menos antes e após o uso, a temperatura da solução contendo a amostra deve ser de 21-25°C com a temperatura média alvo de 23°C sendo importante medir a temperatura pelo menos uma vez ao dia, a exposição da amostra na solução deve ter duração de no mínimo 35 dias, ao término desta etapa são retiradas amostras em pó do corpo de prova de furações com diferentes profundidades.

Figura 9 - Corpos de prova em imersão na solução salina



FONTE: MITTRI (2016)

A retirada de tais amostras se baseia em furar o corpo de prova de forma que se consiga obter material em pó de 8 profundidades diferentes, sendo que as camadas perfuradas devem possuir no mínimo 1,0mm, após a coleta do material das camadas é possível determinar o teor de concentração de cloretos em cada uma das amostras, e partindo deste ponto é possível estimar o coeficiente de difusão de íons cloretos no corpo em teste.

Os valores de C_s e D_e são determinados ajustando a equação a seguir aos teores de cloretos medidos por meio de uma análise de regressão não linear de acordo com o método de ajuste de mínimos quadrados apresentado na equação 1.

$$C_{(x, t)} = C_s - (C_s - C_i) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_e \cdot t}}\right) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$C_{(x, t)}$ é a concentração de cloreto, medida na profundidade x no tempo de exposição t (% em massa); C_s é a condição de contorno na superfície exposta (% em massa); C_i é a concentração inicial de cloreto medida na fatia de concreto (% em massa); x é a profundidade abaixo da superfície (até o meio de uma camada (m)); D_e é o coeficiente efetivo de transporte de cloreto (m^2/s); t é o tempo de exposição da amostra (s).

A função de erro do teste (erf) é descrita a seguir na equação 2.

$$\operatorname{erf} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^z \exp(-u^2) du \quad (\text{Equação 2})$$

As tabelas com os valores da função de erro são fornecidas em livros matemáticos de referência padrão. O parâmetro de penetração Kc_r é calculado na Equação 3 usando os valores de C_i , C_s , D_e e C_r na equação o valor C_r é definido para 0,05 % em massa, a menos que outro valor seja necessário.

$$Kc_r = 2\sqrt{D_e} \cdot \text{erf}^{-1} \left(\frac{C_s - C_i}{C_s - C_r} \right) \quad (\text{Equação 3})$$

Na equação em questão, C_r é a concentração de cloreto de uma referência determinada, observa-se que a determinação de Kc_r só é possível quando $C_s > C_r > C_i$, os resultados apresentados no teste são:

- A concentração inicial de cloreto, C_i , indicada para três decimais em % em massa do concreto seco.
- A condição de contorno na superfície exposta, C_s , expressa com três casas decimais em % em massa de concreto seco.
- O coeficiente de transporte efetivo, D_e , indicado para dois números significativos em (m^2/s).
- O parâmetro de penetração, Kc_r , indicado para dois dígitos em ($\text{mm}/\sqrt{\text{ano}}$)

A norma indica que os valores de C_s e D_e não devem ser utilizados diretamente para previsão de penetração de íons cloretos em condições distintas usadas no teste.

Os coeficientes de variação do teste podem ser esperados:

- $C_s = 20\%$
- $D_e = 15\%$
- $K_{0,05} = 10\%$

A análise de regressão não linear é realizada minimizando a soma apresentada na equação seguir:

$$S = \sum_{n=2}^N \Delta C^2(n) = \sum_{n=2}^N (C_m(n) - C_c(n))^2 \quad (\text{Equação 4})$$

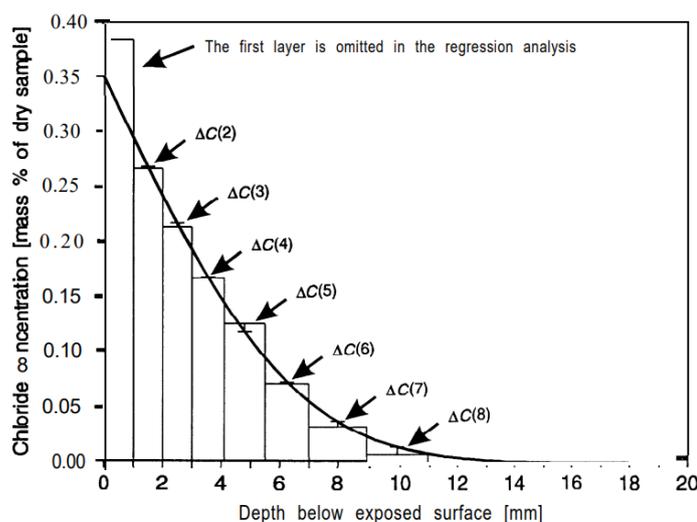
Onde:

S é a soma dos quadrados a ser minimizada ((massa %) ²); N é o número de camadas retificadas no concreto; ΔC (n) (% em massa), é a diferença entre a medida e a concentração de cloretos calculada na camada n de concreto (% em massa); $C_m(n)$ é a concentração de cloreto

na enésima camada de concreto (% em massa); $C_c(n)$ é a concentração de cloretos calculada no meio da enésima camada de concreto (% em massa);

O gráfico para a análise de regressão que a norma apresenta é representado a seguir em duas coordenadas sendo uma delas a profundidade abaixo da superfície exposta [mm] e outra a concentração de cloretos (% em massa de amostra seca).

Figura 10 - Análise de regressão



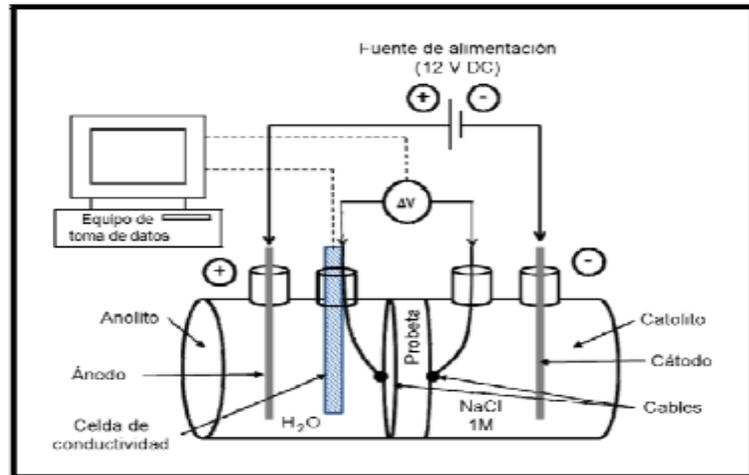
FONTE: NT BUILD (1995)

2.6.3. UNE 83987-14

A norma espanhola UNE 83987 (UNE, 2014) – (*Determinación de los coeficientes de difusión de los iones cloruro em el hormigón endurecido*) apresenta um conjunto de procedimentos para a realização do teste rápido de migração de cloretos no concreto para se obter os resultados com maior precisão sobre o coeficiente de difusão de íons cloretos no concreto, tanto no estado estacionário quanto o não estacionário. O método utilizado para o ensaio consiste em inserir um corpo de prova de concreto entre dois tipos de solução, sendo uma das soluções água destilada e a outra contendo solução salina em proporções de 58,42g de NaCl a cada 1000g de água, conforme a Figura 11 apresenta.

Segundo a norma (UNE, 2014), para ensaio do corpo de prova as amostras devem possuir espessuras entre 2cm e 3cm e diâmetro mínimo de 7,5cm.

Figura 11 – Ilustração do procedimento normativo



FONTE: UNE 83987 (2014)

A norma orienta realizar o ensaio colocando o eletrodo negativo (cátodo), na região contendo a solução salina e na região contendo apenas água o eletrodo positivo (ânodo), após a inserção dos eletrodos e aplicada chamada diferença de potencial de 12V entre os recipientes com as soluções, desta forma os íons cloretos são atraídos pela carga positiva da solução oposta e tendem a migrar através do corpo de prova ensaiado.

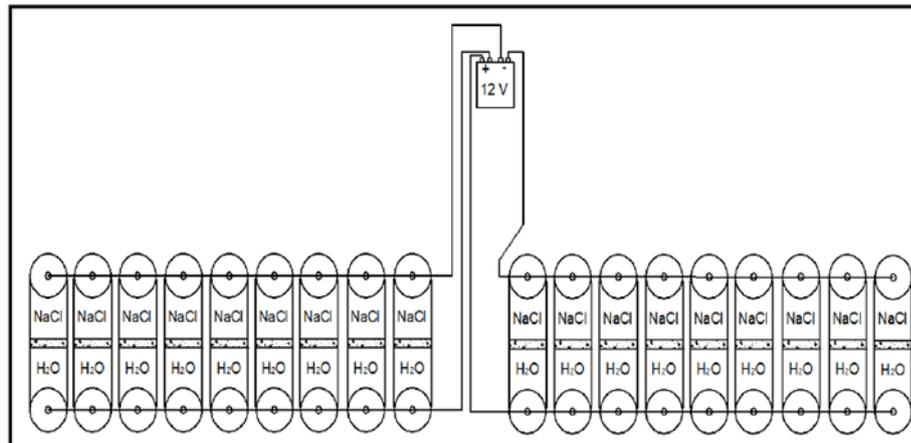
Figura 12 - Ensaio em andamento



FONTE: MITTRI (2016)

Para melhor esclarecimento, na Figura 13 a seguir pode ser visto o diagrama do circuito armado descrito pela norma.

Figura 13 – Diagrama do circuito armado



FONTE: MITTRI (2016)

Durante o período de ensaio, são feitas análises constantes da diferença de potencial entre as soluções e também a leitura da condutividade elétrica da região contendo apenas água destilada, as duas análises são de suma importância para determinar os coeficientes de difusão.

Figura 14 - Procedimento de leitura de tensão



FONTE: MITTRI (2016)

Após o término do ensaio é possível determinar a quantidade de cloretos presentes na solução expresso em (mol), a conversão de condutividade para a quantidade de cloretos é realizável através da equação 5.

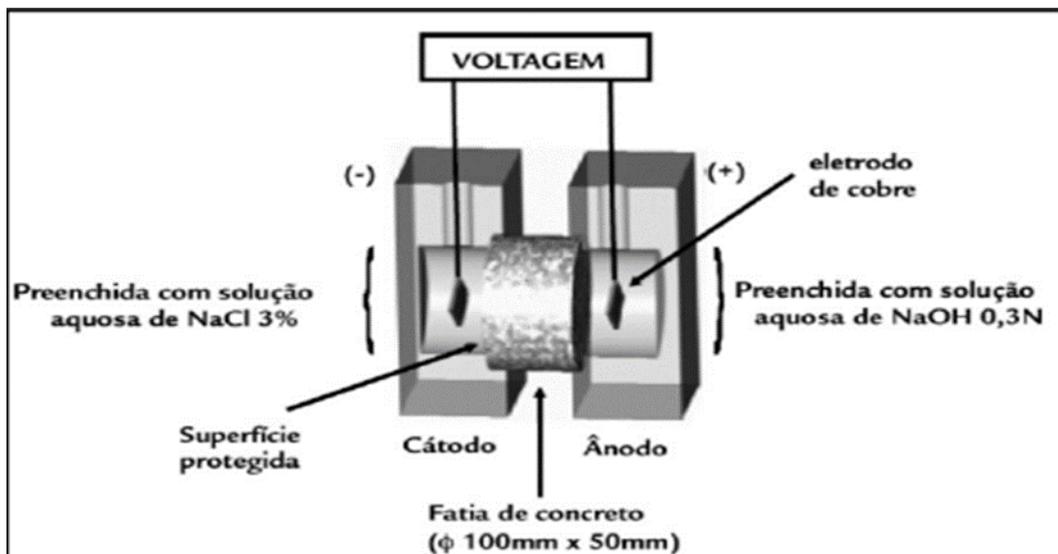
$$Cl^- = 1.10^{-3} \cdot (-1,71 + (11,45 C_{25})).V_a \quad (\text{Equação 5})$$

Onde, Cl^- é a quantidade de cloretos, (mol); C_{25} é a condutividade elétrica obtida na temperatura de 25°C (mS/cm); V_a é o volume da solução no anodo (L).

2.6.4. ASTM C1202-12

A norma americana indica que este método de ensaio abrange a determinação da condutância elétrica do concreto para entregar uma medição rápida de sua capacidade de suportar a penetração de íons cloretos, este método é aplicável a tipos de concreto onde foram estabelecidas correlações entre este procedimento de ensaio com os procedimentos de ensaio com um maior tempo de duração como é o exemplo das orientações ditadas pelo AASHTO T259 e NT Build 443- 95.

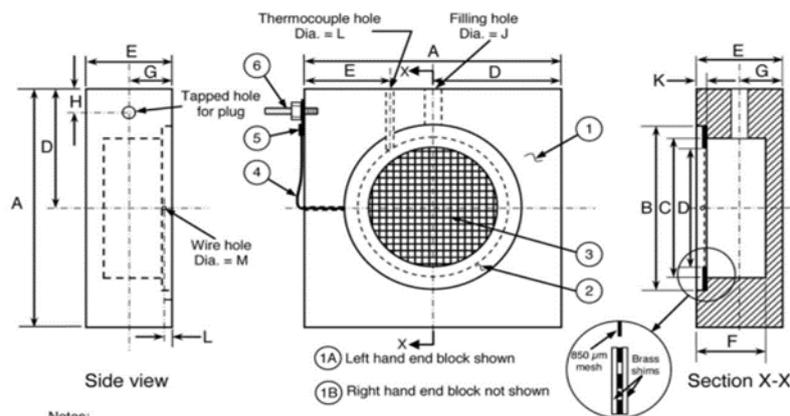
Figura 15 - Aparato de ensaio para teste de migração de cloretos



FONTE: MEDEIROS (2013)

A importância deste método de ensaio se dá pelo fato de que o teste rápido de penetração de íons cloreto no concreto na maioria dos casos apresentam uma boa correlação com os ensaios de retenção de cloro como na ASSHTO T 259 e a norma nórdica NT Build 443-95, o que ajuda na velocidade de análise sobre a resistência do concreto a penetração de íons cloretos favorecendo na determinação das dosagens necessárias para o tipo de exposição da estrutura.

Figura 16 - Célula de tensão aplicada (projeto de construção)



Notes:
Seal wire in hole with silicone rubber
Solder screen between shims
Solder wire to shim

Dimensions, mm

A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M
150	105	89	75	50	41	25	15	10	6	5	2.5

Parts List

Item No.	Quantity	Description	Specification
1A 1B	1	Cell block end	Poly (methyl methacrylate)
2	4	Brass shim	0.5 mm thick
3	2	Brass screen	850 µm (No. 20) mesh
4	2	Solid copper wire	2 mm (14 gauge) nylon cladding
5	2	Ring terminal	For 2 mm (14 gauge) wire
6	2	Banana plug	6.4 mm with threaded stud

FONTE: ASTM C1202 (2012)

2.6.4.1. Procedimento Normativo

O método de ensaio se baseia no monitoramento da quantidade de corrente passando por cilindro de 50mm de espessura de núcleos ou cilindros de 100mm de diâmetro nominal durante o período de 6 horas, com uma diferença de potencial de 60V que é mantida em nas extremidades do corpo de prova ensaiado, das quais uma se encontra imersa na solução contendo cloreto de sódio (NaCl) e a outra em solução contendo hidróxido de sódio (NaOH).

A carga total passante, em coulombs, está relacionada a resistência da amostra a penetração de íons cloreto no concreto. A Figura 17 apresenta os corpos de prova sendo preparados para o ensaio com as faces devidamente impermeabilizadas.

Figura 17 - Amostras com laterais seladas



FONTE: MITTRI (2016)

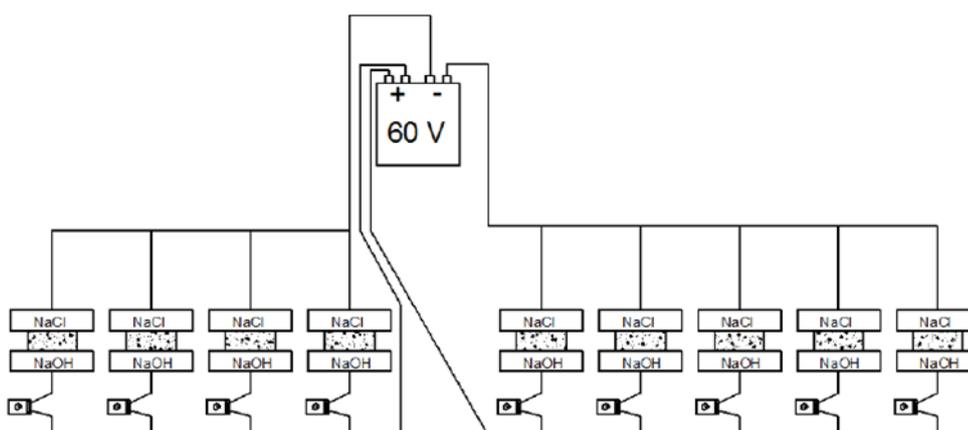
Nas Figuras 18 e 19 pode ser observado o procedimento de saturação das amostras. Este procedimento se faz necessário a fim de conduzir o ensaio de migração de cloretos e evitar a absorção capilar das amostras.

Figura 18 - Processo de Saturação das amostras



FONTE: MITTRI (2016)

Figura 19 - Diagrama do circuito do ensaio de migração



FONTE: MITTRI (2016)

A diferença de potencial em 60V é aplicada por um período de 6h, sendo necessário realizar as verificações da corrente passante através do corpo de prova a cada 30min. Ao final do teste, obtêm-se 12 leituras de corrente, que são utilizadas na para a determinação da carga total passante pela fatia de concreto utilizando as equações descritas pela norma, conforme apresenta a Equação 6.

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + 2I_{90} + 2I_{120} + I_{360}) \quad (\text{Equação 6})$$

Onde, Q = carga passante (em Coulombs); It= corrente medida em t minutos (em Amperes)

Se o diâmetro do corpo de prova for diferente de 95 mm, ou valor A carga passante estabelecida na equação 6 deve ser ajustada conforme a equação 7 apresenta.

$$Q_s = 5 Q_x \left(\frac{x}{95} \right)^2$$

onde, Q_s = Carga Passada através de uma amostra de 95mm de diâmetro (Coulombs), Q_x = Carga passada através da amostra de diâmetro x mm (Coulombs); x = Diâmetro (mm) da amostra não padronizada (mm).

Figura 20 - Ensaio de Migração de Cloretos



FONTE: MITTRI (2016)

Após a determinação da carga total passante a norma indica utilizar a Tabela 3 para contribuição da definição qualitativa a intensidade da penetração de cloretos no concreto.

Tabela 3 - Classificação dos concretos de acordo com a carga passante

Carga Passante (Coulomb)	Permeabilidade aos íons de cloretos
> 4000	Alta
2000 – 4000	Moderada
1000 – 2000	Baixa

100 – 1000	Muito Baixa
<100	Insignificante

FONTE: ASTM C1202 (2012)

3. Metodologia

Este estudo é composto por uma revisão da literatura especializada publicada entre janeiro de 1995 e outubro de 2022 – excluindo-se artigos de revisão, patente e capítulos de livros – tratando de temas relacionados ao ensaio de resistência do concreto a penetração de íons de cloreto preconizado pela ASTM C1202. Para isso, realizou-se consulta a artigos científicos presentes no banco de dados Google Acadêmico, Scielo e Elsevier ScienceDirect, buscando, em português e inglês, pelas seguintes palavras-chave: RCPT, ASTM C1202, AASTHO T259, teste rápido de penetração de cloretos (*rapid chloride permeability test*). Os critérios de inclusão utilizados por esta revisão foram: a presença de ensaios de resistência do concreto a penetração de íons de cloreto; e a caracterização do concreto ensaiado destacando-se suas características mecânicas e o teor de materiais suplementares existentes no concreto. Após coleta dos estudos, buscou-se avaliar os resultados obtidos de carga passante na amostra de concreto, realizando uma distinção dos teores de adições do concreto utilizado por cada autor; o tipo de material suplementar, sendo contemplado somente os concretos com adições de micro sílica, pozolanas e escória de alto-forno; a classe de resistência à compressão de cada concreto ensaiado e o volume dos poros de cada amostra.

A análise foi realizada através da coleta dos dados levantados na bibliografia encontrada. As informações foram, então, colocadas em tabelas e agrupadas por variável. Por meio desta disposição das informações a análise dos trabalhos foi possível identificar a influência de diferentes materiais cimentícios adicionados ao concreto em relação a interação com íons de cloretos e sua alteração nas propriedades mecânicas. Todos os estudos estão

selecionados de acordo com o ensaio preconizado pela ASTM C1202, desse modo os resultados de resistência a penetração de íons de cloretos possuem a mesma unidade de medida, sendo Coulomb (C). As informações sobre a resistência mecânica do concreto apresentam-se em MPa, em conjunto o teor de adições no cimento e o grau de porosidade do concreto encontram-se em percentual em relação a massa do cimento e volume da amostra de concreto, respectivamente. Além disso, foi elaborado gráficos e linhas de tendência dos dados coletados para as variáveis de resistência à compressão, teor de adições e porosidade. A Tabela 4 sumariza os estudos utilizados nesta revisão sistemática da literatura.

Tabela 4 – Sumarização dos estudos utilizados

AUTOR/ANO DE PUBLICAÇÃO	TÍTULO	MEIO DE DIVULGAÇÃO
MAGALHÃES, T. A. (2019)	ANÁLISE DA PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS CONTENDO DIFERENTES TEORES DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO	DISSERTAÇÃO
FORNASIER, R. S. (1995)	POROSIDADE E PERMEABILIDADE DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COM MICROSSÍLICA	DISSERTAÇÃO
SATO, N. M. N. (1998)	ANÁLISE DA POROSIDADE E DE PROPRIEDADES DE TRANSPORTE DE MASSA EM CONCRETOS	TESE (DOUTORADO)
PEREIRA, V. G. Á. (2001)	AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS: INFLUÊNCIA DO TIPO DE CIMENTO, DA RELAÇÃO A/C, DA TEMPERATURA E DO TEMPO DE CURA	DISSERTAÇÃO
HOFFMAN, A. T. H. (2001)	INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA, RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE, TEMPERATURA E TEMPO DE CURA NO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS	DISSERTAÇÃO
MENDES, G. G. (2014)	DURABILIDADE DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE SÍLICA DA CASCA DE ARROZ À PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETOS	DISSERTAÇÃO
SILVA, F. G. (2006)	ESTUDO DE CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO FRENTE À AÇÃO DE CLORETOS	TESE (DOUTORADO)
MITTRI, S. H. M. (2016)	CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS TRATADO TERMICAMENTE EM RELAÇÃO AOS ASPECTOS MECÂNICOS E DE DURABILIDADE	DISSERTAÇÃO
WALLY, G. B.; JUNIOR, F. K. S. (2019)	ENSAIOS ACELERADOS DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS APLICADOS À ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DO CONCRETO E À VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS EM AMBIENTE MARINHO	REVISTA TÉCNICO-CIENTÍFICA DO CREA-PR
SIQUEIRA, H. C. (2008)	PENETRACAO DE CLORETOS EM CONCRETOS COMPOSTOS COM CIMENTO PORTLAND BRANCO E ESCORIA DE ALTO FORNO ATIVADOS QUIMICAMENTE	DISSERTAÇÃO
OZÓRIO, B. P. M. (2016)	CONCRETO LEVE COM PÉROLAS DE EPS: ESTUDO DE DOSAGENS E DE CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS	TESE (DOUTORADO)

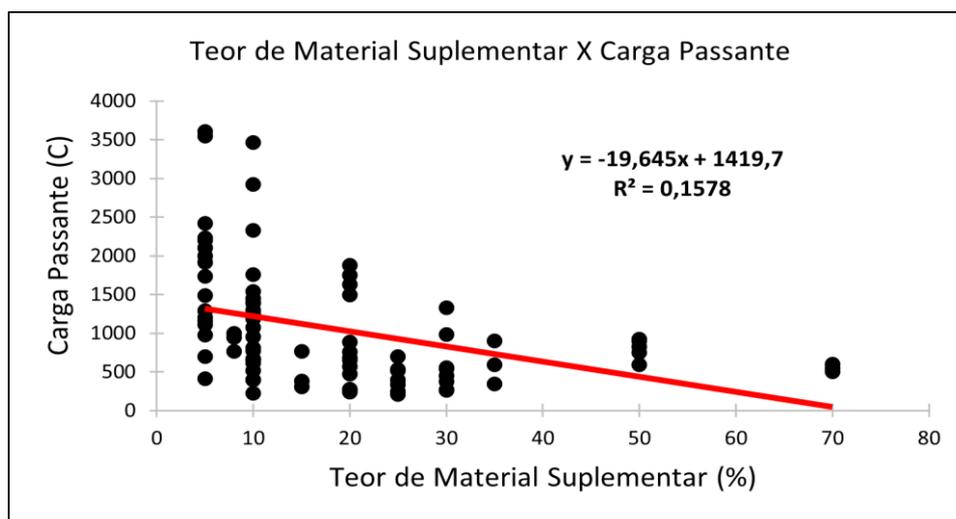
LACERDA, C. S. (2005)	ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND POR METACAULIM EM CONCRETOS	DISSERTAÇÃO
SARASWATHY & SONG (2006)	STUDIES ON THE CORROSION RESISTANCE OF REINFORCED STEEL IN CONCRETE WITH GROUND GRANULATED BLAST-FURNACE SLAG- AN OVERVIEW	DISSERTAÇÃO
MISSAU, F. (2004)	PENETRAÇÃO DE CLORETOS DE CONCRETOS CONTENDO DIFERENTES TEORES DE CINZA DE CASCA DE ARROZ	DISSERTAÇÃO
ZAMBERLAN, F. B. (2013)	PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS COMPOSTOS COM CINZA DE CASCA DE ARROZ DE DIFERENTES TEORES DE CARBONO GRAFÍTICO	DISSERTAÇÃO
BARATA, M. S. (1998)	ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE PRODUÇÃO DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COM OS MATERIAIS DISPONÍVEIS EM BELÉM ATRAVÉS DO EMPREGO DE ADIÇÕES DE SÍLICA ATIVA E METACAULIM.	DISSERTAÇÃO
CERVO, T. C. (2002)	INFLUÊNCIA DA FINURA E DO TEOR DE POZZOLANDA NA PENETRAÇÃO DE CLORETOS E NA SOLUÇÃO AQUOSA DOS POROS DO CONCRETO	DISSERTAÇÃO
KIRCHHEIM, A. P.; PASSUELO, A.; MOLIN, D. C.; SILVA, L. C. P. (2004)	AVALIAÇÃO DA PENETRAÇÃO ACELERADA DE CLORETOS EM CONCRETOS MOLDADOS COM CIMENTO PORTLAND BRANCO ESTRUTURAL	SEMENGO
MATOS, P. R. (2019)	EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR CINZA VOLANTE EM CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS DE ALTO DESEMPENHO	REVISTA TÉCNICO-CIENTÍFICA DO CREA-PR
COSTA, F. B. P. (2015)	ANÁLISE DA DURABILIDADE DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ELEVADA CAPACIDADE DE DEFORMAÇÃO REFORÇADOS COM FIBRAS	DISSERTAÇÃO
DIAS, A. R. O.; AMANCIO, F. A.; LUCAS, S. O.; LIMA, B. A.; CABRAL, A. E. B. (2019)	AVALIAÇÃO DA PENETRAÇÃO ACELERADA DE ÍONS CLORETO EM CONCRETOS PRODUZIDOS COM MATERIAIS DA CIDADE DE FORTALEZA	REVISTA TÉCNICO-CIENTÍFICA DO CREA-PR

4. Resultados e Discussões

4.1. Influência dos teores de materiais suplementares

A Figura 21 apresenta o comportamento da carga passante obtida pelo ensaio acelerado de migração de cloretos ASTM C1202 (ASTM, 2012) em função do teor dos materiais suplementares.

Figura 21 - Teor de Material Complementar x Carga Passante



FONTE: Elaboração própria (2022)

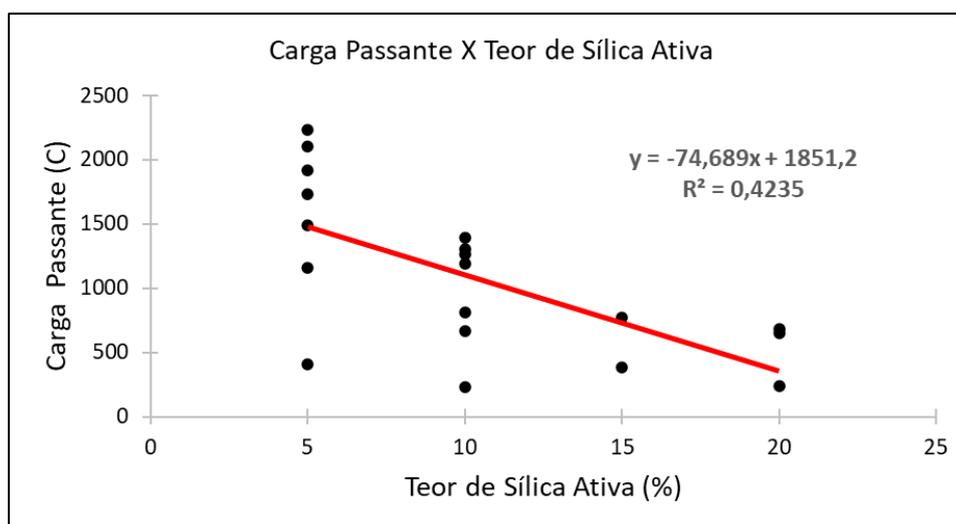
É possível observar que o aumento do teor de adição é também responsável pela diminuição dos poros e aumento da capacidade de resistência a compressão o que influencia na diminuição da carga passante no concreto, é percebido também que para concretos de mesmo traço o aumento dos teores de adição tem grande influência na resistência a compressão e carga passante.

4.2. Comportamento de adições de sílica ativa

É comum observar que as adições de sílica ativa beneficiam os concretos em que são utilizadas por se tratar de um material extremamente fino, a adição influencia significativamente nas propriedades do concreto tais como volume de vazios, coesão, porosidade, resistência à compressão e penetrabilidade.

A Figura 22 apresentada abaixo correlaciona a adição de sílica ativa com a carga passante no concreto por meio do teste rápido de migração de cloretos, no gráfico é possível observar que a tendência da carga passante é de diminuir conforme o aumento da porcentagem de adição nos estudos analisados, que variam de 0 a 20%.

Figura 22 - Teor de Sílica Ativa x Carga Passante



FONTE: Elaboração Própria (2022)

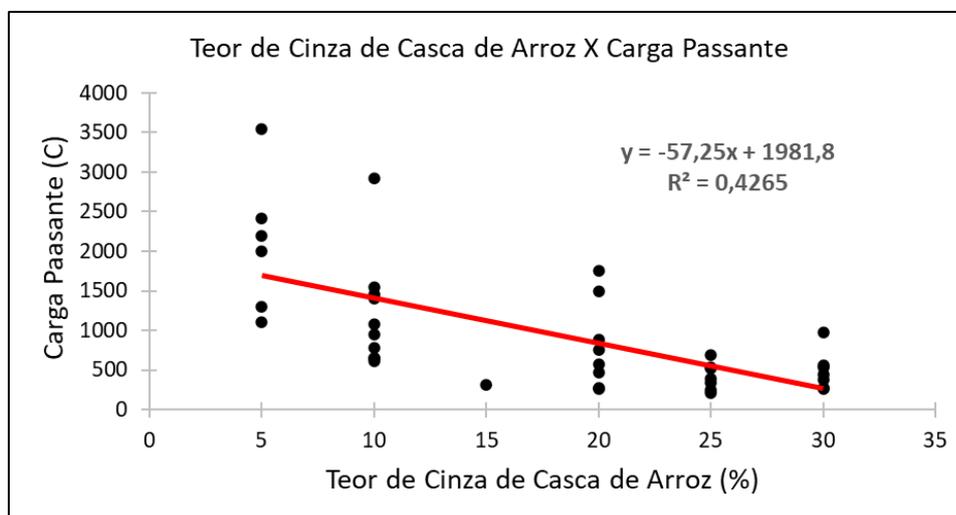
É sabido que o aumento significativo do teor de adição com uma relação a/lig constante pode gerar resultados indesejados, no entanto, dentro dos limites da pesquisa é possível afirmar que a adição de sílica ativa na ordem de até 20% influencia positivamente no que se refere a redução da carga passante de íons cloretos.

4.3. Comportamento de adições de cinza de casca de arroz

A Figura 23 ilustra o comportamento de concretos com diferentes teores de Cinza de Casca de Arroz (CCA) em relação à quantidade de carga passante. Pode-se observar que o

acréscimo dos percentuais de teores de CCA em substituição ao cimento, propiciou a diminuição na carga passante nos concretos avaliados.

Figura 23 - Teor de Cinza de Casca de Arroz x Carga Passante



FONTE: Elaboração Própria (2022)

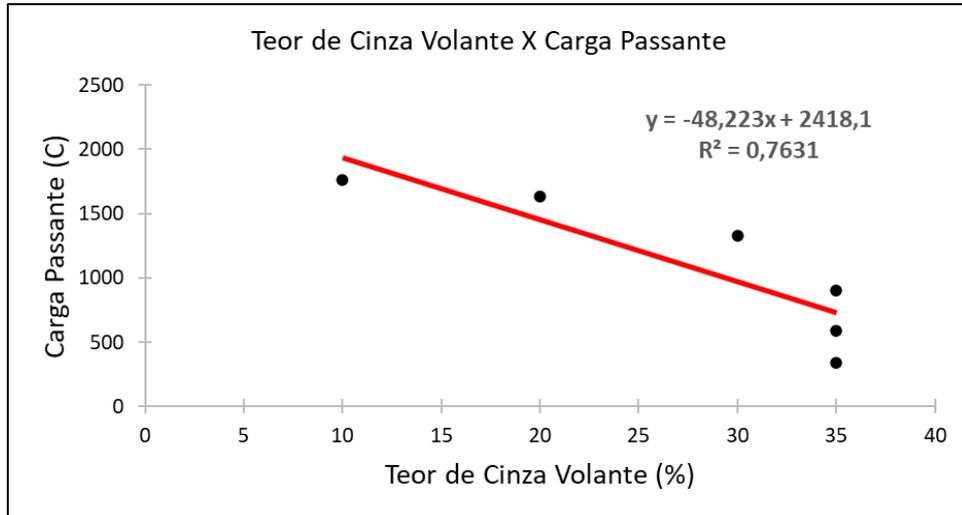
Embora seja comprovada uma possível substituição de mais de 70% do cimento por CCA, podemos observar através da Figura 23 que bastam de 10 a 20% de substituição para que o concreto desfrute de uma formidável atenuação da permeabilidade promovida pela CCA e, conseqüentemente, gerando uma redução da carga passante.

Mehta e Malhotra (2002) testam que as adições minerais de CCA, ocasionam considerável refinamento dos poros, ou seja, proporcionam a transformação de grandes poros em poros pequenos, processo que acarreta redução abundante em relação à permeabilidade do concreto e, portanto, um aumento da durabilidade.

4.4 Comportamento de adições de cinza volante e escória de alto forno

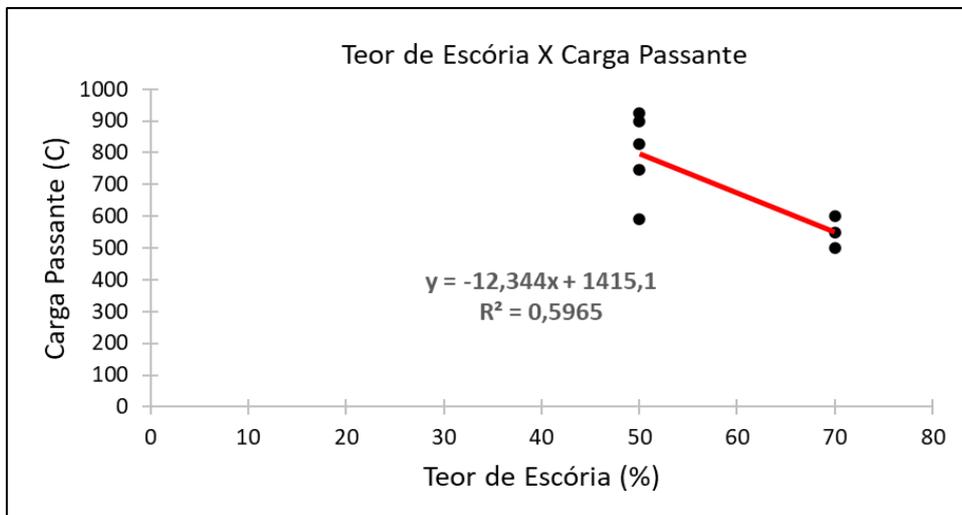
As Figuras 24 e 25 apresentam os resultados de diferentes teores de adição de cinza volante e escória de alto forno. Estas adições contribuem para a produção dos silicatos de cálcio hidratados em conjunto com a hidratação do cimento, influenciando na redução da porosidade e no aumento da resistência à compressão do concreto, logo, há uma redução da carga passante.

Figura 24 – Teor de Cinza Volante x Carga Passante



FONTE: Elaboração própria (2022)

Figura 25- Teor de Escória x Carga Passante



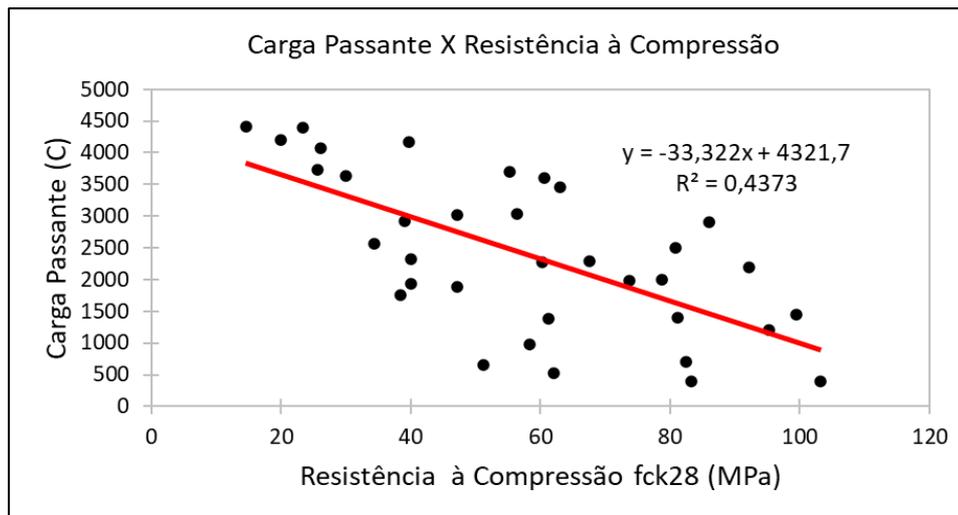
FONTE: Elaboração própria (2022)

É possível observar que o aumento da proporção destes materiais influencia no transporte de carga dos concretos ensaiados pela norma americana ASTM C1202, porém, os gráficos em questão possuem dados limitados, sendo necessário pesquisas mais aprofundadas para afirmar com maior segurança sobre o comportamento de tais adições em relação à carga passante no concreto.

4.5 Influência da resistência à compressão na carga passante

A Figura 26 apresentada, ilustra a influência dos níveis de adição nos traços estudados sendo elas sílica ativa, microssílica, metacaulim, cinza de casca de arroz, sílica ferrosilício e pozolanas.

Figura 26- Resistência à Compressão x Carga Passante



FONTE: Elaboração própria (2022)

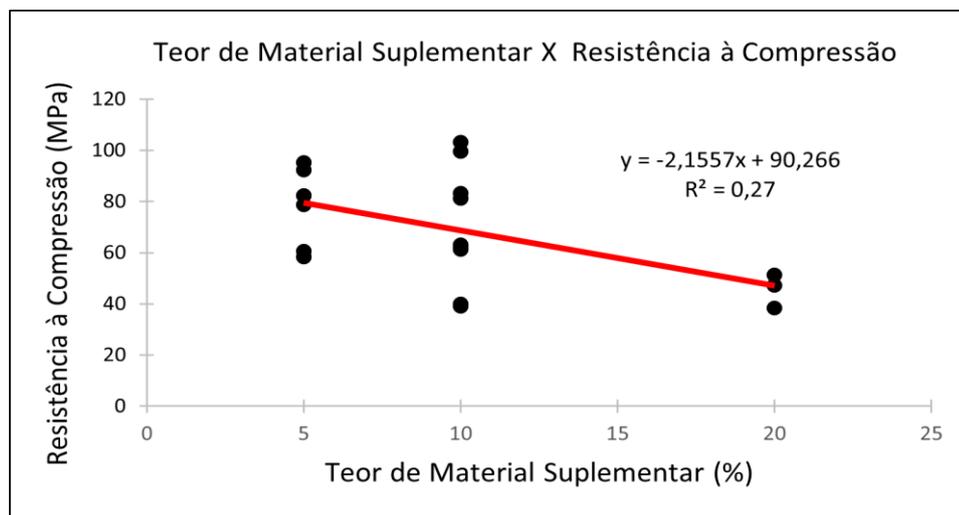
Com base nos resultados coletados da literatura, pode-se observar que a carga iônica passante reduz linearmente com o aumento da resistência à compressão. Isso pode estar ligado ao fato de que concretos com maiores resistências mecânicas e de alto desempenho possuem menor porosidade e permeabilidade. Estas características estão ligadas a durabilidade e resistência do concreto ao ataque de agentes agressivos, portanto contribuem na diminuição da migração e difusão de íons cloretos.

4.6 Comportamento da resistência à compressão em relação ao teor de material suplementar

Observa-se através da Figura 27, o comportamento da resistência à compressão dos concretos analisados em relação aos diferentes teores de materiais suplementares utilizados. Por meio dos resultados obtidos, é possível constatar que não há correlação direta entre maiores porcentagens de materiais suplementares e maiores valores de resistência à compressão. Esta

constatação pode estar ligada a fatores como: à influência que o teor ótimo dos materiais suplementares possui sobre a resistência à compressão do concreto e o tempo necessário para a completa reação dos materiais com propriedades pozolânicas.

Figura 27 – Teor de Material Suplementar x Resistência à Compressão



FONTE: Elaboração Própria (2022)

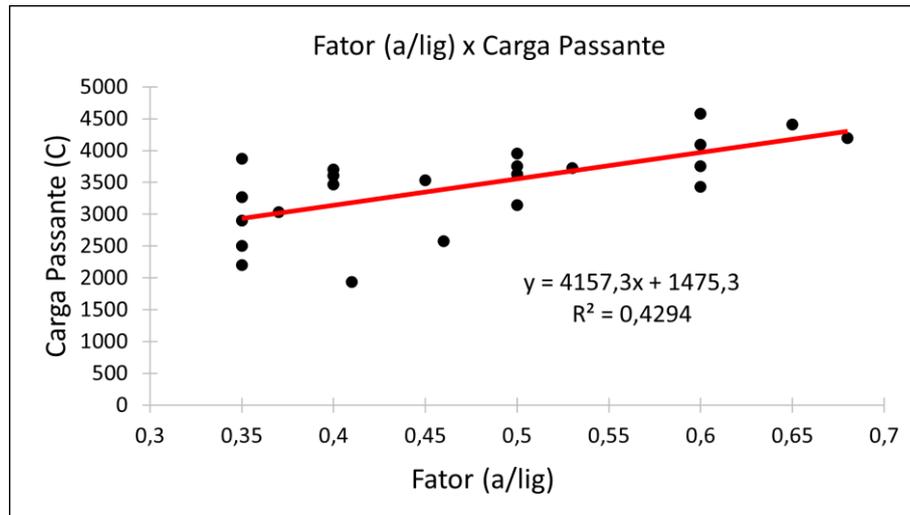
Outros fatores que podem estar influenciando nos resultados obtidos está relacionado aos teores de sílica reativa (SiO_2) presentes em cada tipo de pozolana, o qual é responsável por reagir com hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), dando origem a silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), responsáveis pela resistência mecânica.

Contudo, vale ressaltar, que devido à escassez de dados encontrados, é necessária uma avaliação mais abrangente para obter conclusões evidentes relacionadas à tendência apresentada.

4.7 Comportamento em relação ao fator a/lig

A Figura 28 ilustra o comportamento do concreto com diferentes fatores a/lig em relação à quantidade de carga passante. Pode-se observar que em todos os elementos analisados, independente da composição de seu traço, a redução do fator a/lig reduziu a quantidade de carga passante, atribuindo ao concreto uma menor permeabilidade e, conseqüentemente, maior resistência à penetração de cloretos, como já era aguardado.

Figura 28 - Fator a/lig x Carga Passante



FONTE: Elaboração Própria (2022)

Esta tendência é um assunto amplamente estudado por diversos estudiosos. Missau (2004), ao estudar teores de substituição ao cimento de 10 a 30% de CCA, com fatores a/lig de 0,35 a 0,65, notou diminuição das quantidades de carga passante conforme o decréscimo da relação a/lig. Ngala et al (1995), afirma que a relação a/lig é o principal fator que influencia a penetração de cloretos no concreto. E conclui que nestes concretos de baixa relação a/lig, os íons cloreto são induzidos a se encaminharem por acessos mais sinuosos e poros desunidos, o que dificulta seu ingresso para o interior do concreto.

Através dos resultados analisados é possível notar a enorme influência da quantidade de água na penetrabilidade do concreto e, por consequência, na resistência do concreto à penetração de cloretos, visto que em todas as amostras investigadas, quanto maior a relação a/lig, maior a quantidade de carga passante no concreto.

5 Conclusões

Após a coleta dos dados na literatura sobre os concretos com diferentes materiais suplementares e diferentes dosagens submetidas aos procedimentos normativos descritos pela norma americana ASTM C1202 e ensaios a resistência a compressão axial foi possível concluir que a incorporação dos materiais suplementares tende a diminuir a carga passante de íons cloreto no concreto.

Em concretos com substituição do cimento por escoria de alto forno os resultados coletados possuem a predisposição a reduzir a carga passante de íons cloreto. Esta característica pode se dar ao fato de que além de formar C-S-H, ela também atua preenchendo os vazios existentes no concreto contribuindo na diminuição do volume dos poros.

Em concretos com adições pozolânicas a tendência de diminuição da carga passante de íons cloretos pode ser explicada pela maior concentração de silicatos de cálcio hidratados formados pela reação destes materiais com hidróxido de cálcio, que daria maior coesão ao concreto. E também por refinar a interface da matriz cimentícia com o agregado, fatores que diminuem a permeabilidade do concreto.

Os concretos com maiores resistências à compressão tendem a ter maior resistência a penetração dos íons cloretos em razão de sua menor penetrabilidade e maior coesão, fatores que combinados refletem em suas características mecânicas como a porosidade. Este contexto também é observado na análise dos fatores a/l_{ig} , onde concretos com menores relações possuem menor carga passante principalmente por sua menor porosidade.

6 Referências

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 259-02: Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration**. 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1202-22: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration**. ASTM International, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Guia básico de Cimento Portland**. 7ª ed. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655 – Concreto – Preparo, controle e recebimento**. Rio de Janeiro, 2006.

AL-KHAJA, W. A., **Influence of temperature, cement type and level of concrete consolidation on chloride ingress in conventional and high-strength concrete**. Construction and Building Materials, vol. 11, no. 1, pp. 9-13, 1997.

BASTOS, P. S. **Fundamentos do Concreto Armado**. Notas de Aula. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2017.

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

CINCOTTO, M. A. **Ciência dos materiais aplicada aos ligantes inorgânicos - Cimentos**. Notas de Aula. Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2017.

COSTA, A. B. **Potencial Pozolânico da Cinza Volante como material de substituição parcial do cimento**. Dissertação (Monografia). Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2015.

DIAS, K. N. **Avaliação do teor crítico de cloretos em concreto armado com adição de sílica e matacaulim através dos ensaios acelerados induzidos por campo elétrico e magnético**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2015.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras**. In: Isaia, Geraldo Cechella. Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. v.2, Capítulo 39, p. 1195 – 1225. 2005.

FORNASIER, R. S. **Porosidade e permeabilidade do concreto de alto desempenho com microssilica**. Dissertação (Pós-Graduação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

FUSCO, P. B. **Técnica de Armar as Estruturas de Concreto**. São Paulo: PINI, 2007.

GENG C., XU Y., WENG D., WU X. **A time-saving method to determine the chloride threshold level for depassivation of steel in concrete**. *Construction and buildingmaterial*24p.903-909. 2010.

GENTIL, V.; **Corrosão**. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora: Rio de Janeiro, 2007.

GOMES, E. A. **Análise comparativa da resistência à corrosão de aços carbono em ensaios de campo e testes eletroquímicos**. 2013. 104f. Dissertação (Mestrado em engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Belo Horizonte, MG, Brasil, 2013.

GOUDA, V.K., HALAKA, W.Y., **Corrosion and Corrosion Inhibition of Reinforcing Steel Embedded in Concrete**, *British Corrosion*, nº 5, pp 204-208, 1970.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese. Departamento de Engenharia de Construção Civil – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. **Reabilitação e Manutenção de Estruturas de Concreto**. In: HELENE, P.; PEREIRA, F. *Reabilitação e Manutenção de Estruturas de Concreto*. 1a. ed. São Paulo: Sika, 2007. p. 17–32.

HOFFMANN, A. T. **Influência da adição de sílica ativa, relação água/liglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos**. Dissertação (Pós-Graduação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

KLEIN, R. **Dimensionamento por computador de vigas simplesmente apoiadas de concreto protendido pós-tracionadas**, dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

LACERDA, C. S. **Estudo da influência da substituição de cimento Portland por metacaulim em concretos**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

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

MALHOTRA V. M, **Fly ash, slag fume and rice husk ash in concrete a review.** Concrete International, Michigan - USA, v.15, n.4, p. 23-98, 1993.

MALHOTRA, VM e MEHTA, P K. **Concreto de cinzas volantes de alto desempenho e alto volume: materiais, dosagem de mistura, propriedades, práticas de construção e histórias de casos.** Canadá: N. p., 2002. Web.

MASSUCATO, C. J. **Utilização de escória de alto-forno à Carvão vegetal como adição no concreto.** Tese (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MAZER, W.; MACIOSKI, G.; SOTO, N.; **Penetração de íons cloreto em estruturas de concreto armado.** In: Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ 2014. Blucher Chemical Engineering Proceedings, v.1, n.2. São Paulo:Blucher,2015.

MCGRATH P, F, HOOTON R, D. **Re-evaluation of the AASHTO T259 90-day salt ponding test.** Department of Civil Engineering, University of Toronto - Toronto, 1999

MEDEIROS, M. H. F.; GOBBI, A.; GROENWOLD, J. A.; HELENE, P. **Previsão da vida útil de concreto armado de alta resistência com adição de metacaulim e sílica ativa em ambientes marinhos.** Engenharia Civil. Ouro Preto. MG. 2013

MEHTA, P. H.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials, Fourth Edition.** 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

MISSAU, F. **Penetração de cloretos de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz.** 2004. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

MITTRI, S. H. M. **Contribuição ao estudo do comportamento de concretos produzidos com resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente em relação aos Aspectos mecânicos e de durabilidade.** Dissertação (Pós-Graduação). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

MONTINI, M. **Aplicações de Resíduo de bauxita e cinza pesada da indústria do alumínio na fabricação de Cimento Portland.** Tese (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto.** 2ª edição. Bookman, São Paulo, 2013.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto.** 5ª edição. Bookman, São Paulo, 2016.

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

NT BUILD 443, Concrete, hardened: accelerated chloride penetration, **Nordtest method**, 1995.
PEREIRA, R. S. **Ativação do Cimento Siderúrgico.** Dissertação (Especialização). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

PINHEIRO, L.M., GIONGO, J.S. **Concreto armado: propriedades dos materiais.** São Carlos, EESC-USP, 1986.

QUARCIONI, V. A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland – Estudo em Pasta.** Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SILVA, F. G. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos.** Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SOUSA, C.A.C. **Corrosão em Estruturas de concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise.** Organizador Daniel Vêras Ribeiro. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, p.12.(2014).

SOUZA, A. F. **Otimização do Uso de Aditivo Estabilizador de hidratação do cimento em água de lavagem dos caminhões-betoneira para produção de concreto.** Tese (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

TANG, L. **Concentration dependence of diffusion and migration os chloride íons. Part 2. Experimental evaluation.** Cement and Concrete Research, USA: Pergamon, v.29, p. 1469-1474, 1999.

TIBONI, R. **A utilização da cinza da casca de arroz de termoeétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento portland.** Tese (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade da São Paulo, São Carlos, 2007.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto.** Dissertação de Mestrado - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

UNE 83987-14. Durabilidad Del hormigon. Metodos de ensayo. **Determinacion de los coeficientes de difusion de los iones cloruro em el hormigon endurecido. Metodo multirregimen**, 2014.

VIEIRA, F. M. P. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa.** Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

YILDIRIM, H.; ILICA, T.; SENGUL, O. **Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration.** *Construction and Building Materials*, v. 25, p. 1282-1288, 2011.

ZAMPIERI, V. A. **Mineralogia e Mecanismos de ativação e reação de pozolanas de argilas calcinadas.** Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.