

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Fernando Augusto Finkler

**INGRESSO DE ÍONS CLORETO NO CONCRETO: ESTUDO DA INFLUÊNCIA  
DOS AGREGADOS**

Santa Cruz do Sul

2020

Fernando Augusto Finkler

**INGRESSO DE ÍONS CLORETO NO CONCRETO: ESTUDO DA INFLUÊNCIA  
DOS AGREGADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. MSc. Lucas Alexandre Reginato

Santa Cruz do Sul

2020

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Deomar e Jaqueline, ao meu irmão, Leonardo e especialmente a minha namorada, Andressa, por terem me apoiado durante toda esta etapa da vida acadêmica.

Aos professores que fizeram parte dessa grande jornada de aprendizado acadêmico e de vida, especialmente ao meu orientador, Prof. MSc. Lucas, por ter dedicado o seu tempo para me auxiliar nos diversos momentos do ano, pelos muitos ensinamentos e conversas realizadas.

## RESUMO

Com a evolução da tecnologia, especialmente do concreto e dos softwares de cálculo estrutural, foi permitido que as estruturas de concretos armado se tornassem mais esbeltas e trabalhassem com solicitações atuantes mais próximas do seu limite de segurança. Portanto, o tema de durabilidade das estruturas de concreto armado é fundamental, devendo ser levado em consideração já na fase no projeto, para obter estruturas que atendam aos requisitos de vida útil previstos nas normas, prevenindo acidentes e evitando perdas humanas e materiais. As estruturas presentes em regiões litorâneas, tendem a sofrer com processos corrosivos da armadura, ocasionados pelo ingresso de íons cloreto provenientes do mar, através da camada de cobertura. Sendo assim, a camada de concreto que protege as armaduras deve ser pouco porosa e pouco permeável. Para garantir isso, o concreto deve atender alguns requisitos, como um baixo coeficiente de difusão de cloretos. Como o ingresso de íons cloreto é um processo muito complexo, e relativamente demorado, são necessárias simplificações e ensaios acelerados. Neste estudo analisou-se a influência que os agregados de diferentes composições mineralógicas e granulométricas poderiam ter no coeficiente de difusão de íons cloreto, já que a zona de transição formada na interface pasta-agregado, é um caminho poroso e, portanto, preferencial dos íons cloreto. Foram usados agregados graúdos de rocha basáltica e calcária, e agregados miúdos de areia natural de rio, artificial de granito e artificial de basalto. O método para obter os coeficientes de difusão foi o proposto por Andrade (1993), sendo o ensaio de migração de cloretos. Após realizadas as etapas de caracterização dos materiais utilizados, realizou-se os ensaios de resistência a compressão axial, absorção de água e índice de vazios, e por fim, o ensaio de migração. Os resultados obtidos mostram que os agregados miúdos exercem mais influência do que os agregados graúdos na difusão de cloretos. A composição mineralógica afetou de forma considerável os resultados, já que os concretos que utilizavam areia industrial de rocha granítica, apresentaram coeficientes de difusão mais elevados que os demais. Os agregados graúdos de basalto e calcário obtiveram desempenhos semelhantes, sem diferenças consideráveis. Foram analisados traços com duas relações água-cimento (a/c) diferentes, e percebeu-se que este parâmetro nem sempre é o mais adequado para prever a durabilidade de uma estrutura, tendo em vista que um concreto com resistência de 29,8 MPa e fator a/c de 0,60 obteve coeficiente de difusão mais baixo do que outro com 44,2 MPa e fator a/c de 0,50, devido a mudanças nos agregados. Por fim, foram encontradas correlações entre a corrente elétrica medida no ensaio e o coeficiente de difusão das amostras, colaborando para o desenvolvimento de novas técnicas de análise das propriedades de durabilidade do concreto.

**Palavras-chave:** Difusão. Migração. Cloretos. Agregados. Concreto.

## ABSTRACT

Technology advances, especially in concrete and structural softwares for analysis and design, allowed reinforced concrete structures to become slimmer and work closer to their ultimate loads. Therefore, the theme of durability of reinforced concrete structures is fundamental, and should be taken into account already in the design phase, to obtain structures that meet the requirements of service life prescribed in the standards, preventing accidents and avoiding human and material losses. The structures in coastal regions tend to suffer from corrosive processes of the reinforcement, caused by the entry of chloride ions from the sea, through the concrete cover. Therefore, the concrete that protects the reinforcement must be the less porous and less permeable as possible. To guarantee this, the concrete must attend some requirements, such as a low chloride diffusion coefficient. As the entry of chloride ions is a very complex and relatively time-consuming process, simplifications and accelerated tests are necessary. In this study we analyzed the influence that aggregates of different mineralogical and granulometric compositions could have on the diffusion coefficient of concrete, since the interfacial transition zone formed at the paste-aggregate interface is a porous and, so, a preferred path of ions chloride. Coarse aggregates of basaltic and limestone rock, and fine aggregates of natural river sand, crushed granite and crushed basalt were used. The method for obtaining the diffusion coefficients was the proposed by Andrade (1993), being the chloride migration test. After carrying out the characterization steps of the materials used, the tests of resistance to axial compression, water absorption and voids index were carried out, and finally, the migration test. The results obtained show that the fine aggregates exert more influence than the coarse aggregates in the diffusion of chlorides. The mineralogical composition affected the results considerably, since the concretes that used crushed granitic rock as fine aggregate, presented higher diffusion coefficients than the others. The coarse aggregates of basalt and limestone achieved similar performances, without considerable differences. Specimens with two different water-cement ratios ( $w/c$ ) were analyzed, and it was noticed that this parameter is not always the most suitable to predict the durability of a structure, considering that a concrete with a strength of 29.8 MPa and  $w/c$  factor of 0.60 obtained a lower diffusion coefficient than another specimen with 44.2 MPa and  $w/c$  factor of 0.50, due to changes in the fine aggregate. Finally, correlations were found between the electric current measured in the test and the diffusion coefficient of the samples, contributing to the development of new techniques for analyzing durability-related properties of concrete.

**Keywords:** Diffusion. Migration. Chlorides. Aggregates. Concrete.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação esquemática do modelo de vida útil de estruturas de concreto armado, proposto por Tuutti.....	16
Figura 2- Proposta de Helene para vida útil das estruturas .....	16
Figura 3 - Influência da espessura do cobrimento ( <i>Concrete cover thickness</i> ) no tempo de iniciação da corrosão em anos ( <i>Time</i> ) segundo CEB, 1989 .....	18
Figura 4 - Representação de uma pilha de corrosão com um mesmo metal. ....	31
Figura 5 – Volume dos compostos resultantes do processo corrosivo do ferro metálico .....	33
Figura 6 – Diagrama simplificado de potencial e pH para o sistema Fe-H <sub>2</sub> O.....	33
Figura 7 - Representação do avanço do processo de carbonatação.....	34
Figura 8 - Diagrama de Pourbaix simplificado para o sistema ferro-água com cloretos (335 ppm).....	37
Figura 9 - Influência do teor de umidade sobre o risco de corrosão .....	39
Figura 10 - Estrutura de concreto armado exposta à água do mar .....	40
Figura 11 - Valores de <i>time lag</i> ( $\tau$ ) estimados a partir de ensaios de migração de cloretos, em concretos com diferentes relações a/c (w/c).....	42
Figura 12 - Relação dos coeficientes de difusão ( $D_{ns}$ e $D_s$ ) com relação a/c, obtidos através do ensaio de migração .....	43
Figura 13 - Relação entre a vida útil estimada em anos ( <i>Service Life</i> ) e a relação a/c .....	43
Figura 14 - Fluxograma das atividades .....	52
Figura 15 – Agregados utilizados nos ensaios.....	54
Figura 16 - Distribuição granulométrica da brita 0 .....	56
Figura 17 - Distribuição granulométrica da brita 1 .....	56
Figura 18 - Distribuição granulométrica das areias utilizadas .....	58
Figura 19 - Aditivos utilizados .....	59
Figura 20 - Massa unitária do agregado gráudo de calcário.....	61
Figura 21 - Massa unitária do agregado gráudo de basalto .....	61
Figura 22 - Representação esquemática do ensaio de migração de cloretos.....	66
Figura 23 - Exemplo do aparato de ensaio de migração de cloretos, feito com tubos e peças de PVC .....	66
Figura 24 -Representação do aparato utilizado no ensaio de migração .....	67
Figura 25 - Medição e selagem das amostras de concreto .....	68
Figura 26 - Medição da tensão nos aparatos de migração de cloretos .....	69

Figura 27 - Medição da condutividade na célula anódica .....	70
Figura 28 - Medição da corrente elétrica que atravessa o aparato de migração .....	70
Figura 29 - Correlação entre a condutividade elétrica e a concentração de íons cloreto .....	71
Figura 30 - Representação gráfica para obtenção do <i>timelag</i> e do fluxo de cloretos (J).....	72
Figura 31 - Resultados de absorção de água e índice de vazios do concreto .....	75
Figura 32 - Resultados de massa específica do concreto.....	75
Figura 33 - Resultados de resistência à compressão axial do concreto .....	77
Figura 34 - Evolução da concentração de Cl <sup>-</sup> na célula anódica durante o ensaio de migração .....	78
Figura 35 - Coeficientes de difusão e fluxo de cloretos .....	79
Figura 36 - Relação entre os coeficientes de difusão e o <i>Timelag</i> .....	80
Figura 37 - Comparação dos coeficientes de difusão dos traços com areia natural .....	81
Figura 38 - -Comparação dos coeficientes de difusão dos traços com areia artificial de basalto .....	81
Figura 39 - Comparação dos coeficientes de difusão dos traços com areia artificial de granito .....	82
Figura 40- Comparação dos coeficientes de difusão dos traços com brita de basalto .....	82
Figura 41- Comparação dos coeficientes de difusão dos traços com brita de calcário .....	83
Figura 42 - Influência da relação a/c no coeficiente de difusão .....	84
Figura 43 – Coeficientes de difusão VS Corrente elétrica .....	85
Figura 44 - Fluxo de cloretos VS Corrente elétrica.....	85
Figura 45 -Correlação entre o fluxo de cloretos e o pico de corrente elétrica.....	86
Figura 46 -Correlação entre o coeficiente de difusão estacionário e o pico de corrente elétrica .....	86
Figura 47 - Correlação entre o coeficiente de difusão não estacionário e o pico de corrente elétrica .....	87
Figura 48 - Evolução da corrente elétrica e concentração de cloretos .....	88
Figura 49 - Vida útil estimada através dos coeficientes de difusão.....	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de agressividade ambiente (CAA) conforme NBR 6118 (ABNT, 2014)...	19
Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$ conforme NBR 6118 (ABNT, 2014) .....	20
Tabela 3 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto conforme NBR 12655 (ABNT, 2015) .....	20
Tabela 4 - Requisitos para o concreto, em condições especiais de exposição conforme NBR 12655 (ABNT, 2015).....	21
Tabela 5 - Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto conforme NBR 12655 (ABNT, 2015) .....	21
Tabela 6 - Exigências de durabilidade relacionadas à abertura de fissuras em estruturas de concreto armado segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014).....	21
Tabela 7 - Classes de exposição relacionadas com as ações ambientais de acordo com a BS EN 206 (2013) .....	22
Tabela 8 - Máximo teor de cloretos do concreto conforme a BS EN 206 (2013).....	23
Tabela 9 - Valores recomendados para composição e propriedades do concreto expostos à ação de cloretos, conforme BS EN 206 (2013) e BS EN 1992-1 .....	24
Tabela 10 - Classes e categorias de exposição conforme o ACI 318 (2019) .....	24
Tabela 11 - Requisitos adicionais para concretos da categoria C conforme ACI 318 (2019)..	25
Tabela 12 - Requisitos de composição e resistência do concreto para a categoria C de acordo com o ACI 318 (2019).....	25
Tabela 13 - Cobrimento mínimo para estruturas de concreto armado moldadas in loco conforme o ACI 318 (2019).....	25
Tabela 14 - Classificação ambiental segundo GB/T 50476 (2008).....	26
Tabela 15 - Requisito mínimos para estruturas de concreto armado expostas ao ambiente marinho e ação de agentes de gelo-degelo, para uma vida útil de 50 anos conforme GB/T 50476 (2008) .....	27
Tabela 16 - Requisitos para resistência do concreto ao ingresso de cloretos conforme GB/T 50476 (2008) .....	27
Tabela 17 - Classificação das condições ambientais para corrosão da armadura de acordo com a SCS-Design (2007).....	28
Tabela 18 - Requisitos de durabilidade (parciais) para corrosão da armadura conforme as orientações da SCS- Design (2007).....	28



Tabela 19 - Especificações para adequada durabilidade de estruturas de concreto armado expostas à ambientes agressivos com presença de cloretos (água do mar, ação de sais de gelo-degelo etc.).....	30
Tabela 20 - Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018).....	44
Tabela 21 - Caracterização da Brita 0 .....	55
Tabela 22 - Caracterização da Brita 1 .....	55
Tabela 23 - Caracterização do agregado miúdo .....	57
Tabela 24 - Massa unitária e índice de vazios dos agregados graúdos.....	60
Tabela 25 - Traços de concreto utilizados .....	62
Tabela 26 - Quantidade de aditivo utilizado e respectivo abatimento de cada traço.....	63
Tabela 27 - Espessura média das fatias utilizadas no ensaio de migração .....	68
Tabela 28 - Resultados de absorção, índice de vazios e massa específica do concreto .....	74
Tabela 29 - Resultados de resistência à compressão axial do concreto.....	76
Tabela 30 - Resultados do ensaio de migração de cloretos .....	79

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 Área de pesquisa.....	13
1.2 Limitação do Tema.....	13
1.3 Objetivos .....	13
1.3.1 Objetivo Geral .....	14
1.3.2 Objetivos Específicos .....	14
1.4 Justificativa.....	14
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>15</b>
2.1 Degradação das estruturas de concreto armado pela corrosão das armaduras .....	15
2.1.1 Impacto econômico das manutenções e reparos das estruturas .....	17
2.1.2 Qualidade do concreto .....	18
2.1.3 Cobrimento das armaduras .....	18
2.1.4 Considerações sobre a normalização Brasileira e internacionais .....	19
2.1.4.1 Norma Brasileira.....	19
2.1.4.2 Norma Europeia.....	22
2.1.4.3 Norma Americana.....	24
2.1.4.4 Norma Chinesa .....	25
2.1.4.5 Norma Japonesa.....	27
2.1.4.6 Síntese comparativa.....	28
2.2 Corrosão em estruturas de concreto armado.....	31
2.3 Principais mecanismos de despassivação das armaduras .....	33
2.3.1 Carbonatação .....	34
2.3.2 Íons Cloreto .....	36
2.4 Fatores que influenciam a penetração de Íons Cloreto no concreto. ....	38
2.4.1 Fatores ambientais e condições de exposição .....	39
2.4.2 Características do concreto .....	41

2.4.2.1 Relação água/cimento (a/c) .....	42
2.4.2.2 Tipo de cimento .....	44
2.4.2.3 Presença de adições minerais .....	45
2.4.2.4 Coeficiente de difusão .....	47
2.4.2.5 Fissuras no concreto .....	48
2.4.2.6 Agregados .....	48
2.5 Métodos de proteção das armaduras.....	49
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>51</b>
3.1 Caracterização dos materiais utilizados.....	53
3.1.1 Cimento .....	53
3.1.2 Agregados.....	53
3.1.2.1 Agregado graúdo .....	54
3.1.2.2 Agregado miúdo .....	57
3.1.3 Água .....	58
3.1.4 Aditivos .....	58
3.2 Determinação da proporção dos agregados .....	60
3.3 Definição dos traços de concreto.....	61
3.4 Caracterização do concreto.....	62
3.4.1 Procedimentos de moldagem e cura .....	63
3.4.2 Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto ...	64
3.4.3 Determinação da resistência à compressão axial.....	64
3.5 Ensaio de migração de cloretos .....	64
3.5.1 Realização do ensaio .....	67
3.5.2 Obtenção da curva experimental de cloretos .....	70
3.5.3 Cálculo dos coeficientes de difusão e estimativa da vida útil do concreto.....	71
<b>4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>74</b>
4.1 Absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto .....	74
4.2 Resistência do concreto à Compressão Axial.....	76

4.3 Migração de cloretos .....	78
4.3.1 Influência dos agregados graúdos.....	80
4.3.2 Influência dos agregados miúdos .....	82
4.3.3 Influência da relação água/cimento .....	84
4.3.4 Relação entre a corrente elétrica e os parâmetros de difusividade do concreto .....	84
4.3.5 Estimativa de vida útil .....	88
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>91</b>
5.1 Sugestões para trabalhos futuros .....	92
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>94</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>100</b>
<b>APÊNDICE A – Imagens da face de uma amostra de cada traço de concreto analisado .....</b>	<b>100</b>
<b>APÊNDICE B – Gráficos da evolução da concentração de cloretos e da corrente elétrica nas amostras analisadas .....</b>	<b>102</b>
<b>APÊNDICE C – Imagens das faces de algumas amostras analisadas após o ensaio de migração .....</b>	<b>107</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os materiais cimentícios já foram utilizados há muitos séculos pelos Egípcios, através do gesso impuro, e pelos Gregos e Romanos, que aprenderam a misturar o calcário calcinado com areia, pedra fragmentada e água, sendo este o primeiro concreto da história. O Panteão construído pelos Romanos, em Roma, resiste até hoje com o material cimentício ainda firme, mostrando a sua fascinante durabilidade. Porém houve um declínio geral da qualidade e do uso do cimento na Idade Média, e os avanços no conhecimento sobre esse material ocorreram apenas no século XVIII (NEVILLE, 2011).

O concreto de cimento Portland foi descoberto na segunda metade do século XIX, e através do seu intenso uso no século XX, tornou-se o material mais consumido pelo homem depois da água, contribuindo imensamente para a construção de estruturas, o que sempre esteve relacionado com o desenvolvimento das civilizações ao longo da história. Atualmente ele é o material estrutural e de construção civil mais importante (ANDRADE e HELENE, 2017).

O principal desafio que o trabalho da engenharia na indústria do concreto enfrenta atualmente é a corrosão das armaduras, que faz com que bilhões de Dólares sejam gastos em todo o mundo, sendo um exemplo, os gastos bilionários em reparos de tabuleiros de pontes nos Estados Unidos. Por esse motivo é muito importante conhecer as causas da corrosão, os parâmetros do concreto e as condições ambientais que atuam na estrutura e contribuem para corrosão e o aumento da taxa de propagação (EL-REEDY, 2018).

Como as estruturas de concreto expostas ao ambiente sofrem alterações, que podem comprometer a sua estabilidade e funcionalidade ao longo do tempo, é importante tomar certos cuidados. Infelizmente a evolução da construção civil não trouxe apenas melhorias, pois com as premissas capitalistas impostas, houve um aumento da esbeltez das estruturas e das tensões solicitantes além de uma redução do cobrimento das armaduras, o que reduziu a durabilidade das edificações (CASCUDO e RIBEIRO, 2018).

O cloreto é o agente agressivo mais comum incorporado ao concreto involuntariamente, através de aditivos aceleradores de pega, agregados e água contaminados e por realização de limpezas com produtos contendo cloretos (RIBEIRO, 2018). A proteção natural originalmente oferecida pelo concreto de cobrimento é bastante prejudicada pela presença de certas substâncias e sais agressivos, como os cloretos, que promovem uma despassivação precoce da armadura, mesmo em ambientes altamente alcalinos, e nos casos em que a armadura já está em corrosão, essas substâncias agressivas aceleram o processo, aumentando as taxas de corrosão (HELENE, 1993).

Como os mares e oceanos ocupam quase 80% da superfície terrestre, existe muitas cidades localizadas nos litorais, nas quais as estruturas de concreto estão expostas à água do mar direta ou indiretamente. A atmosfera marinha contém cloretos de sódio e magnésio, e a velocidade de corrosão em tal ambiente pode ser entre 30 e 40 vezes maior do que em atmosfera rural pura, sendo a proximidade da estrutura de concreto em relação à água do mar, um dos fatores que influenciam na velocidade (ALMEIDA e SALES, 2018).

Sendo assim os problemas de durabilidade das estruturas tendem a acentuar nos próximos anos, já que boa parte das edificações dos principais centros urbanos brasileiros foram construídas nas décadas de 1970 e 1980, e portanto, estão completando entre 40 e 50 anos de vida, momento em que os reparos e manutenções ficam mais rotineiros. É fundamental levar todo o conhecimento gerado nas instituições de ensino e pesquisa ao setor produtivo, mesmo que a indústria da construção se mostre como uma das mais conservadoras e menos abertas a inovações, especialmente quando isso traz impactos econômicos na cadeia (CASCUDO e RIBEIRO, 2018).

### **1.1 Área de pesquisa**

O presente trabalho será realizado na área de Patologia e Durabilidade das estruturas de concreto armado, com foco no mecanismo de corrosão induzida por íons cloreto.

### **1.2 Limitação do Tema**

O estudo fará uma comparação de diferentes traços de concreto e suas propriedades, como a difusão de íons cloreto, estimando os coeficientes de difusão no estado estacionário e não estacionário, assim como a vida útil.

### **1.3 Objetivos**

Com o propósito de verificar a influência, de traços com diferentes granulometrias e composições mineralógicas dos agregados, no coeficiente de difusão de íons cloreto do concreto, foram propostos os seguintes objetivos.

### **1.3.1 Objetivo Geral**

Analisar a influência da granulometria e composição mineralógica dos agregados graúdos e miúdos, nas propriedades do concreto relacionadas com o transporte de agentes agressivos como os íons cloreto.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Realizar um estudo de proporção ideal de agregados graúdos e miúdos no traço de concreto, a fim de obter uma ótima compacidade nas misturas.
- Comparar traços de diferentes tipos de agregado graúdo (Basalto e calcário), e de agregado miúdo (Areia natural, artificial de granito e artificial de basalto) com os resultados obtido no ensaio de migração de cloretos.
- Calcular os coeficientes de difusão de cloretos no concreto através dos resultados do ensaio de migração de íons cloreto.
- Estimar a vida útil dos traços de concreto analisados
- Analisar a relação da corrente elétrica do ensaio de migração com os resultados de fluxo de cloretos e coeficientes de difusão.

### **1.4 Justificativa**

A corrosão das armaduras do concreto armado resulta em altos custos de reparo, e quase sempre é originada por uma baixa espessura de cobrimento e/ou um concreto de baixa qualidade, ou seja, poroso e com pouca resistência. As abordagens modernas não se atam apenas à resistência a compressão como o único indicador de durabilidade, especificando também as características e propriedades do material em função de uma almejada Vida Útil para o ambiente em questão (BOUNY, CAPRA e LAURENS, 2008).

Portanto estudar as propriedades do concreto, como a difusão de agentes agressivos na sua estrutura porosa, torna-se muito importante, pois as pesquisas nessa área contribuem para melhores parâmetros de projeto que indicam a durabilidade, além de acrescentarem dados experimentais à uma área tão importante e relacionada com o desenvolvimento sustentável.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Nesse capítulo serão abordadas algumas considerações sobre a vida útil e durabilidade das estruturas de concreto armado com enfoque no mecanismo de corrosão do aço no concreto, dando ênfase ao processo de corrosão induzido por íons cloreto. Serão apresentados os principais fatores que influenciam o ingresso desses íons no concreto, assim como algumas alternativas para inibir ou postergar a corrosão. Será feita também uma breve análise comparativa de 5 normas sobre projeto de estruturas de concreto armado de diferentes países, com foco nas classes de agressividade ambiental que abordam ambientes com íons cloreto, junto com os respectivos requisitos do concreto para garantir uma adequada durabilidade.

### **2.1 Degradação das estruturas de concreto armado pela corrosão das armaduras**

A utilização do concreto armado como principal material de construção é devido a maior durabilidade dos componentes, já que o aço permaneceria protegido pelo concreto das possíveis agressividades do meio externo. É importante entender que a durabilidade e a vida útil são termos com grande associação, apesar das suas diferenças conceituais (RIBEIRO et al., 2018).

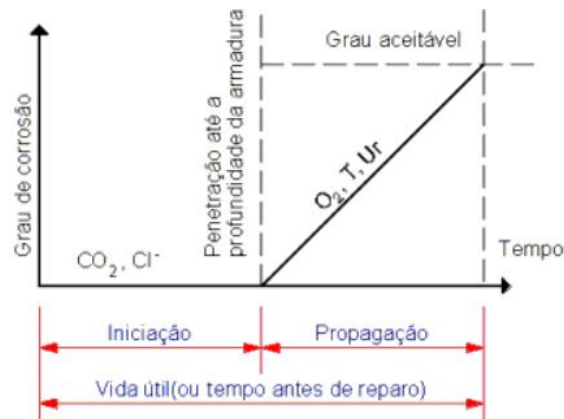
Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnica (ABNT) NBR 6118 (ABNT, 2014, p.13) a durabilidade “Consiste na capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto”.

O conceito de Vida Útil de Projeto (VUP) utilizado pela NBR 6118:2014 se refere ao período de tempo no qual a estrutura de concreto mantém suas características sem que haja intervenções significativas, necessitando atender os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, assim como da execução de eventuais reparos em decorrência de danos acidentais (ABNT, 2014).

Assim faz-se necessário, para que se obtenha a VUP, a compreensão e estudo dos modelos de vida útil e de degradação das estruturas de concreto, sendo fundamentais para que os engenheiros projetistas melhorem o entendimento dos mecanismos de degradação, prevendo com mais precisão a vida útil das estruturas de concreto. Para explicar o conceito de vida útil, Tutti (1982) propôs um modelo simplificado sob o ponto de vista da corrosão das armaduras dividido em dois períodos: o período de iniciação da corrosão e o período de propagação, conforme apresentado na Figura 1 (RIBEIRO e CASCUDO, 2018).

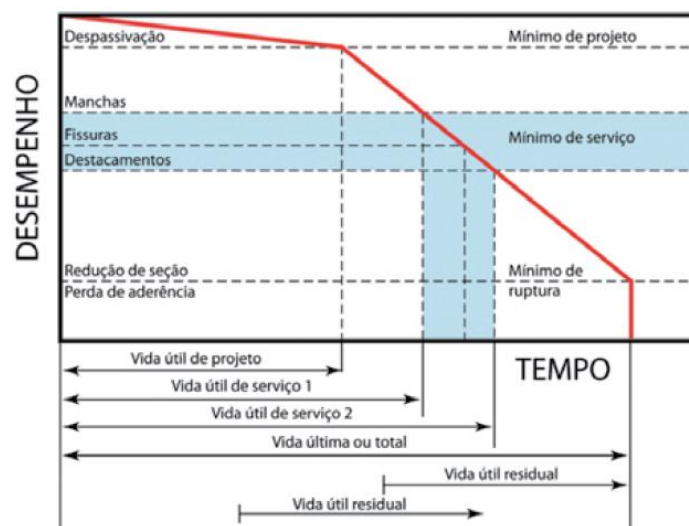


**Figura 1 - Representação esquemática do modelo de vida útil de estruturas de concreto armado, proposto por Tuutti.**



Segundo Ribeiro e Cascudo (2018) ao referenciar o modelo proposto por Helene (1993), a vida útil global de uma estrutura de concreto é subdividida em 4 partes e representa melhor o comportamento da estrutura ao longo do tempo. A parte da vida útil de projeto é quando os agentes agressivos, como cloretos, ainda estão ingressando o cobrimento sem causar danos efetivos a estrutura. A vida útil de serviço refere-se quando a funcionalidade, a estética ou segurança da estrutura será comprometida em decorrência das manifestações dos agentes agressivos. Vida útil total representa o período que vai até o colapso total ou parcial da estrutura. E por fim a vida útil residual é o período de tempo que a estrutura ainda irá desempenhar suas funções de maneira satisfatória a partir de uma intervenção da estrutura. Na Figura 2 são apresentados os fatores descritos acima.

**Figura 2- Proposta de Helene para vida útil das estruturas**



### 2.1.1 Impacto econômico das manutenções e reparos das estruturas

No Brasil, após a análise de 700 relatórios técnicos de casos de patologia em diferentes regiões do país, e com base no faturamento das nove maiores empresas de recuperação do Brasil, e dos seis maiores escritórios de recuperação estrutural, foi visto que no ano de 1987 foram gastos US\$ 28 milhões em obras de recuperação e reforço, onde a corrosão foi responsável por 27% dos casos (CARMONA FILHO e MAREGA, 1988 *apud* HELENE, 2018).

No âmbito global das consequências da corrosão, Ribeiro (2018, p.125) afirma que

O problema da corrosão metálica é bastante significativo: de acordo com a *National Association of Corrosion Engineers (NACE International)*, o custo global da corrosão é estimado em US\$ 2,5 trilhões, o que equivale a 3,4% do PIB mundial (2013), podendo chegar a 5% da receita de uma nação industrializada (CALLISTER, 2002). Ao usar práticas de controle de corrosão disponíveis, estima-se que economias entre 15 e 35% do custo da corrosão possam ser realizadas, ou seja, entre US\$ 375 e US\$ 875 bilhões, anualmente, em uma base global. Esses custos normalmente não incluem segurança individual ou consequências ambientais.

O controle da corrosão traz benefícios na redução de custos, e isso foi aprendido muitas vezes pela indústria, geralmente tarde demais, gerando eventos catastróficos como acidentes, falhas e perda de produção. Implementar um sistema de gerenciamento de corrosão (*Corrosion Management System*) e integrá-lo com um sistema de gerenciamento geral de uma organização é algo obrigatório para se atingir todos os benefícios possíveis de economia (NACE, 2016).

Quanto mais cedo for realizada a intervenção ou o controle da corrosão, menor serão os custos, e isso é demonstrado pela Regra de Sitter ou “Lei dos 5”. Essa regra relaciona o custo de manutenção/intervenção com a fase em que ela é realizada na estrutura, onde os custos crescem em proporção geométrica de razão 5, sendo a fase de projeto (custo de intervenção 0) a melhor maneira de evitar gastos com recuperação e patologias, seguida pelas fases de execução (custo de 5), manutenção preventiva (custo de 25) e manutenção corretiva (custo de 125), sendo esta a pior opção/situação (RIBEIRO e CASCUDO, 2018).

Assim é possível ver a importância do projeto na redução dos custos gerados pela corrosão nas estruturas de concreto, já que é nessa fase em que devemos especificar os melhores materiais, técnicas e procedimentos de execução, através de conhecimento técnico e científico, e com isso prevenir e reduzir os desperdícios e gastos desnecessários causados por patologias nas estruturas, em especial a corrosão das armaduras. Isso traz benefícios tanto para o meio ambiente como para as empresas construtoras e os usuários da edificação.

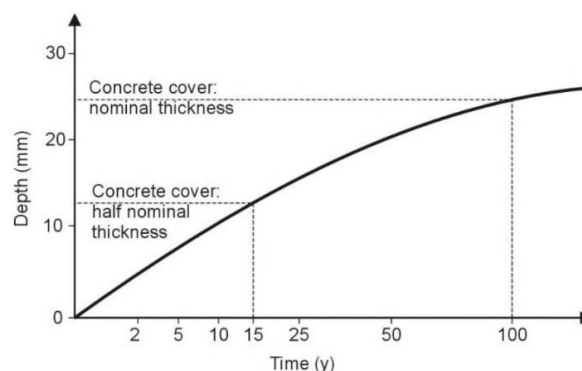
### 2.1.2 Qualidade do concreto

A qualidade do concreto é um fator essencial para se ter uma boa durabilidade e atingir vida útil requerida no projeto, e isso é deixado claro por diversos autores, pesquisadores e normas técnicas citadas no decorrer deste trabalho. Existem diversos métodos para garantir que não ocorram problemas nas estruturas de concreto armado decorrentes da corrosão, sendo o mais importante, garantir um concreto de alta qualidade, com um adequado cobrimento das armaduras e uma baixa permeabilidade (BROOMSFIELD, 2004).

### 2.1.3 Cobrimento das armaduras

O cobrimento de concreto é essencial para proteção das armaduras, porém apenas controlar sua espessura não garante totalmente uma boa durabilidade, fazendo-se necessário controlar também suas características de transporte, como a permeabilidade e difusividade, já que isso assegura uma barreira efetiva contra a entrada de agentes agressivos (BOUNY, CAPRA e LAURENS, 2008). Seguindo nessa linha, Bertolini *et al* (2004) também ressalta a importância de uma espessura adequada de cobrimento, que quando aumentada traz diferentes benefícios, pois aumenta a barreira contra os diversos agentes agressivos que ingressam na estrutura, ampliando o tempo de iniciação da corrosão (Figura 3). Porém em alguns casos extremos, uma espessura exagerada traz efeitos adversos, pelas microfissuras originadas pelos esforços de tração introduzidos pela retração por secagem da camada mais externa, enquanto o interior mais úmido não retrai. Assim na prática, cobrimentos acima de 70 a 90mm não são considerados realistas (BERTOLINI *et al*, 2004).

**Figura 3 - Influência da espessura do cobrimento (*Concrete cover thickness*) no tempo de iniciação da corrosão em anos (*Time*) segundo CEB, 1989**



Fonte: Bertolini *et al*, 2004

## 2.1.4 Considerações sobre a normalização Brasileira e internacionais

Uma análise comparativa de 5 normas técnicas será realizada abaixo, com enfoque à questão dos requisitos do concreto armado (relação a/c, cobrimento, classe de resistência etc.) expostos à ambientes agressivos com presença de íons cloreto, como é o caso dos ambientes marinhos.

### 2.1.4.1 Norma Brasileira

A norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) traz 4 classes de agressividade ambiental, identificando o tipo de ambiente para efeito de projeto e o risco de deterioração da estrutura em cada classe (Tabela 1).

**Tabela 1 - Classes de agressividade ambiente (CAA) conforme NBR 6118 (ABNT, 2014)**

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana <sup>a,b</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>a</sup>	Grande
		Industrial <sup>a,b</sup>	
IV	Muito Forte	Industrial <sup>a,c</sup>	Elevado
		Respingos de maré	

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

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

<sup>c</sup> ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ABNT NBR 6118, 2014.

Além disso a norma apresenta os cobrimentos nominais para os tipos de elemento e estrutura conforme a classe à qual estarão expostos (Tabela 2).

**Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para  $\Delta c = 10\text{mm}$  conforme NBR 6118 (ABNT, 2014)**

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 1)			
		I	II	III	IV <sup>c</sup>
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje <sup>b</sup>	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo <sup>d</sup>	30		40	50
Concreto protendido <sup>a</sup>	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídos por um  $\Delta c = 5\text{mm}$ , respeitando um cobrimento nominal  $\geq 15\text{mm}$ .

c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal  $\geq 45\text{mm}$ .

Fonte: ABNT NBR 6118, 2014.

Em conjunto à estas classificações a NBR 12655 (ABNT, 2015) atenta para as características recomendadas do concreto quando exposto às diferentes características ambientes, apresentando por exemplo os requisitos de qualidade do concreto (Tabela 3), os requisitos para o concreto quando exposto a condições especiais (Tabela 4), e o teor máximo de íons cloreto em estruturas de concreto armado e protendido (Tabela 5).

**Tabela 3 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto conforme NBR 12655 (ABNT, 2015)**

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq \text{C}20$	$\geq \text{C}25$	$\geq \text{C}30$	$\geq \text{C}40$
	CP	$\geq \text{C}25$	$\geq \text{C}30$	$\geq \text{C}35$	$\geq \text{C}40$
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto $\text{kg/m}^3$	CA e CP	$\geq 260$	$\geq 280$	$\geq 320$	$\geq 360$

CA Componentes e elementos estruturais de concreto armado.

CP Componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: ABNT NBR 6118, 2014.

**Tabela 4 - Requisitos para o concreto, em condições especiais de exposição conforme NBR 12655 (ABNT, 2015)**

Condições de exposição	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal	Mínimo valor de $f_{ck}$ (para concreto com agregado normal ou leve) MPa
Condição em que é necessário um concreto de baixa permeabilidade à água, por exemplo, em caixas d'água	0,5	35
Exposição a processos de congelamento e descongelamento em condições de umidade ou a agentes químicos de degelo	0,45	40
Exposição a cloretos provenientes de agentes químicos de degelo, sais, água salgada, água do mar, ou respingos ou borrifação desses agentes	0,45	40

Fonte: ABNT NBR 12655, 2015.

**Tabela 5 - Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto conforme NBR 12655 (ABNT, 2015)**

Classe de agressividade (Tabela 1)	Condições de serviço da estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl) no concreto % sobre a massa de cimento
Todas	Concreto protendido	0,05
III e IV	Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
II	Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,30
I	Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40

Fonte: ABNT NBR 12655, 2015.

Os limites para abertura de fissuras em estruturas de concreto armado de acordo com a CAA são mostrados na Tabela 6.

**Tabela 6 - Exigências de durabilidade relacionadas à abertura de fissuras em estruturas de concreto armado segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014)**

Classe de agressividade (CAA)	Limite para abertura das fissuras (mm)
I	0.4
II e III	0.3
IV	0.2

Fonte: ABNT NBR 6118, 2014.

### 2.1.4.2 Norma Europeia

A norma europeia (baseado nos requisitos Britânicos) BS EN 206 (2013) apresenta 18 classes que descrevem diferentes ambientes (Tabela 7). Os requisitos do concreto para as classes relacionadas com corrosão por íons cloreto, estão apresentados na Tabela 8 e Tabela 9.

**Tabela 7 - Classes de exposição relacionadas com as ações ambientais de acordo com a BS EN 206 (2013)**

(Continua)

Classe	Descrição do ambiente	Exemplos de onde podem ocorrer tais classes
<b>1 Nenhum risco de corrosão ou ataque</b>		
X0	Para concreto sem armadura ou elementos metálico embutidos: todas as exposições, exceto onde há gelo e degelo, abrasão ou ataque químico. Para concreto com armadura ou metal embutido: muito seco	Concreto no interior de edifícios com baixíssima umidade do ar
<b>2 Corrosão induzida por carbonatação</b>		
Onde o concreto contendo armadura ou outro elemento metálico é exposto ao ar e a umidade		
XC1	Seco ou permanentemente molhado	Concreto no interior de edifícios com baixa umidade do ar; concreto permanentemente submerso em água
XC2	Molhado, raramente seco	Superfícies de concreto sujeitas a longos períodos de contato com água; fundações
XC3	Umidade moderada	Concreto no interior de edifícios com umidade do ar moderada a alta; concreto externo protegido da chuva
XC4	Ciclos de molhagem e secagem	Superfícies de concreto sujeitas ao contato com água; não estando dentro da classe XC2
<b>3 Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar</b>		
Onde o concreto contendo armadura ou outro elemento metálico é sujeito ao contato com água contendo cloretos, incluindo sais de degelo, provenientes de fontes que não sejam a água do mar		
XD1	Umidade moderada	Superfícies de concreto expostas a borrifos de cloretos
XD2	Molhado, raramente seco	Piscinas, concreto exposto a águas industriais contendo cloretos
XD3	Ciclos de molhagem e secagem	Partes de pontes expostas a spray contendo cloretos, pavimentos, e lajes de garagens
<b>4 Corrosão induzida por cloreto provenientes da água do mar</b>		
Onde o concreto contendo armadura ou outro elemento metálico esta sujeito ao contato com água do mar contendo cloretos ou sais carregados pelo vento, provenientes da água do mar.		
XS1	Exposto a maresia, mas sem contato direto com a água do mar	Estruturas próximas ao litoral ou no litoral
XS2	Permanentemente submerso	Partes de estruturas marinhas
XS3	Zonas de maré, respingos e spray	Partes de estruturas marinhas
<b>5 Ciclos de gelo e degelo, com ou sem agentes de degelo</b>		
Onde o concreto está exposto a um significativo ataque de gelo e degelo equanto está úmido		
XF1	Moderada saturação de água, sem agentes de degelo	Superfícies de concreto verticais expostas à chuva e congelamento

(Conclusão)

Classe	Descrição do ambiente	Exemplos de onde podem ocorrer tais classes
XF2	Moderada saturação de água, com agentes de degelo	Superfícies de concreto verticais de obras viárias, expostas à congelamento e borrifos contendo cloretos
XF3	Elevada saturação de água, sem agentes de degelo	Superfícies horizontais expostas a chuva e gelo
XF4	Elevada saturação de água, com agentes de degelo ou água do mar	Estradas e lajes de pontes expostas aos agentes de degelo; superfícies de concreto expostas diretamente ao spray de agentes de degelo e congelamento; zonas de respingo de estruturas marinhas expostas ao congelamento

### 6 Ataque químico

Onde o concreto é exposto ao ataque químico de solos naturais e água subterrâneas

XA1	Ambiente químico levemente agressivo	Concreto exposto ao solo natural e à água subterrânea, de acordo com os valores limites estabelecidos para esse tipo de ataque químico.
XA2	Ambiente químico moderadamente agressivo	Concreto exposto ao solo natural e à água subterrânea, de acordo com os valores limites estabelecidos para esse tipo de ataque químico.
XA3	Ambiente químico altamente agressivo	Concreto exposto ao solo natural e à água subterrânea, de acordo com os valores limites estabelecidos para esse tipo de ataque químico.

Fonte: Adaptado da BS EN 206, 2013.

**Tabela 8 - Máximo teor de cloretos do concreto conforme a BS EN 206 (2013)**

Uso do concreto	Máximo teor de Cl no concreto por massa de cimento <sup>b</sup> (em %)
Não contém armadura ou outro tipo de metal embutido, com exceção de dispositivos de elevação resistentes à corrosão	1.00
Contém armadura ou outro metal embutido	0.20
	0.40 <sup>c</sup>
Contém aço protendido em contato direto com o concreto	0.10
	0.20 <sup>c</sup>

b Quando adições são utilizadas e levadas em conta no quantidade de cimento, a quantidade de cloretos é expressa em porcentagem de íons cloreto por massa de cimento mais a massa total de adições que forma levadas em consideração

c Diferentes teores de cloretos podem ser permitidas para concretos contendo CEM III (cimento portland com altos teores de escória de alto forno) de acordo com previsões válidas no lugar de uso.

Fonte: Adaptado da BS EN 206, 2013.



**Tabela 9 - Valores recomendados para composição e propriedades do concreto expostos à ação de cloretos, conforme BS EN 206 (2013) e BS EN 1992-1**

Corrosão induzida por cloretos				Cobrimento mínimo para durabilidade requerida (Concreto armado)		Limite para abertura das fissuras (mm)
Classe de exposição	Classe de resistência <sup>a</sup>	Máxima relação água/cimento <sup>b</sup>	Consumo mínimo de cimento <sup>b</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	Vida útil de 50 anos (Classe S4)	Vida útil de 100 anos (Classe S5)	Concreto armado
XD1	C30/C37	0.55	300	35	40	0.3
XD2				40	45	
XD3	C35/C45	0.45	320	45	50	
XS1	C30/C37	0.50	300	35	40	
XS2	C35/C45	0.45	320	40	45	
XS3			340	45	50	

a - Resistência do cilindro / Resistência do cubo

b - máxima relação a/c e o consumo mínimo de cimento podem ser modificados de acordo com a utilização de cinza volante, sílica ativa, e escoria de alto forno

Fonte: Adaptado da BS EN 206, 2013 e BS EN 1992-1.

### 2.1.4.3 Norma Americana

A norma americana ACI 318 (2019) divide as suas 14 classes em 4 categorias, relacionando cada classe com sua condição de exposição (Tabela 10). Os requisitos do concreto para as classes relacionadas com a ocorrência de corrosão por íons cloreto, estão apresentados na Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13.

**Tabela 10 - Classes e categorias de exposição conforme o ACI 318 (2019)**

Categoria	Classe	Condição	
Gelo e degelo (F)	F0	Concreto não exposto a ciclos de gelo e degelo	
	F1	Concreto exposto a ciclos de gelo e degelo com exposição limitada à água	
	F2	Concreto exposto a ciclos de gelo e degelo com exposição frequente à água	
	F3	Concreto exposto a ciclos de gelo e degelo com exposição frequente à água e exposição aos agentes químicos de degelo	
Sulfato (S)		Sulfato solúvel em água (SO <sub>4</sub> ) no solo, % em massa	Sulfato dissolvido (SO <sub>4</sub> ) em água, ppm
	S0	$SO_4^{2-} < 0.10$	$SO_4^{2-} < 150$
	S1	$0.10 \leq SO_4^{2-} \leq 0.20$	$150 \leq SO_4^{2-} \leq 1500$
	S2	$0.20 \leq SO_4^{2-} \leq 2.00$	$1500 \leq SO_4^{2-} \leq 10000$ ou água do mar
	S3	$SO_4^{2-} > 2.0$	$SO_4^{2-} > 10000$
Em contato com água (W)	W0	Concreto seco em serviço	
	W1	Concreto em contato com água e sem necessidade de baixa permeabilidade	
	W2	Concreto em contato com água e com necessidade de baixa permeabilidade	
Proteção de corrosão da armadura (C)	C0	Concreto seco ou protegido de umidade	
	C1	Concreto exposto à umidade, mas não à uma fonte externa de cloretos	
	C2	Concreto exposto à umidade e a uma fonte externa de cloretos provenientes de agentes de degelo, sais, água salobra, água do mar ou spray dessas fontes	

Fonte: Adaptado do ACI 318, 2019.

**Tabela 11 - Requisitos adicionais para concretos da categoria C conforme ACI 318 (2019)**

Teor máximo de íons cloretos dissolvidos em água ( $Cl^-$ ) no concreto, em % por massa de materiais cimentícios		
Classe	Concreto armado	Concreto protendido
C0	1.00	0.06
C1	0.30	0.06
C2	0.15	0.06

Fonte: Adaptado do ACI 318, 2019.

**Tabela 12 - Requisitos de composição e resistência do concreto para a categoria C de acordo com o ACI 318 (2019)**

Classe	Máxima relação a/c	Mínimo $f_c'$ , Mpa
C0	-	17
C1	-	17
C2	0.40	35

Fonte: Adaptado do ACI 318, 2019.

**Tabela 13 - Cobrimento mínimo para estruturas de concreto armado moldadas in loco conforme o ACI 318 (2019)**

Exposição do concreto	Elemento estrutural	Cobrimento mínimo, mm
Moldado contra o solo e permanentemente em contato com o solo	Todos	75
Exposto ao tempo ou em contato com o solo	Todos	50
		40
Não exposto ao tempo e sem contato com o solo	Lajes, juntas e paredes	40
	Vigas, pilares, pedestais, e tension ties	20
		40

Fonte: Adaptado do ACI 318, 2019.

#### 2.1.4.4 Norma Chinesa

Devido a massiva infraestrutura na China, existem diferentes normas para o projeto de durabilidade de estruturas de concreto para vários setores da indústria, propostas por diferentes departamentos do governo, como a DLT 5241-2010, DBJ43/T-2014, TB1005-2010 e a GB/T 50476-2008. A norma chinesa GB/T 50476-2008 (*Code for Durability Design of Concrete Structures*) segue um método prescritivo, e se divide em 5 classes ambientais, as quais são subdivididas em diferentes condições de exposição conforme a intensidade de deterioração, sendo a intensidade “A” a ação mais branda, seguindo em ordem alfabética até a intensidade

“F”, sendo essa a ação mais severa (SHI *et al*, 2019). No total são 16 condições de exposição, mostradas na Tabela 14.

Para as classes III e IV, a norma Chinesa determina um período de cura úmida mínimo de 7 dias, e 70% da resistência (para corpos de prova cúbicos) requerida nos 28 dias ao final do período de cura, sendo indicado retardar a primeira exposição do concreto aos sais. São 10 os requisitos para durabilidade nessas classes, sendo eles, tipo de cimento, teor de aglomerantes no concreto, composição dos aglomerantes, relação água/aglomerante, parâmetro específico do ambiente (teor de cloretos), condição de cura, resistência aos 28 dias, indicador de durabilidade (28d  $D_{RCM}$ ), cobrimento e controle de abertura das fissuras (LI, 2016). Partes desses requisitos estão apresentados na Tabela 15 e Tabela 16.

**Tabela 14 - Classificação ambiental segundo GB/T 50476 (2008)**

Classe	Ambiente	Intensidade	Condição de exposição
I	Atmosférico	A	Interior, seco, submerso em água
		B	Constantemente úmido, exterior sem ciclos de molhagem e secagem
		C	Ciclos de molhagem e secagem
II	Gelo e degelo	C	Clima moderadamente frio, concreto de alta saturação, sem sais
			Região fria, concreto de saturação moderada, sem sais
		D	Região fria, concreto de saturação moderada, com sais
			Região fria, concreto de alta saturação, sem sais
			Clima moderadamente frio, concreto de alta saturação, com sais
III	Marinho	C	Submerso em água do mar
		D	Exposto ao ar marinho e aos sais no ar
		E	Ar com altas quantidades de sais, maré e zonas de respingo em clima ameno
		F	Maré e zonas de respingo em climas marinhos quentes
IV	Agentes de degelo e outros sais	C	Leve névoa salina de degelo, submerso em água com cloretos, em contato com água com baixo teor de cloretos e ciclos de molhagem e secagem
		D	Spray de sais de degelo, água com teores moderados de cloretos e ciclos de molhagem e secagem
		E	Contato direto com soluções salinas de degelo, severo spray de sais de degelo, água com alto teor de cloretos e ciclos de molhagem e secagem
V	Agentes químicos	C	Agentes agressivos próximos, exposto a exaustão de gases de veículos
		D	Agentes agressivos médio alcance, exposto a chuvas ácidas com $pH \geq 4.5$
		E	Agentes agressivos distantes, exposto a chuvas ácidas com $pH \leq 4.5$

Fonte: Adaptado de Li, 2016

**Tabela 15 - Requisito mínimos para estruturas de concreto armado expostas ao ambiente marinho ou ação de agentes de gelo-degelo, para uma vida útil de 50 anos conforme GB/T 50476 (2008)**

Classe	Consumo de cimento	Teor limite de cloretos (% do material cimentício)	28d $D_{RCM}$ ( $10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	Máxima relação a/c	Classe mínima de resistência (Mpa)	Cobrimento mínimo (mm)	Limite de abertura da fissura
III-C, IV-C	300	0.1 (Concreto armado) 0.06 (Concreto protendido)	-	0.50	C35	35	0.20
III-D, IV-D	320		≤ 10	0.45	C40	45	0.20
III-E, IV-E	340		≤ 6	0.40	C45	50	0.15
III-F	360		≤ 6	0.36	C50	55	0.15

Fonte: Adaptado de Li, 2016

**Tabela 16 - Requisitos para resistência do concreto ao ingresso de cloretos conforme GB/T 50476 (2008)**

Vida útil de projeto	100 anos		50 anos	
Intensidade da ação	D	E	D	E
28d $D_{RCM}$ ( $10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	≤ 7	≤ 4	≤ 10	≤ 6

Fonte: Adaptado de Shi *et al*, 2019

#### 2.1.4.5 Norma Japonesa

A norma Japonesa JSCE-SSCS - Design (*Standard specifications for concrete structures – design*, 2007) classifica as condições de exposição em 2 categorias principais, a corrosão das armaduras e a deterioração do concreto. A categoria de corrosão das armaduras apresenta 3 ambientes de agressividade (Tabela 17), e a categoria de deterioração do concreto se divide em 2 tipos de deterioração (ataque químico e ação do gelo-degelo). Sua abordagem é baseada no desempenho para o projeto de durabilidade, mas fornece também uma abordagem prescritiva para estruturas sujeitas a carbonatação (SHI *et al*, 2019). Os requisitos parciais do concreto da norma SSCS-Design (2007) são apresentados na Tabela 18.

**Tabela 17 - Classificação das condições ambientais para corrosão da armadura de acordo com a SSCS-Design (2007)**

Ambiente normal	Ambiente exterior normal com condições amenas, sem sais transportados pelo ar, subterrâneo, etc.
Ambiente Corrosivo	1. Em comparação com o ambiente normal, ambiente com mais frequência de ciclos de molhagem e secagem, e ambientes subterrâneos abaixo do nível do lençol freático contendo especialmente substâncias (prejudiciais) corrosivos, que podem causar uma prejudicial corrosão à armadura. 2. Ambiente de estruturas marinhas submersas em água do mar, ou estruturas não submetidas à ação severa do ambiente marinho, etc.
Ambiente severamente corrosivo	1. Ambiente onde a armadura está sujeita à influências prejudiciais consideráveis. 2. Ambiente de estruturas marinhas expostas à maré, respingos, ou expostas à severos ventos oceânicos, etc.

Fonte: Adaptado da JSCE SSCS-Design, 2007.

**Tabela 18 - Requisitos de durabilidade (parciais) para corrosão da armadura conforme as orientações da SSCS- Design (2007)**

Mecanismo	Ambiente	Máxima relação a/c	Cobrimento mínimo (mm)	Requisitos de desempenho	
				Abertura da fissura <sup>a</sup>	Critério
Corrosão da armadura	Normal	0.50 <sup>b</sup> /P <sup>c</sup>	40 <sup>b</sup> P	0.005c	Profundidade de carbonatação
	Corrosivo	0.50 <sup>b</sup> /P	40 <sup>b</sup> P	0.004c	Teor de cloretos
	Severamente corrosivo	P	P	0.0035c	

a - c é a espessura do cobrimento de concreto

b - Valores para processos de carbonatação, elementos de vigas e uma vida útil de 100 anos

c - P se refere aos valores determinados por uma abordagem baseada no desempenho

Fonte: Adaptado de Shi *et al*, 2019

#### 2.1.4.6 Síntese comparativa

A norma Japonesa SSCS-Design (2007) indica para estruturas expostas ao ataque de cloretos que seja checado a corrosão da armadura por ingresso de íons Cl, através de uma combinação apropriada do cobrimento de concreto (projeto) e do coeficiente de difusão (projeto) de íons cloreto, devendo ser especificado. Para atingir um coeficiente de difusão de projeto deve-se especificar uma combinação adequada da abertura das fissuras de flexão e da relação água/cimento. Os procedimentos de cálculo para encontrar tais requisitos estão especificados na norma. Além disso deve-se especificar o coeficiente de difusão de cloretos no concreto obtido através de testes de laboratório, relação entre a/c e coeficiente de difusão aparente ou investigações das estruturas reais. Por fim, a concentração de íons cloreto na superfície do concreto deve ser especificada de acordo com o volume de sais no ar na área em estudo.

A resistência do concreto à penetração de fluidos influencia diretamente na sua durabilidade. Essa resistência é afetada principalmente pela relação água/cimento e composição dos materiais cimentícios usados no concreto, o que faz um concreto ser normalmente mais resistente ao ingresso de agentes agressivos, quando uma determinada relação a/c é combinada com a utilização de cinza volante, escória de alto forno ou sílica ativa, resultando numa maior durabilidade. Porém como há uma dificuldade em verificar precisamente a relação a/c dos concretos em campo através de métodos padrões, os testes de resistência são utilizados como substitutos. Para que haja uma abordagem confiável, devem existir valores de resistência especificados nas normas que sejam consistentes com a máxima relação a/c (ACI 318, 2019).

Assim pode-se observar que grande parte das normas indicam valores máximos de relação a/c, e mínimos de resistência à compressão e cobrimento das armaduras para uma determinada classe de agressividade ambiental. Além desses parâmetros mais comuns, algumas normas como a *SSCS-Design* (2007) e a GB/T 50476 (2008) trazem requisitos mais precisos e detalhados como os coeficientes de difusão de íons cloreto, para as classes expostas à ação de cloretos (Ambiente marinho, saís de gelo-degelo).

Através da Tabela 19, é possível observar que existem diferenças em alguns requisitos entre as normas apresentadas. Conforme uma análise similar de Almeida e Sales (2018), a norma Brasileira se mostra prescritiva em comparação com as internacionais (Americana e Europeia), que apresentam mais considerações sobre os tipos de exposição ambiental, e critérios baseados no desempenho da estrutura, permitindo ao projetista uma escolha mais flexível e precisa quanto aos requisitos de durabilidade do concreto/estrutura. Isso também foi observado quando comparado à norma Chinesa e Japonesa, as quais apresentaram requisitos adicionais para uma melhor garantia da durabilidade requerida no projeto.

Como a Vida Útil requerida pelas obras vem aumentando junto com um crescente uso de novos concretos e uma necessidade de criar uma maior diversidade de possíveis respostas para os construtores, com o objetivo de atender aos desafios do desenvolvimento sustentável, uma abordagem de desempenho é fundamental, já que é uma abordagem abrangente e que leva em conta os aspectos técnico-econômicos específicos de cada obra (BOUNY, CUSSIGH, ROUGEAU, 2008).

**Tabela 19 - Especificações para adequada durabilidade de estruturas de concreto armado expostas à ambientes agressivos com presença de cloretos (água do mar, ação de sais de gelo-degelo etc.)**

<b>Parâmetros</b>	<b>Norma Brasileira</b>	<b>Norma Europeia</b>	<b>Norma Americana</b>	<b>Norma Chinesa</b>	<b>Norma Japonesa</b>
Quantidade Total de classes de agressividade	4	18	14	16	5
Quantidade de classes/subclasses relacionadas com a ação de íons cloreto	2	6	1	7	3
Máxima relação água/cimento	0.45 a 0.55	0.45 a 0.55	0.40	0.36 a 0.50	Desempenho
Consumo mínimo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	320 a 360	300 a 340	-	300 a 380	-
Resistência mínima do cilindro em MPa (*Resistência do cubo)	30 a 40	30 a 35	35	35* a 50*	Desempenho
Teor máximo de cloretos no concreto por massa de cimento (*aglomerante)	0.15	0.20 a 0.40	0.15	0.10*	Desempenho
Cobrimento mínimo (mm)	45 a 50	35 a 45	40 a 75	35 a 55	Desempenho
Limite para abertura de fissuras (mm)	0.2	0.3	-	0.15 a 0.20	Desempenho
Limite do coeficiente de difusão de íons cloreto - 28d DRCM ( $10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	-	-	-	6 a 10	Desempenho
Concentração de cloretos na superfície do concreto	-	-	-	-	Desempenho

Fonte: Autor, 2020

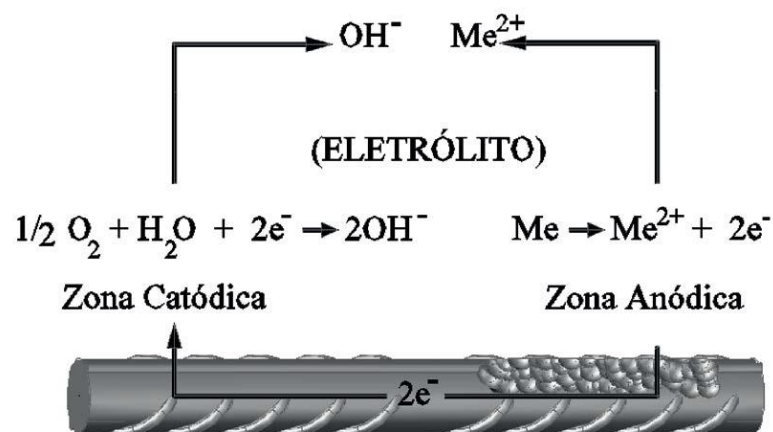
## 2.2 Corrosão em estruturas de concreto armado

A corrosão pode ser definida como a deterioração de um material, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, aliada ou não a esforços mecânicos. Essa deterioração do material traz alterações que são prejudiciais e indesejáveis, e acabam por exemplo tornando o material inadequado para a função que ele foi proposto. O processo de corrosão é espontâneo, pois os metais na forma refinada estão num estado de energia maior do que do composto que os deu origem, assim eles tendem a voltar ao estado de menor energia ou mais estável (Composto), num processo inverso ao metalúrgico (GENTIL, 1996).

Em estruturas de concreto armado a corrosão da armadura ocorre através de um processo eletroquímico, que se caracteriza pela transferência de elétrons e íons entre duas regiões diferentes do metal. Essa corrosão pode se manifestar de maneira uniforme, ou seja, em toda extensão de um trecho da armadura, ou de forma localizada (Corrosão por pite) que se mostra em um ponto ou área específica do aço, sendo esta considerada o tipo mais grave em armaduras de aço (SOUZA, 2018).

Segundo Meira (2017), na corrosão há a formação de uma pilha eletroquímica, que se caracteriza por ter uma região anódica (ânodo) que sofre oxidação, ou seja, perde elétrons, e por uma região catódica (cátodo) onde há o processo de redução, com o consumo dos elétrons gerados no ânodo, formando assim a corrosão eletroquímica. É necessária uma diferença de potencial entre as duas regiões e um eletrólito que faz a ligação externa entre elas. A Figura 4 demonstra as reações parciais que acontecem nas regiões anódica e catódica, podendo o concreto atuar como eletrólito.

**Figura 4 - Representação de uma pilha de corrosão com um mesmo metal.**



Fonte: MEIRA, 2017



Existe uma grande quantidade de pilhas eletroquímicas formadas pelas várias microrregiões anódicas e catódicas, que surgem pelos diferentes potenciais eletroquímicos causados pelas heterogeneidades físicas e/ou químicas da barra de aço. Por esses motivos podem ocorrer, além da corrosão uniforme e localizada, a corrosão por aeração diferencial, galvânica e sob tensão (SOUZA, 2018).

Segundo Helene (1993) através do processo de corrosão há formação de óxidos e hidróxidos de ferro, que são produtos da corrosão expansivos e porosos popularmente chamados de ferrugem, e eles só existirão caso ocorram as 3 condições básicas a seguir:

- Presença de um eletrólito (Ex: Água presente nos poros do concreto)
- Presença de uma diferença de potencial
- Presença de oxigênio

No caso das armaduras de concreto armado basicamente ocorrem as seguintes reações (Ribeiro, 2018):

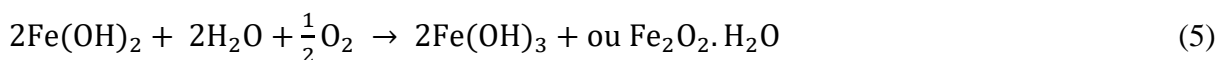
- Nas zonas anódicas a oxidação do ferro segundo Equação 1.



- Simultaneamente nas zonas catódicas ocorre a redução (consumo dos elétrons liberados no ânodo), segundo a Equação 2.

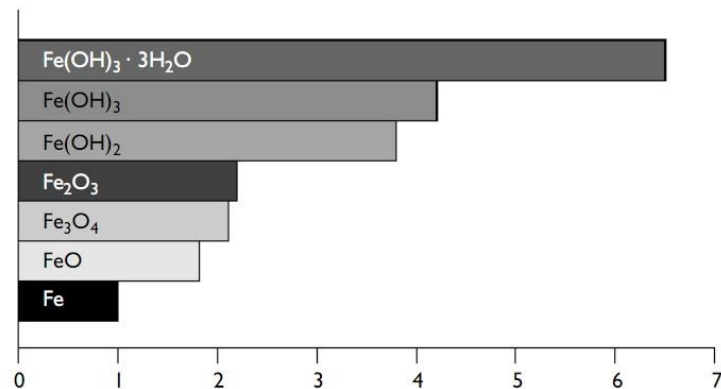


- Os produtos formados anteriormente interagem quimicamente conforme Equação 3, 4 e 5.



Esses compostos são conhecidos comumente como ferrugem, e ocupam volumes três a sete vezes maiores que seu volume original, originando esforços de expansão no concreto da ordem de 15 MPa, resultando em fissurações da camada de cobertura de concreto, o que agrava ainda mais a penetração de agentes agressivos, e com isso pode causar o deslocamento do concreto posteriormente (RIBEIRO, 2018). A Figura 5 mostra essa variação de volume.

**Figura 5 – Volume dos compostos resultantes do processo corrosivo do ferro metálico**



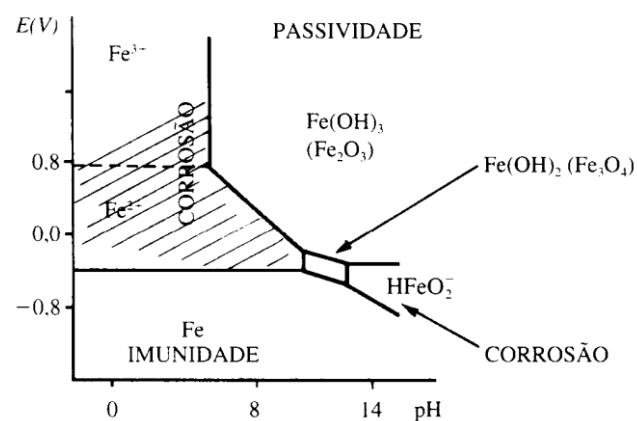
Fonte: Broomfield, 2007

Nas próximas seções será abordado mais detalhadamente os processos de corrosão uniforme e localizada, originados, respectivamente, pelos mecanismos de carbonatação e ação de íons cloreto.

### 2.3 Principais mecanismos de despassivação das armaduras

O concreto é um ambiente altamente alcalino, pH entre 10,5 e 13, proporcionando a formação de uma camada passiva protetora. A alta alcalinidade do concreto é devido a quantidade de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) presente na matriz do cimento, que tem um pH da ordem de 12,6 (à temperatura ambiente), proporcionando a proteção do aço através da película passiva (RIBEIRO, 2018). As condições de corrosão, imunidade e passivação são apresentadas por Gentil (1996) através de um diagrama simplificado, conforme Figura 6.

**Figura 6 – Diagrama simplificado de potencial e pH para o sistema Fe-H<sub>2</sub>O**



Fonte: Gentil, 1996

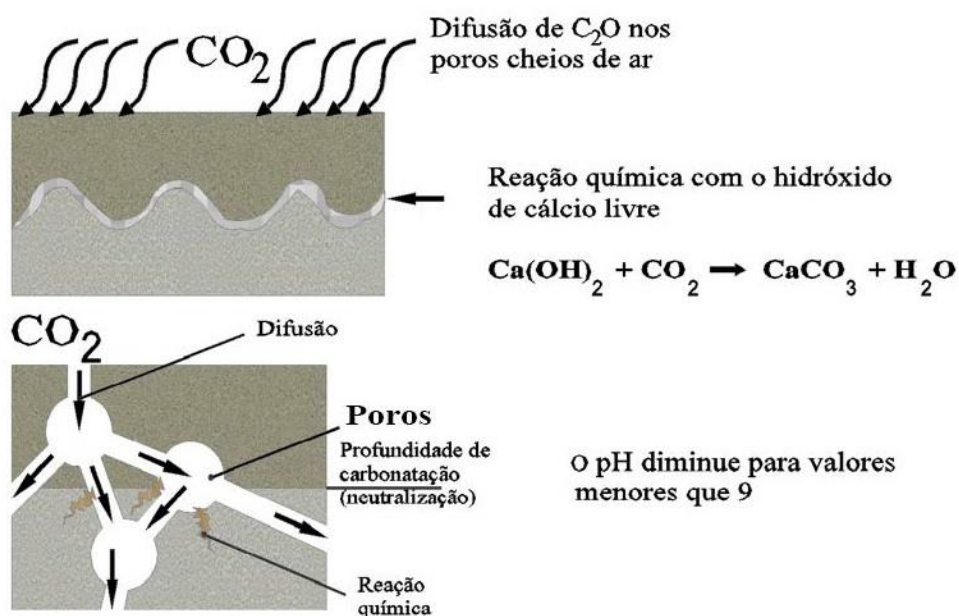
Segundo Broomfield (2007) a camada passiva é um filme denso, impenetrável, que se for totalmente mantida e estabelecida, evita corrosão adicional no aço. Caso o ambiente passivo possa ser mantido, seria muito melhor do que qualquer proteção artificial como a galvanização ou epóxi ligado por fusão, já que essas proteções poderiam ser danificadas ou consumidas, e com isso a corrosão prosseguiria nas áreas danificadas. Porém essa camada protetora do aço nem sempre é mantida e pode ser quebrada por meio do mecanismo de carbonatação e ataque de íon cloretos.

A seguir serão abordados estes dois principais mecanismos de ruptura da camada passivadora, aprofundando mais a ação dos cloretos.

### 2.3.1 Carbonatação

A carbonatação é o processo de transformação do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) por ação do gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) em carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), o que contribui para a redução do pH da solução existente nos poros do concreto. Esse produto além de preponderante ao final do processo, é o que caracteriza o fenômeno, e devido ao seu baixo pH, entre 8,3 e 9 à temperatura ambiente, tem-se a redução das condições de estabilidade química da película passivadora da armadura, o que proporciona a corrosão do aço (HELENE, 1993). Esse processo é mostrado na Figura 7.

**Figura 7 - Representação do avanço do processo de carbonatação**



Fonte: Meira, 2017

Segundo Neville (2011) a ação do CO<sub>2</sub> ocorre tanto em ambientes rurais como em grandes cidades, e o teor de CO<sub>2</sub> varia em média de 0,03% a 0,3% para esses diferentes ambientes respectivamente, podendo chegar excepcionalmente a 1% em grandes cidades, sendo túneis para veículos um exemplo de altas concentrações de CO<sub>2</sub>. A carbonatação em si, não agride o concreto, porém ela tem graves consequências em relação da durabilidade das estruturas, pois reduz o pH da água dos poros para um valor próximo a 9. Essa redução de pH como já visto anteriormente proporciona a destruição da camada protetora (passivadora) do aço, permitindo a ocorrência da corrosão, desde que sejam atendidas as condições de umidade e oxigênio necessárias.

A frente de carbonatação não avança em uma linha retilínea, em razão da presença de agregado graúdo no concreto. A presença de fissuras também influencia na frente de carbonatação, uma vez que o CO<sub>2</sub> tende a penetrar através delas. Assim fica claro que o processo ocorre do exterior para o interior do concreto, de forma progressiva, e a uma velocidade decrescente, em consequência da difusão do CO<sub>2</sub> nos poros do concreto ter que passar pela região superficial já carbonatada (NEVILLE, 2011). É possível expressar a profundidade de carbonatação, D (em mm), segunda a equação 6:

$$D = K\sqrt{t} \quad (6)$$

Onde:

K = Coeficiente de carbonatação (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$ )

t = tempo de exposição ao CO<sub>2</sub> em anos

Segundo Ribeiro (2018) os fatores que influenciam na carbonatação são diversos, e estão descritos abaixo:

- Relação água/cimento
- Consumo e tipo de cimento
- Presença de adições minerais
- Condições de cura
- Presença de fissuras
- Concentração de CO<sub>2</sub>
- Umidade relativa do ar e grau de saturação dos poros
- Temperatura

Neville (2011) enfatiza que o histórico de cura do concreto tem grande influência na região externa. Um período de cura úmida de um para três dias resultou numa redução da profundidade de carbonatação em cerca de 40% (MATTHEWS, 1984 *apud* NEVILLE, 2011).

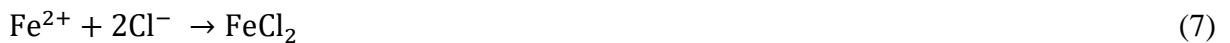
### 2.3.2 Íons Cloreto

O cloreto é o agente agressivo mais comum incorporado ao concreto involuntariamente, através de aditivos aceleradores de pega, agregados e água contaminados e por realização de limpezas com produtos contendo cloretos. O ingresso e progressão dos cloretos no concreto é primeiramente através de sucção e depois de difusão, sendo assim um mecanismo duplo (RIBEIRO, 2018).

Segundo Helene (1993), a presença de cloretos mesmo que seja em ambientes altamente alcalinos, pode resultar na despassivação do aço de forma prematura. O mecanismo responsável pela despassivação por ação de cloretos ainda não tem um consenso entre cientistas e pesquisadores da área. São três teorias modernas que explicam o efeito dos cloretos na corrosão do aço segundo o ACI 222:

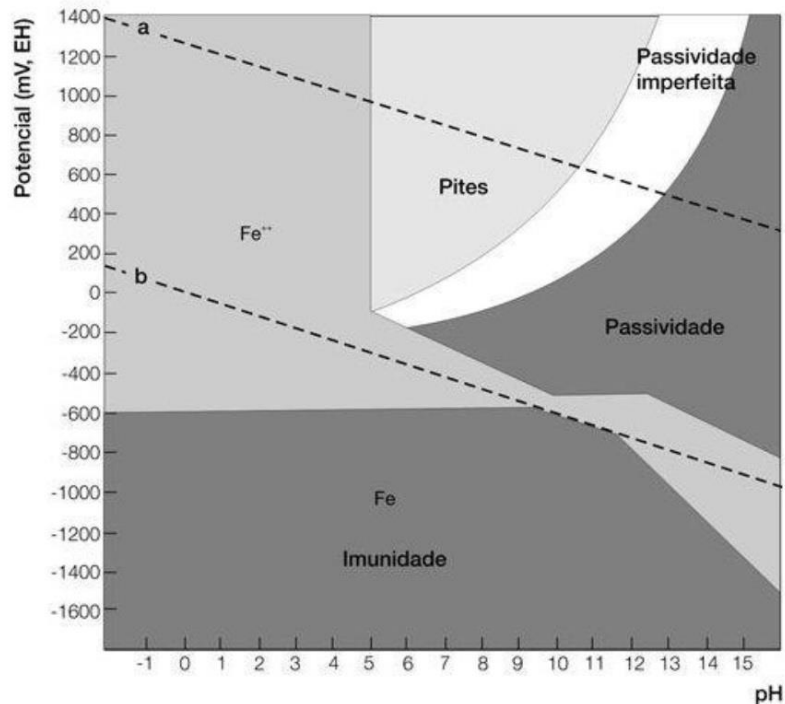
- Teoria da adsorção
- Teoria do filme de óxido
- Teoria do complexo transitório

Os ânions  $\text{Cl}^-$  ativam a superfície do aço, após penetrarem a camada passiva, e com isso formam um ânodo na armadura, sendo o cátodo a própria camada passiva. Com base nas reações envolvidas é visto que os  $\text{Cl}^-$  não se consomem, ou seja, ele se regenera para reagir novamente no processo de corrosão, mesmo que durante uma etapa intermediária da reação ele forme o cloreto ferroso. A ligação que permite a ocorrência da célula eletroquímica, entre a região anódica e catódica, é feita pela água dos poros do concreto, assim como pela própria armadura. As reações descritas são mostradas nas equações abaixo (NEVILLE, 2011):



O decréscimo da região de passividade ocasionado pela ação dos íons cloreto, em relação ao diagrama de Pourbaix para o sistema ferro-água é mostrado na Figura 8.

**Figura 8 - Diagrama de Pourbaix simplificado para o sistema ferro-água com cloretos (335 ppm)**



Fonte: Ribeiro, 2018

Os cloretos estão em três formas presentes no concreto: uma parte quimicamente ligada aos produtos de hidratação do cimento, outra parte adsorvida na superfície dos poros, e uma parte livre para reagir com o aço, chamados de cloretos livres. Essa distribuição não é constante, e tende ao equilíbrio, fazendo com que apenas os cloretos excedentes desse equilíbrio possam ser fixados. Através da reação dos íons cloreto com o  $C_3A$  é formado o chamado *sal de Friedel*, ocorrendo também as reações dos íons cloreto com o  $C_4AF$  formando o cloroferrato de cálcio, sendo a primeira reação a principal fixadora de cloreto no concreto. Assim pode-se concluir que concretos que contêm cimentos com altos teores de  $C_3A$  trazem uma maior resistência à corrosão da armadura (NEVILLE, 2011).

A norma brasileira ABNT NBR 12655 (ABNT, 2015) estabelece teores máximos de íons cloreto em porcentagem sobre a massa de cimento, utilizada no concreto, com o objetivo de proteger as armaduras contra a corrosão. Para estruturas de concreto protendido o teor máximo é de 0,05%, para estruturas de concreto armado que estão na CAA III ou IV o teor máximo é de 0,15%, sendo 0,30% e 0,40% para as CAA II e I respectivamente.

Segundo Ribeiro (2018) os principais mecanismos de transporte no concreto são a permeabilidade, a absorção capilar, a difusão e a migração iônica, sendo a difusão o principal mecanismo de penetração de agentes agressivos, controlando tanto o ingresso de íons cloro

como de CO<sub>2</sub> nas estruturas de concreto, contribuindo para corrosão das armaduras. A difusão pode ser dividida em dois estágios: o estágio não estacionário (fluxo depende do tempo e profundidade) e o estágio estacionário (fluxo constante das substâncias), sendo representados pela primeira e segunda leis de Fick, respectivamente. As equações que permitem encontrar os coeficientes de difusão nos estados estacionário (9) e não estacionário (10 e 11) são apresentadas abaixo:

$$q_m = -D_s \frac{\partial C}{\partial x} \quad (9)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D_{ns} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (10)$$

Uma das soluções da Equação diferencial parcial 10 é:

$$C(x, t) = C_s \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ns}t}} \right) \quad (11)$$

Para o caso de penetração de íons cloreto,  $q_m$  representa o fluxo de massa,  $x$  é a profundidade na qual é medida a massa de cloretos que ingressou,  $C$  é a concentração,  $C(x,t)$  é a concentração de cloretos a uma distância  $x$ , em um tempo  $t$ , e  $C_s$  é a concentração superficial de cloretos (RIBEIRO, 2018).

Existem diversas variáveis que podem influenciar na velocidade de penetração de cloretos no concreto, as quais serão abordadas mais especificamente nas próximas seções.

#### **2.4 Fatores que influenciam a penetração de Íons Cloreto no concreto.**

Segundo Helene (1992, p.129) “A profundidade de penetração e o teor de cloretos são altamente dependentes do micro clima e da atmosfera onde está inserida o componente estrutural.” A agressividade ambiental é uma função de vários fatores que nem sempre são independentes entre si, e que tem inúmeros e complexos efeitos sinérgicos conectados tanto ao macro clima como ao micro clima que a própria estrutura ajuda a criar, sendo exemplos disso a umidade do ambiente e sua variação no tempo, a presença de cloretos e oxigênio e a temperatura (BERTOLINI, 2004).

Além do ambiente e das condições de exposição, segundo Ribeiro (2018) a qualidade do concreto é essencial para uma boa durabilidade da estrutura já que a dificuldade para o ingresso de agentes agressivos depende da complexa microestrutura formada pela hidratação do cimento que influencia diretamente na capacidade de transporte de massa na rede de poros. Portanto a composição química e finura do cimento, o processo de cura do concreto, a presença de adições

minerais, relação água/cimento e teor de argamassa são fatores que influenciam na velocidade de transporte de cloretos no concreto.

Nos próximos itens serão abordados mais especificamente os fatores que influenciam na penetração de íons cloreto em estruturas de concreto armado.

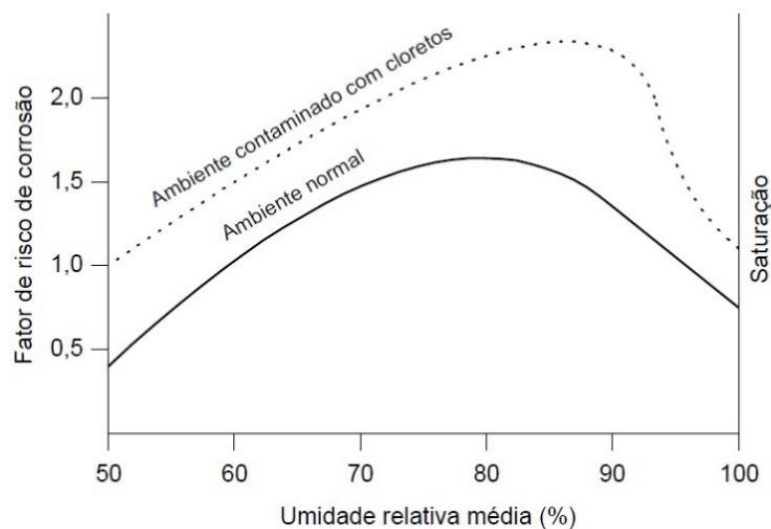
#### 2.4.1 Fatores ambientais e condições de exposição

Segundo Andrade (2001, p. 30), “Tanto as características ambientais, traduzidas principalmente pela temperatura e pela umidade relativa, quanto as condições de exposição têm uma influência importante na vida útil das estruturas de concreto armado atacadas por cloretos”.

Não há um consenso entre pesquisadores sobre a influência da temperatura no processo de penetração de cloretos no concreto, já que para alguns o aumento na temperatura resulta numa diminuição do coeficiente de difusão dos íons cloreto, e para outros, com o aumento da temperatura se tem uma maior mobilidade iônica e conseqüentemente maior ingresso de agentes agressivos (ANDRADE, 2001).

A umidade relativa (UR) tem grande influência no processo de corrosão, pois é no meio aquoso da microestrutura do concreto que acontece o transporte de íons, e, portanto, uma maior quantidade de água nos poros facilita para que os íons cloreto atinjam a armadura (ANDRADE, 2001). A Figura 9 mostra a relação da umidade relativa com a chance de corrosão, considerando o concreto de cobrimento (CEB, 1993).

**Figura 9 - Influência do teor de umidade sobre o risco de corrosão**



Fonte: Andrade, 2001



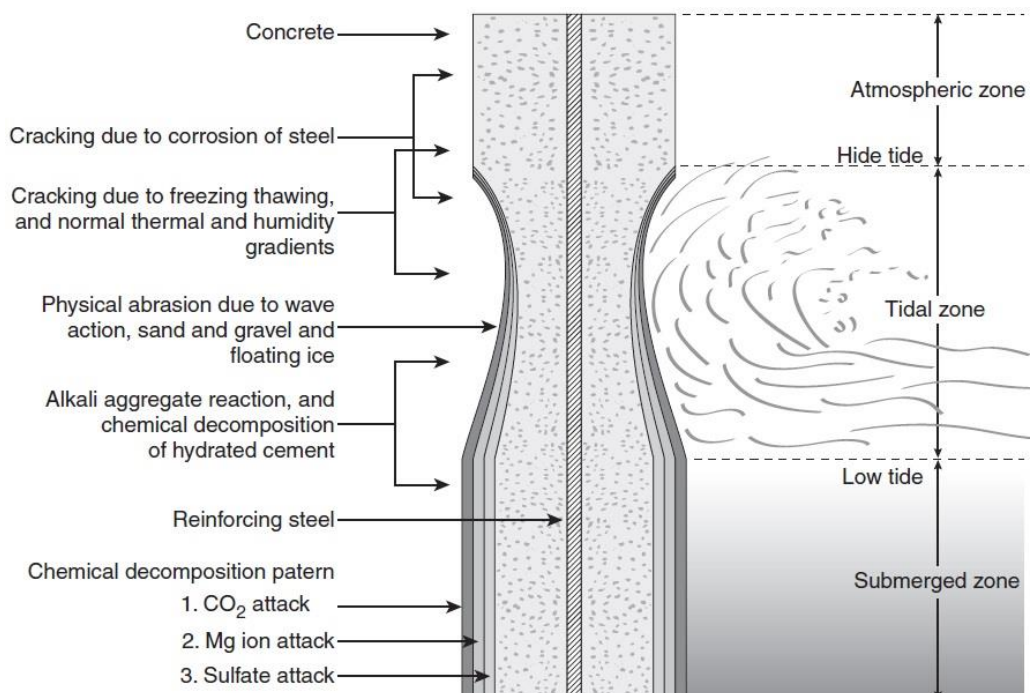
Caso o ambiente seja muito seco, ou o concreto esteja em condição de saturação de água total e permanente, mesmo com a presença de cloretos, esse ambiente não é agressivo. Para UR acima de 40 - 50% o ambiente se torna agressivo com a presença de cloretos, e sua agressividade é crescente até um teor de UR na faixa de 90 – 98%. Sendo assim para UR entre 70% e 95% a taxa de corrosão depende basicamente da qualidade do concreto. As Estruturas em condições de contato com água do mar e ciclos de molhagem e secagem (respingos) são situações extremamente agressivas (BERTOLINI, 2004).

O ACI 222 (2011) indica 6 tipos de exposição ambiental para serem considerados no projeto da estrutura de concreto armado contra a corrosão das armaduras, sendo eles:

- Concreto não exposto as intempéries
- Concreto exposto as intempéries
- Concreto exposto a agentes químicos para degelo
- Concreto exposto ao ambiente marinho
- Concreto exposto a produtos químicos
- Concreto exposto a chuva ácida

Mehta e Monteiro (2006) mostraram que o tipo e severidade da deterioração nas estruturas de concreto expostas à ação da água do mar poderia não ser uniforme. A Figura 10 indica os possíveis danos numa estrutura de concreto armado resultantes da ação da água do mar.

**Figura 10 - Estrutura de concreto armado exposta à água do mar**



Fonte: Mehta e Monteiro (2006)

Conforme a Figura 10 mostra, as partes da estrutura de concreto que ficam totalmente submersas (*Submerged zone*) são raramente sujeitas ao congelamento ou corrosão das armaduras, sendo susceptíveis ao ataque químico. As partes da estrutura que se encontram acima do nível da maré alta (*High tide*) são vulneráveis tanto a ação do congelamento como da corrosão das armaduras. A parte da estrutura em contato com a zona de maré (*Tidal zone*) que se compreende entre o nível baixo (*Low tide*) e alto da maré é o local onde acontece a mais severa deterioração, pois a estrutura é exposta a todos tipos de ataque físico e químico (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

#### **2.4.2 Características do concreto**

A composição do concreto e o respectivo cuidado na sua execução, são aspectos que influenciam fortemente na resistência da estrutura à corrosão. Existe uma forte dependência da resistência à corrosão com uma variedade enorme de propriedades, as quais podem ser unidas e resumidas pelo termo “*quality of concrete*” (BERTOLINI *et al*, 2004). O concreto tem uma estrutura altamente complexa, e sua microestrutura pode ser dividida em três zonas: zona da pasta, do agregado e de transição, sendo esta última de grande influência no transporte de agentes agressivos por sua maior porosidade. Ainda segundo Ribeiro (2018) a estrutura e distribuição do tamanho dos poros no concreto tem forte relação com sua durabilidade e resistência a penetração de agentes agressivos como os cloretos.

Em ambientes marítimos, a compacidade do concreto é o principal indicador para durabilidade, sendo ela relacionada com a classe de resistência do concreto, e representada pela porosidade, permeabilidade e difusividade, fatores que influenciam na resistência do material à penetração de agentes agressivos contidos na água do mar (ESCANDEILLAS e HORNAIN, 2008).

As características do concreto, sem dúvida, são muito importantes para se atingir uma determinada durabilidade das estruturas, e este assunto é abordado com importância por diversos autores e pesquisadores. Por esse motivo, serão descritos nas próximas seções, algumas variáveis importantes do concreto que influenciam na sua resistência a penetração de íons cloreto e conseqüentemente, na sua durabilidade.

### 2.4.2.1 Relação água/cimento (a/c)

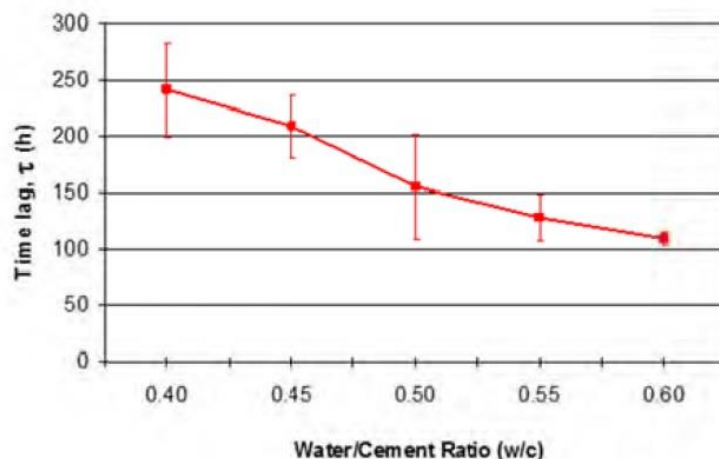
O caminho que os íons cloreto percorrem é representado pela quantidade, forma e distribuição dos poros no concreto, variáveis que são decorrentes da relação a/c, idade e da cura realizada, sendo a relação a/c o fator que define a microestrutura dos concretos de Cimento Portland (HELENE, 1993).

Mehta e Monteiro (2006) demonstram que a porosidade e a permeabilidade do concreto reduzem com a diminuição da relação água cimento e com o aumento do grau de hidratação. Além disso a porosidade e o índice de vazios estão relacionados exponencialmente tanto a permeabilidade como a resistência do material.

A distribuição do diâmetro dos poros do concreto é uma função do tempo e da relação a/c, já que durante a hidratação do cimento os vazios intragranulares se tornam cada vez mais preenchidos pelos produtos da hidratação, e porque a pasta de cimento no estado fresco tem seus espaços entre os grãos influenciados pela quantidade de água (OLLIVIER, 1998).

Um estudo de Santos, Souza e Ribeiro (2014) mostra a influência da relação a/c em concreto de cimento Portland (CP-II 32 Z), onde uma redução na relação a/c trouxe maiores valores de *time lag* (período de tempo que a difusão se mantém no regime não-estacionário) estimados a partir de ensaios de migração de cloretos conforme Figura 11.

**Figura 11 - Valores de *time lag* ( $\tau$ ) estimados a partir de ensaios de migração de cloretos, em concretos com diferentes relações a/c (w/c).**

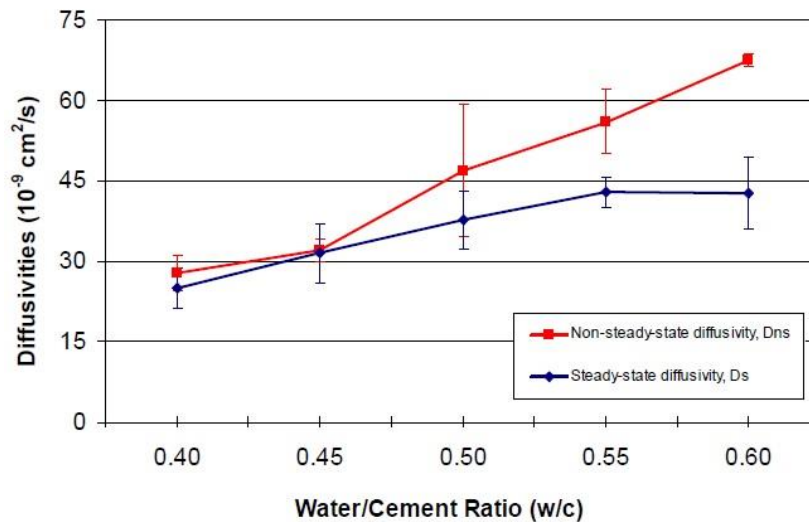


Fonte: Santos, Souza e Ribeiro, 2014

Além disso, é visto que o coeficiente de difusão não estacionário ( $D_{ns}$ ) e estacionário ( $D_s$ ) é proporcional à relação água/cimento (Figura 12), e que a vida útil estimada em função do

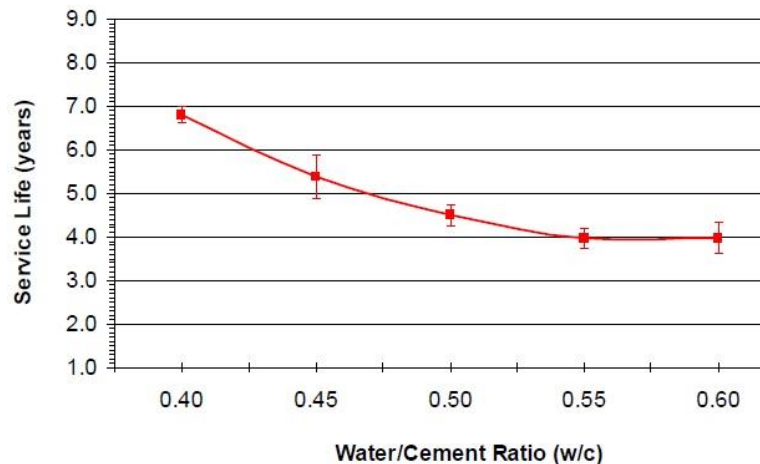
ensaio de migração para uma estrutura de concreto armado com cobrimento de 40mm é inversamente proporcional à relação a/c (Figura 13).

**Figura 12 - Relação dos coeficientes de difusão ( $D_{ns}$  e  $D_s$ ) com relação a/c, obtidos através do ensaio de migração**



Fonte: Santos, Souza e Ribeiro, 2014

**Figura 13 - Relação entre a vida útil estimada em anos (*Service Life*) e a relação a/c**



Fonte: Santos, Souza e Ribeiro, 2014

É possível ver que a relação água/cimento é um fator muito importante a ser considerado na construção de uma estrutura de concreto armado em ambiente agressivo de íons cloreto. Contudo segundo Bertolini (2004), em ambientes onde há predominância de contaminação por cloretos, o tipo de cimento utilizado no concreto tem uma importância ainda maior do que a relação a/c. Portanto será abordado a seguir a influência do tipo de cimento nas propriedades e microestrutura do concreto.

### 2.4.2.2 Tipo de cimento

Os principais constituintes do cimento são os silicatos e aluminatos de cálcio ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ ), que através de diferentes proporções originam a grande variedade de tipos de cimento. Os cimentos compostos são formados através da adição de matérias-primas como a escória de alto forno (CP II-E), pozolanas (CP II-Z) e filler calcário (CP II-F). O aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) pode se combinar quimicamente com os cloretos, formando o cloro-aluminato de cálcio ou *sal de Friedel*. Além disso os cloretos podem ser adsorvidos aos silicatos de cálcio sendo menos efetivo. Como os cloretos livres na solução dos poros são os mais nocivos a armadura e estes interagem com os compostos hidratados, o tipo de cimento utilizado influencia na migração de cloretos e é um fator muito importante a ser considerado (RIBEIRO, 2018). Os diversos tipos de cimento brasileiro, junto as suas respectivas classes de resistência e siglas, são apresentados na Tabela 20.

**Tabela 20 - Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018)**

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40 <sup>c</sup>	RS <sup>a</sup> ou BC <sup>b</sup>	
	Com adição	CP I-S			
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E			
	Com material carbonático	CP II-F			
	Com material pozolânico	CP II-Z			
Cimento Portland de alto-forno		CP III			
Cimento Portland pozolânico		CP IV			
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V			ARI <sup>d</sup>
Cimento Portland branco	Estrutural	CP B			25, 32 ou 40c
	Não Estrutural	CP B			-

<sup>a</sup> O sufixo RS significa resistente a sulfatos e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos 5.3, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

<sup>b</sup> O sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.4, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

<sup>c</sup> As classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (Mpa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215

<sup>d</sup> Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 Mpa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para esse tipo de cimento.

Fonte: NBR 16697, 2018

Segundo Neville (2011) uma maior quantidade de  $C_3A$  no cimento, junto com um maior consumo de cimento, fixará uma maior quantidade de íons cloreto. Isso é mais vantajoso apenas

quando os cloretos já estão presentes na hora da mistura, situação a ser evitada, pois os cloretos que ingressam posteriormente no concreto reagem com o  $C_3A$  e formam uma quantidade menor de Cloroaluminatos, sendo futuramente possível a sua dissociação, liberando os íons cloreto na solução dos poros, o que representa um grande risco de corrosão.

Ainda deve ser avaliado a possibilidade de ataque por sulfatos à estrutura, pois teores maiores de  $C_3A$  são prejudiciais nesse caso. Outra característica a ser considerada é o maior calor de hidratação liberado inicialmente por concretos que contêm cimentos com grandes quantidades de  $C_3A$  (NEVILLE, 2011).

A influência da composição química e da finura de alguns cimentos brasileiro (CP II-F-32, CP II-E-32, CP II-Z-32, CP II-Z-32 RS, CP IV-32 e CP V-ARI-RS) na difusividade de íons cloreto no concreto foi avaliado nas pesquisas de Marques e Ribeiro (2014), chegando a resultados que mostram que o concreto produzido com cimento CP IV-32 é o mais eficiente e com melhor resistência à corrosão por íons cloreto, obtendo os maiores valores de *time lag* e vida útil, e os menores valores de coeficientes de difusão, fluxo e penetração de cloretos, graças a elevada finura e alto teor de  $Al_2O_3$  do cimento. O segundo melhor desempenho frente a resistência a corrosão por ação de íons cloreto foi do concreto com CP V-ARI RS que obteve bons resultados graças a sua elevada finura. Excluindo este último da análise, já que sua resistência a corrosão é dada por questões físicas, os autores correlacionaram o teor de aluminatos do cimento com os resultados de estimativas de vida útil, demonstrando que um maior teor de aluminatos no cimento resulta numa maior estimativa de vida útil (RIBEIRO, 2018).

#### **2.4.2.3 Presença de adições minerais**

Diversos autores citam a importância das adições minerais para minimizar a penetração de agentes agressivos no concreto como os íons cloreto. Al-Amoudi *et al* (1993); Ellis, Rigg, Butler (1991); Schiessl, Raupach (1989) *apud* Neville (2011) afirmam que a cinza volante, a escória granulada de alto forno e a sílica ativa quando são dosados corretamente reduzem muito a penetrabilidade do concreto, além de aumentarem sua resistividade, contribuindo para a redução da corrosão nas armaduras. No caso da sílica ativa, há um aperfeiçoamento da estrutura dos poros da pasta de cimento endurecida, e um conseqüente aumento da resistividade, proporcionando um efeito positivo em relação a corrosão, apesar da redução no pH da água nos poros, resultado da reação da sílica com o hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ), grande responsável pelo pH alcalino do concreto (BYFORS, 1987, *apud* NEVILLE, 2011). Ainda segundo Neville

(2011), a adição de sílica ativa afeta a trabalhabilidade do concreto, e por isso quando se faz seu uso geralmente há também, a adição de um aditivo superplastificante.

Através da análise dos estudos de Pinto (2016), tem-se que a adição de sílica ativa em concretos ensaiados por migração de cloretos, proporciona um refinamento dos poros e uma redução de sua interconectividade, trazendo reduções significativas no coeficiente de difusão no regime não estacionário do concreto o que resulta numa maior estimativa de vida útil para concretos (com cobrimento de 40mm) com tal adição (RIBEIRO, 2018).

Efeitos benéficos na durabilidade das estruturas contra a corrosão também podem ser vistos através dos estudos de Silva (2006), onde foi mostrado que as adições de sílica de Fe-Si (SFS) e sílica da casca de arroz (SCA) em concretos de alto desempenho (CAD) produzidos com CP V ARI RS e CP V ARI Plus tem resultados muito melhores quanto à durabilidade, quando comparado a concretos sem tais adições. O risco de corrosão mais baixo obtido, através do ensaio de migração de cloretos, foi no concreto de CP V ARI RS com adição de SFS. Além disso os concretos com adição de 10% de SFS apresentaram uma a maior resistividade elétrica, e como ela é responsável pelo controle do fluxo de íons através da solução presente nos poros, isso indica também um baixo risco de corrosão do aço.

Obras em ambientes marítimos requerem um cuidado especial e por esse motivo a norma NFP15-317 (Norma Francesa de cimentos para obras marinhas) traz critérios de aceitação para cimentos utilizados nesses locais, limitando os teores de  $C_3A$ ,  $SO_3$  e  $C_3S$ , sendo este último a principal fonte de hidróxido de cálcio, o qual é vulnerável à ação da água do mar. Esta é a principal razão pela qual cimentos compostos à base de cinzas volantes, pozolanas (MASSAZZA, 1993), sílica ativa ou escória granulada de alto forno (GEISSLER, KOLLO e LANG, 2000; REGOURD, 1977), que originam menos hidróxido de cálcio no concreto, serem os mais indicados às obras em ambientes marítimos (ESCANDEILLAS e HORNAIN, 2008).

O efeito da cinza volante na resistência do concreto à penetração de cloretos também é positivo, como indica a pesquisa de Yu (2015), a qual foram testados concretos compostos com 30% e 50% de adição de cinza volante e comparados com amostras de concreto de cimento Portland sem adições. Através de ensaios acelerados de migração de cloretos foram determinados durante um período de até 3 anos, os coeficientes migração de cloretos, onde as amostras com adições de cinza volante apresentaram menores resultados de migração após os 28 dias, e com isso concluiu-se que concretos com cinza volante apresentam melhores resistências contra a penetração de cloretos.

O metacaulim é uma adição mineral, que é composto por partículas extremamente finas e com alta superfície específica, fatores que refletem sua alta reatividade química. O metacaulim

se mostra mais efetivo na durabilidade do concreto do que a sílica ativa quando utilizado em quantidades maiores, pois alia o fenômeno físico, presente também na reação da sílica ativa, com o fenômeno químico, dada sua maior quantidade de aluminatos que interagem com os íons cloreto para formar o *sal de Friedel*. Para alcançarmos uma maior vida útil das estruturas de concreto devemos utilizar conceitos de difusão além dos métodos tradicionais, que sozinhos não se mostram suficientes (RIBEIRO, 2018).

Como visto nos itens anteriores, o coeficiente de difusão foi empregado amplamente em diversos estudos que tratam da corrosão por íons cloreto, portanto ele será aprofundado na próxima seção.

#### 2.4.2.4 Coeficiente de difusão

Como foi visto na seção 2.2 o coeficiente de difusão pode ser dividido em dois estágios, o estacionário ( $D_s$ ) e o não estacionário ( $D_{ns}$ ), sendo o principal mecanismo de penetração de agentes agressivos. No caso do concreto, o coeficiente de difusão no estado não estacionário é o mais importante quando falamos de vida útil, já que é nessa fase que os íons cloro se combinam com os aluminatos do concreto para formar o cloro-aluminato de cálcio. Além disso como o concreto tem um fluxo de fluidos com baixa velocidade de percolação (abaixo de  $10^{-8}$  cm/s) a dispersão da solução agressiva nos poros é feita por difusão, a qual é afetada pela tortuosidade dos poros, resultando que materiais com granulometrias mais finas tenha uma menor dispersão por difusão (RIBEIRO, 2018).

Além da penetração de íons cloreto, o ingresso de oxigênio no concreto também ocorre predominantemente por difusão, sendo difícil de medir. Os poros capilares do concreto com água dificultam a difusão do oxigênio, pois ele deve se dissolver na água para posteriormente se difundir (HELENE, 1993). O fluxo de oxigênio reduz pela metade quando a relação a/c é alterada de 0,6 para 0,4, mostrando que em concretos com maior resistência não deverão ser observadas altas taxas de corrosão (STARK, 1989 *apud* HELENE, 1993).

O coeficiente de difusão não estacionário, obtido em testes de laboratório ou de estruturas reais, é utilizado com frequência como um parâmetro que descreve a resistência do concreto à penetração de íons cloreto. A avaliação do tempo de iniciação da corrosão assumindo que o  $D_{ns}$  e a concentração superficial ( $C_s$ ) de cloretos são conhecidos e constantes no tempo, é uma abordagem simples, que depende fortemente da confiabilidade dos parâmetros utilizados no cálculo como o teor limite de cloretos, já que em estruturas reais o  $D_{ns}$  e a  $C_s$  não seriam



constantes e o efeito de ligação dos íons cloro com os aluminatos do cimento seria mais um processo presente (BERTOLINI, 2004).

Estudos que avaliaram o coeficiente de difusão mostram que ele é influenciado pelo tipo de cimento, relação a/c, condições de cura e pelo tempo (LOPES, 1999; PEREIRA, 2001; HOFFMANN, 2001, *apud* ANDRADE, 2001).

#### **2.4.2.5 Fissuras no concreto**

Fissuras no concreto permitem um ingresso acelerado de cloretos, o que leva a uma redução no período de iniciação da corrosão do aço. Diversas normas que tratam do assunto de estruturas de concreto, limitam os valores de aberturas de fissuras na superfície do elemento estrutural, porém não levam em consideração a influência das fissuras na interface do concreto com o aço. O tempo de iniciação da corrosão em concretos fissurados é significativamente menor quando as fissuras têm aberturas maiores. Além disso a orientação das fissuras também é um fator importante no processo de propagação da corrosão, sendo mais crítico em fissuras longitudinais devido a perda da camada passivadora do aço em grandes áreas da armadura (PACHECO, 2015).

Essas conclusões também foram observadas por outros pesquisadores. Segundo Savija (2014), maiores aberturas de fissuras permitem uma maior penetração de cloretos, e fissuras paralelas à armadura são extremamente prejudiciais, pois expõem áreas maiores da armadura à altas concentrações de íons cloro. Portanto a forma da fissura ao redor da armadura é ainda mais relevante do que sua abertura superficial. Sabendo que o ingresso de cloretos é um fenômeno muito complexo, pois depende de uma série de variáveis, como os materiais utilizados no concreto e suas condições de exposição ambiental, ainda não se compreende suficientemente o ingresso de cloretos em concretos fissurados (SAVIJA, 2014).

#### **2.4.2.6 Agregados**

Muitos autores relataram que a influência dos agregados no ingresso de íons cloro é devido principalmente a presença de uma zona de transição interfacial (*ITZ*) resultante das interações entre os agregados com a pasta de cimento (CARÉ, 2002). Em uma pesquisa realizada por Caré (2002) com argamassas feitas com 3 tipos de agregado miúdo (Areia fina, média e grossa) e dois diferentes teores de volume de agregados, foi mostrado que eles modificam a estruturas dos poros da pasta de cimentos e suas propriedades de transporte,

podendo ser o coeficiente de difusão efetivo uma função do teor da *ITZ* e da tortuosidade (*T*). Este último parâmetro é caracterizado por aumentar o “caminho” de difusão dos agentes ingressantes (CARÉ, 2002).

A influência da natureza dos agregados tem sido pouco estudada, porém a influência da fração volumétrica dos agregados pode ser caracterizada com uma boa precisão, considerando-se um efeito de diluição: o coeficiente de difusão efetivo reduz da mesma maneira que se reduz o volume de pasta nas misturas, portanto mesmo que haja um aumento do coeficiente de difusão na zona de transição formada ao redor dos agregados, eles compensam isso com o aumento da tortuosidade (OLLIVIER e TORRENTI, 2008).

Um estudo realizado por Akrouf *et al* (2008), com argamassas de dois tipos diferentes de agregado miúdo (areia calcária e siliciosa), ensaiadas por teste de migração de cloretos e difusão pura, mostrou que a areia calcária obteve o melhor resultado de resistência ao ingresso de cloretos.

Todos estes fatores vistos até agora confirmam a grande quantidade de variáveis e a complexidade envolvida na obtenção de uma previsão de vida útil de uma estrutura de concreto, especialmente àquela que estará exposta à ambientes com alta agressividade, como é o caso do ambiente marinho. A seguir, alguns métodos para inibir ou postergar o processo de corrosão, serão brevemente apresentados.

## **2.5 Métodos de proteção das armaduras**

Para se obter uma boa durabilidade da estrutura contra a corrosão, é essencial que o concreto tenha uma baixa permeabilidade, com uma adequada quantidade de cimento, o mínimo teor de cloretos na massa e uma boa camada de cobrimento para proteger a armadura (BROOMFIELD, 2004).

Diversos métodos podem ser aplicados para o aumento da durabilidade das estruturas de concreto contra a corrosão, como a utilização de aditivos inibidores de corrosão (Nitrito de cálcio, Monofluorofosfato de sódio), revestimentos na armadura (Epóxi, zinco), revestimentos superficiais no concreto (tintas orgânicas, coberturas impermeáveis, camadas de argamassa polimérica), armaduras de aço inox ou poliméricas reforçadas com fibras e a proteção catódica da armadura. Ao utilizar esses métodos, tem-se uma elevação no custo inicial da obra, portanto é necessário realizar um estudo de viabilidade, levando em conta a diminuição dos custos de manutenção e eventuais reparos na estrutura futuramente, uma vez que em ambientes de elevada

agressividade, apenas um concreto de alta qualidade pode não ser suficiente para proteger a armadura (LOURENÇO e SOUZA, 2018).

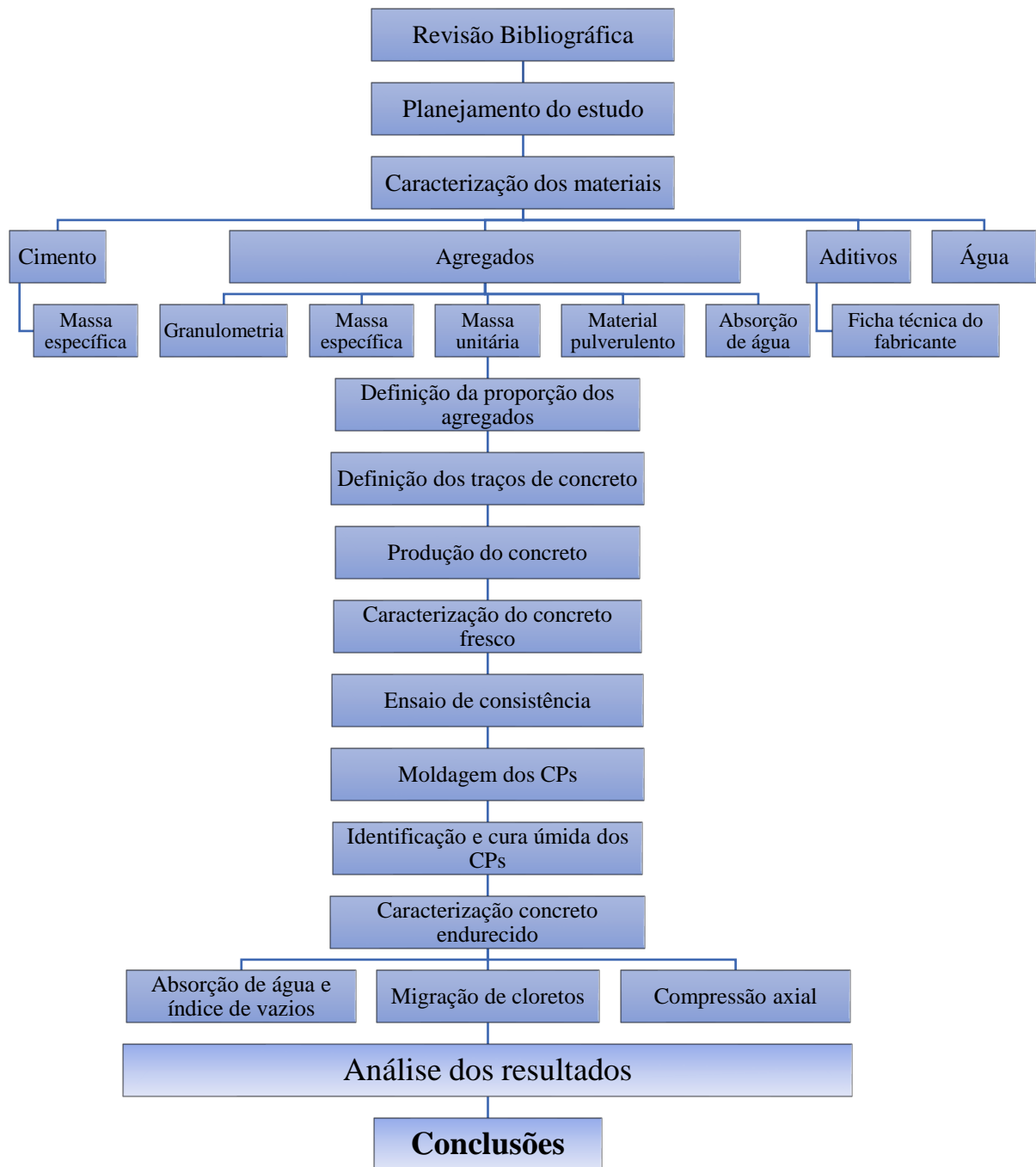
Um estudo das propriedades eletroquímicas da armadura do concreto realizado por Blanco, Campos e Valdés (2019) mostrou que o aditivo natural de mucilagem de Nopal (uma espécie de gel do cacto) tem efeitos positivos no retardo da corrosão da armadura, mantendo as condições ideais na matriz do concreto, para que o aço adquira um estado de passivação. Porém houve uma redução na resistência a compressão do concreto nas amostras que continham o aditivo, na ordem de 2,3 a 2,5 Mpa em relação a amostra de controle que obteve resistência a compressão de 24,9 Mpa. Foram utilizadas 3 técnicas eletroquímicas no estudo, potencial de circuito aberto, ruído eletroquímico, resistência de polarização linear onde todas mostraram um bom desempenho da mucilagem de Nopal na matriz do concreto.

### 3 METODOLOGIA

Através da revisão bibliográfica do assunto, foi identificado a grande importância dos parâmetros de durabilidade do concreto armado em regiões litorâneas, como o coeficiente de difusão de íons cloreto. Constatou-se que a influência dos agregados nas propriedades de transporte de íons agressivos no concreto havia sido pouco estudada, e considerando que existe uma grande variedade de agregados sendo utilizada na cadeia produtiva do concreto, foi definido um estudo nessa área, utilizando-se de alguns tipos diferentes de agregado, tanto na sua rocha de origem, quanto nas características geométricas e granulométricas.

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos de ensaio utilizados, junto com o respectivo embasamento em normas técnicas e pesquisas científicas. O programa experimental se iniciou através da caracterização dos materiais utilizados, para posteriormente definir a proporção dos agregados, definindo os traços a serem utilizados. Após isso, foram realizados ensaios de controle das características usuais do concreto e os ensaios específicos para determinar as características de difusividade de cada traço, em relação ao ingresso de íons cloreto. Para analisar os resultados do ensaio de migração de íons cloreto, foram utilizadas equações matemáticas propostas na literatura, com o objetivo de obter os coeficientes de difusão de íons cloreto e a estimativa de vida útil para os traços avaliados. A Figura 14 apresenta um fluxograma das atividades desenvolvidas no decorrer desta pesquisa.

**Figura 14 - Fluxograma das atividades**



Fonte: Autor, 2020

### **3.1 Caracterização dos materiais utilizados**

A primeira etapa realizada no programa experimental do trabalho foi a caracterização dos agregados e do cimento através de ensaios e dos demais materiais como a água e os aditivos utilizados nos traços de concreto, conforme as normas brasileiras vigentes.

#### **3.1.1 Cimento**

O cimento utilizado no programa experimental foi o cimento Portland tipo CP IV-32, regido pela NBR 16697 (ABNT, 2018). Como mostrado por estudos de Marques e Ribeiro (2014) o CP IV é o mais eficiente e com maior resistência à corrosão por íons cloreto, e por esse motivo foi o escolhido, já que em obras com incidência de cloretos, esse seria o tipo mais adequado a se utilizar.

Foi realizado o ensaio para a determinação da massa específica, conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017). Foi enchido o frasco de Le Chatelier com querosene até atingir um nível entre a marca zero e um do frasco, e anotado o valor exato. Após isso foi adicionado 60 gramas de cimento no frasco, e mediu-se o volume de líquido final. Com a diferença de volumes e a massa adicionada obteve-se a massa específica do cimento, que após duas repetições do ensaio, resultou no valor de 2,87 g/cm<sup>3</sup>.

#### **3.1.2 Agregados**

Segundo a NBR 9935 (ABNT, 2011), agregado é definido como um material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto. Os agregados podem ser naturais (podem ser utilizados tal e qual encontrados na natureza, podendo ser submetidos à lavagem, classificação ou britagem), artificiais (resultantes de processo industrial envolvendo alteração mineralógica, química ou físico-química da matéria-prima original, para uso como agregado em concreto ou argamassa) ou reciclados (rejeitos ou subprodutos da produção industrial, construção civil etc.) (ABNT NBR 9935, 2011).

Segundo a NBR NM 66 (ABNT, 1998), quanto a origem as rochas das quais os agregados foram obtidos, podem ser: ígneas (agregado de basalto, granito etc.), sedimentares (agregado de calcário, arenito etc.) ou metamórficas (mármore, gnaisse etc.).

Os agregados utilizados no estudo foram as britas 0 (4,75 a 12,5mm) e 1 (9,5 a 25mm) de basalto e calcário, areia natural de rio, areia artificial de basalto e areia artificial de granito, conforme a Figura 15.

**Figura 15 – Agregados utilizados nos ensaios**



Fonte: Autor, 2020

### **3.1.2.1 Agregado graúdo**

Foram utilizados dois tipos de agregados graúdos, um de origem basáltica e outro de origem calcária. Conforme definição da NBR 7211 (ABNT, 2009), o agregado graúdo tem seus grãos passando pela peneira com abertura de 75mm e ficando retido na peneira com abertura de malha de 4,75mm. O método utilizado para a determinação da composição granulométrica dos agregados, foi de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Foram secas em estufa amostras de 1kg para a brita tipo 0 e 5kg para a brita tipo 1. Após isso, realizou-se o peneiramento manual das amostras através das peneiras da série normal e intermediária, e com isso obteve-se a curva granulométrica e a porcentagem média retida e acumulada dos agregados, após realizar duas vezes o ensaio por tipo de brita.

Para obter as massas específicas do agregado seco, saturado superfície seca (SSS), aparente e a absorção de água do agregado graúdo, foi realizado o método prescrito pela NBR

NM 53 (ABNT, 2009). Os resultados obtidos através desses ensaios são apresentados na Tabela 21 e Tabela 22.

**Tabela 21 - Caracterização da Brita 0**

TIPO DE AGREGADO GRAÚDO	BRITA 0 DE BASALTO		BRITA 0 DE CALCÁRIO		MÉTODO DE ENSAIO
Módulo de finura	5,78		6,04		NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Dimensão máxima característica (mm)	9,5		12,5		
Abertura peneira (mm)	% média retida	% média acumulada	% média retida	% média acumulada	
19	0,00	0	0,00	0	
12,5	0,00	0	0,37	0	
9,5	2,75	3	9,40	10	
6,3	44,52	47	66,66	76	
4,75	28,80	76	19,43	96	
2,36	23,08	99	2,98	99	
Fundo	0,84	100	1,27	100	
Massa específica seco (g/cm <sup>3</sup> )	2,91		2,80		NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Massa específica SSS (g/cm <sup>3</sup> )	2,79		2,75		
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,73		2,72		
Absorção (%)	2,23		1,14		

Fonte: Autor, 2020

**Tabela 22 - Caracterização da Brita 1**

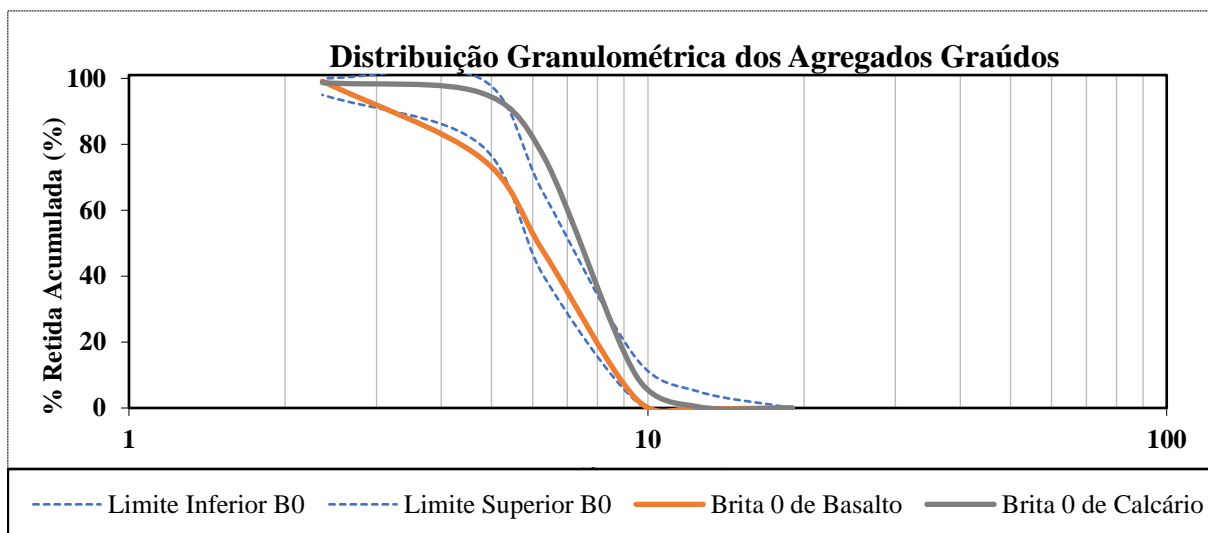
TIPO DE AGREGADO GRAÚDO	BRITA 1 DE BASALTO		BRITA 1 DE CALCÁRIO		MÉTODO DE ENSAIO
Módulo de finura	6,38		6,78		NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Dimensão máxima característica (mm)	19		25		
Abertura peneira (mm)	% média retida	% média acumulada	% média retida	% média acumulada	
25	0,00	0	0,00	0	
19	0,00	0	8,05	8	
12,5	39,74	40	70,54	79	
9,5	37,11	77	18,00	97	
6,3	21,88	99	2,92	100	
4,75	0,45	99	0,04	100	
Fundo	0,81	100	0,39	100	
Massa específica seco (g/cm <sup>3</sup> )	2,86		2,74		NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Massa específica SSS (g/cm <sup>3</sup> )	2,75		2,68		
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,70		2,65		
Absorção (%)	2,13		1,36		

Fonte: Autor, 2020

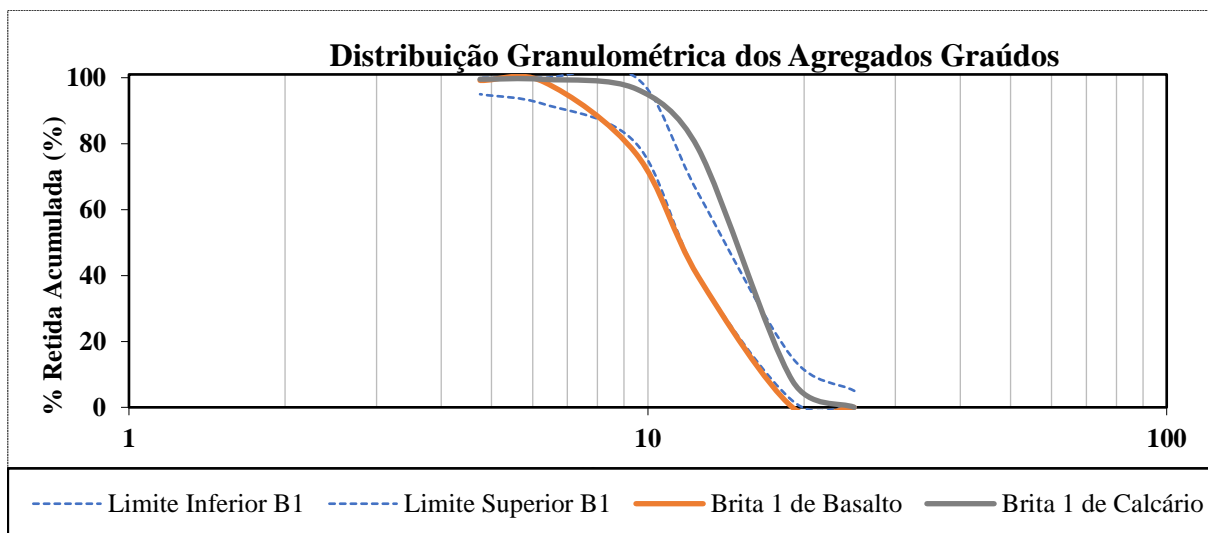


Foram determinadas as curvas granulométricas para os agregados graúdos, apresentadas na Figura 16 para o agregado de origem basáltica e na Figura 17 para o agregado de origem calcária. As curvas granulométricas apresentaram-se próximas aos limites previstos pela NBR 7211 (ABNT, 2009), indicando como coerente o uso dos agregados para concreto.

**Figura 16 - Distribuição granulométrica da brita 0**



**Figura 17 - Distribuição granulométrica da brita 1**



### 3.1.2.2 Agregado miúdo

Os agregados miúdos utilizados foram a areia natural, artificial de basalto e de granito, sendo classificados como os agregados cujos grão passam pela peneira com abertura de malha de 4,75mm (ABNT NBR 7211, 2009). O método utilizado para a determinação da composição granulométrica desses agregados, foi o indicado pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). Foram secas em estufa amostras de 0,3kg para a realização do ensaio nas areias. Após isso, realizou-se o peneiramento manual das amostras através das peneiras da série normal e intermediária, e com isso obteve-se a curva granulométrica e a percentagem média retida e acumulada dos agregados, após realizar duas vezes o ensaio por tipo de areia.

Para obter a massa específica desses agregados miúdos foi realizado o método prescrito pela NBR NM 52 (ABNT, 2009), no qual foi omitido os itens 6.2 a 6.5, já que os agregados a serem utilizados no concreto foram na sua condição natural de umidade. Para a determinação da quantidade de material mais fino que a abertura de malha da peneira de 75 µm foi realizado o método da NBR NM 46 (ABNT, 2003). A Tabela 23 mostra os resultados obtidos com os ensaios descritos acima.

**Tabela 23 - Caracterização do agregado miúdo**

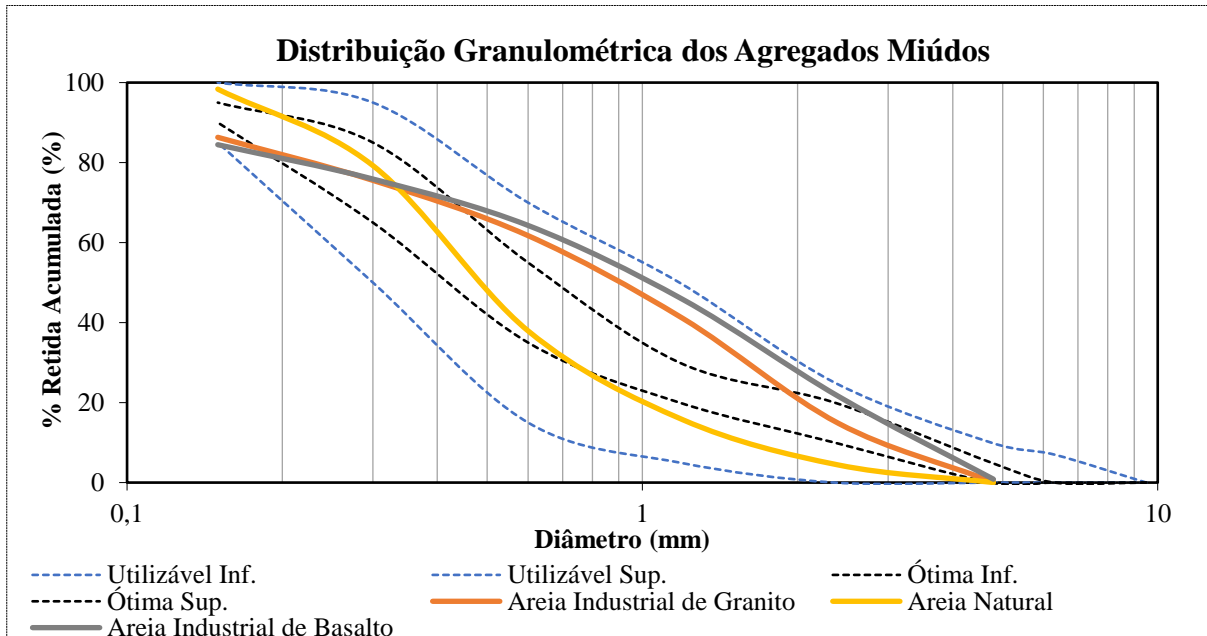
TIPO DE AGREGADO MIÚDO	AREIA NATURAL		AREIA ARTIFICIAL DE GRANITO		AREIA ARTIFICIAL DE BASALTO		MÉTODO DE ENSAIO
<b>Módulo de finura</b>	2,36		2,80		2,93		NBR NM 248 (ABNT, 2003)
<b>Dimensão máxima característica (mm)</b>	2,36		4,75		4,75		
Abertura peneira (mm)	% média retida	% média acumulada	% média retida	% média acumulada	% média retida	% média acumulada	
<b>4,75</b>	0,02	0	0,15	0	0,85	1	
<b>2,36</b>	4,38	4	14,68	15	20,72	22	
<b>1,2</b>	11,27	16	26,15	41	24,17	46	
<b>0,6</b>	22,27	38	20,75	62	18,55	64	
<b>0,3</b>	41,32	79	13,82	76	11,60	76	
<b>0,15</b>	19,12	98	10,77	86	8,58	84	
<b>Fundo</b>	0,85	99	13,37	100	15,25	100	
<b>Material fino que passa na peneira 0,075mm (%)</b>	0,7		10,7		15,8		NBR NM 46 (ABNT, 2003)
<b>Massa Específica Aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,61		2,58		2,70		NBR NM 52 (ABNT, 2009)

Fonte: Autor, 2020

Foram determinadas as curvas granulométricas para as areias ensaiadas, apresentadas na Figura 18. As areias obtiveram resultados coerentes para o uso em concreto, estando de acordo

com os limites da composição granulométrica estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009) para agregados miúdos.

**Figura 18 - Distribuição granulométrica das areias utilizadas**



### 3.1.3 Água

A água utilizada no traço de concreto foi proveniente da rede de água potável da Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC). Não foram realizados ensaios na água, pois por ser uma água potável fornecida dentro dos parâmetros de potabilidade, atende os requisitos para aplicação em concreto.

### 3.1.4 Aditivos

Segundo Bauer *et al* (2019) os aditivos redutores de água RA1, são constituídos de materiais orgânicos ou combinados orgânicos e inorgânicos que atuam diretamente sobre o cimento e a água de amassamento. Os aditivos RA1 à base de lignossulfonatos e naftalenos são os tipos mais utilizados, e sua atuação é basicamente de natureza eletrostática, pois quando as moléculas do RA1 são adsorvidas na superfície das partículas sólidas dispersas em meio aquoso, elas adquirem cargas negativas, passando a se repelirem e evitando a formação de aglomerados de partículas.

Os aditivos redutores de água RA2 têm uma grande capacidade de reduzir o consumo de água na mistura de concreto, podendo ser superior a três vezes em relação ao tipo RA1. Os aditivos RA2 à base de éter policarboxilato adsorvem em cimento hidratado pelos grupos de carboxilato, enquanto as cadeias laterais de etoxilato são hidrófilas, formando uma camada resistente de solvatação da molécula, o que constitui uma camada esférica ao redor do cimento, evitando a refloculação das partículas (BAUER *et al*, 2019).

Foram utilizados 2 aditivos da marca Viapol na elaboração dos traços. O aditivo RA1 de pega normal, Eucon 211, foi usado nos traços em que a trabalhabilidade requerida ficou muito próxima do objetivo apenas com a água disponível da mistura. Como os agregados miúdos artificiais absorveram mais água da mistura, devido a sua maior finura, a trabalhabilidade foi bastante afetada e foi necessário a utilização do aditivo RA2 de pega normal, Plastol 6040, para atingir o abatimento de tronco de cone planejado.

As informações técnicas de ambos os aditivos citados são mostradas na Figura 19 abaixo.

**Figura 19 - Aditivos utilizados**

<b>Característica</b>	<b>Eucon<sup>®</sup> 211</b>
Base química	Lignosulfonatos
Aspecto	Líquido
Cor	Marrom escuro
Massa específica	~1,20 g/cm <sup>3</sup>
pH	~7,0
Teor de cloretos	Não contém cloretos
<b>Característica</b>	<b>Plastol<sup>®</sup> 6040</b>
Base química	Solução de policarboxilatos em meio aquoso
Aspecto	Líquido
Cor	Castanho claro
Massa específica	~1,08 g/cm <sup>3</sup>
pH	~5,7
Teor de cloretos	Não contém adição de cloretos

Fonte: Viapol, 2016

A indicação de dosagem para o aditivo Eucon 211 varia de 0,3 a 0,9% em relação à massa de cimento. Já para o aditivo Plastol 6040, a dosagem comum varia de 0,1 a 1,5% em relação à massa de cimento. Esses valores são orientativos segundo a empresa fabricante, e no estudo em questão as dosagens variaram conforme a necessidade para atingir o abatimento de tronco de cone planejado.

### 3.2 Determinação da proporção dos agregados

Com base no estudo de Reginato (2014) foi empregado o método “A”, da NBR NM 45 (ABNT, 2006) para determinar a massa unitária de material compactado e da densidade a granel e do volume de vazios de agregados graúdos, para obter a melhor proporção entre a brita 1 e a brita 0. Para tal ensaio utilizou-se um recipiente de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, estando dentro das recomendações de De Larrard (1999), para evitar o efeito container (REGINATO, 2014). Esse método é indicado para agregados com dimensão máxima característica de 37,5mm ou menor, e consiste primeiramente em determinar a massa do recipiente, após isso a massa da amostra compactada (em 3 camadas com 25 golpes) mais a massa do recipiente. Sabendo o volume do recipiente utilizado e massa específica seca obtida segundo a NBR NM 53 (ABNT, 2009), é possível calcular a massa unitária do agregado e o índice de volume de vazios nos agregados. Os resultados do ensaio são apresentados na Tabela 24.

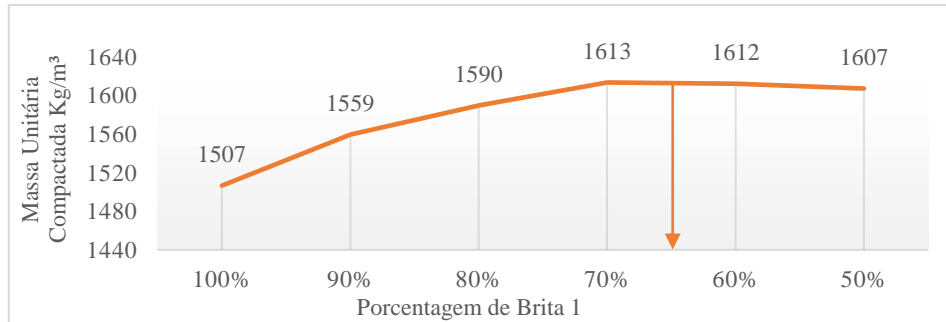
**Tabela 24 - Massa unitária e índice de vazios dos agregados graúdos**

<b>Agregado Graúdo de Calcário</b>							
Brita 0	Brita 1	Massa recipiente + amostra (kg)			Média (kg)	Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	Índice de Vazios (%)
0%	100%	13,94	13,88	13,96	13,93	1507	45,69%
10%	90%	14,16	14,20	14,26	14,21	1559	43,78%
20%	80%	14,30	14,40	14,40	14,37	1590	42,70%
30%	70%	14,42	14,52	14,54	14,49	1613	41,83%
40%	60%	14,46	14,52	14,48	14,49	1612	41,88%
50%	50%	14,44	14,44	14,50	14,46	1607	42,06%
<b>Agregado Graúdo de Basalto</b>							
Brita 0	Brita 1	Massa recipiente + amostra (kg)			Média (kg)	Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	Índice de Vazios (%)
0%	100%	13,98	14,02	14,06	14,02	1524	47,18%
10%	90%	14,08	14,08	14,16	14,11	1540	46,61%
20%	80%	14,16	14,18	14,20	14,18	1554	46,13%
30%	70%	14,18	14,24	14,30	14,24	1566	45,74%
40%	60%	14,30	14,28	14,38	14,32	1581	45,22%
50%	50%	14,28	14,34	14,40	14,34	1584	45,09%
60%	40%	14,32	14,28	14,36	14,32	1581	45,22%

Fonte: Autor, 2020

A proporção escolhida entre os tamanhos de britas para o agregado de calcário foi de 35% de brita 0 para 65% de brita 1, resultado teoricamente na maior massa unitária e menor índice de vazios dos agregados. A Figura 20 mostra a curva de massa unitária obtida através do ensaio para as britas de calcário.

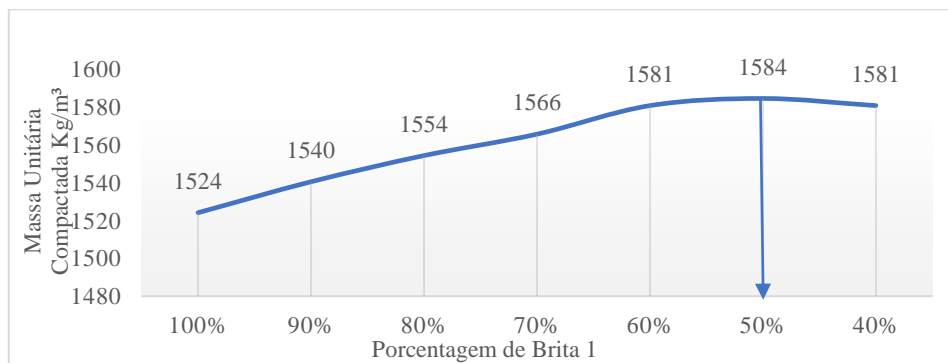
**Figura 20 - Massa unitária do agregado graúdo de calcário**



Fonte: Autor, 2020

Já a proporção escolhida entre os tamanhos de britas para o agregado de basalto foi de 50% de brita 0 para 50% de brita 1, resultado teoricamente na maior massa unitária e menor índice de vazios dos agregados. A Figura 21 mostra a curva de massa unitária obtida através do ensaio para as britas de calcário.

**Figura 21 - Massa unitária do agregado graúdo de basalto**



Fonte: Autor, 2020

### 3.3 Definição dos traços de concreto

A definição dos traços foi baseada no método de dosagem da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) e no estudo da melhor relação entre os agregados (brita 0 e brita 1), a fim de obter o melhor empacotamento dos grãos na mistura. Para analisar a influência dos agregados nas propriedades de difusividade do concreto foram elaborados 12 traços diferentes, variando o tipo de rocha da brita e da areia, a granulometria da mistura, e a relação água cimento.

Para verificar se misturas mais compactas de agregados poderiam apresentar resultados melhores, 2 traços com relação a/c de 0,50 continham uma granulometria descontínua de agregado graúdo (apenas brita 1). Para comparar com as misturas de granulometria descontínua

foram realizados 8 traços com relação a/c de 0,50 e granulometria uniforme dos agregados graúdos. Nesses 8 traços variou-se o tipo de agregado graúdo e miúdo. Com a intenção de verificar a influência da relação água cimento em conjunto com a variação do tipo de agregado, foram elaborados 4 traços de relação a/c de 0,60, nos quais foram utilizados diferentes tipos de agregado miúdo e graúdo.

Como a dosagem depende das massas específicas dos agregados utilizados, e tais foram diversos, optou-se por utilizar um traço médio, obtido através do cálculo de dosagem para cada traço específico. Assim a quantidade de agregados nas misturas ficou fixa. O consumo de cimento médio dos traços com relação a/c de 0,50 foi de 410 Kg/m<sup>3</sup>, e para relação a/c de 0,60 foi de 390 Kg/m<sup>3</sup>.

Os traços com apenas brita 1 continham um teor de argamassa de 51,6%, enquanto os traços com brita 0 e 1 tiveram um teor de argamassa de 50,6%. Ambos os traços utilizaram a areia na condição pura, sem misturas. A Tabela 25 apresenta o traço unitário de cada concreto utilizado.

**Tabela 25 - Traços de concreto utilizados**

Agregado graúdo + agregado miúdo	Nomenclatura	Traço unitário					Aditivo
		Cimento (CP IV-32)	Areia	Brita		Água	
				4,75/12,5 (Brita 0)	9,5/25 (Brita 1)		
Basalto + Areia Natural	B1-AN-0,5	1,00	1,82	-	2,64	0,50	Tabela 26
Basalto + Areia Natural	B01-AN-0,5	1,00	1,77	1,35	1,35	0,50	
Basalto + Areia Granito	B01-AG-0,5	1,00	1,77	1,35	1,35	0,50	
Basalto + Areia Basalto	B01-AB-0,5	1,00	1,77	1,35	1,35	0,50	
Basalto + Areia Natural	B01-AN-0,6	1,00	1,77	1,35	1,35	0,60	
Basalto + Areia Basalto	B01-AB-0,6	1,00	1,77	1,35	1,35	0,60	
Calcário + Areia Granito	C1-AG-0,5	1,00	1,82	-	2,64	0,50	
Calcário + Areia Natural	C01-AN-0,5	1,00	1,77	0,95	1,75	0,50	
Calcário + Areia Granito	C01-AG-0,5	1,00	1,77	0,95	1,75	0,50	
Calcário + Areia Basalto	C01-AB-0,5	1,00	1,77	0,95	1,75	0,50	
Calcário + Areia Natural	C01-AN-0,6	1,00	1,77	0,95	1,75	0,60	
Calcário + Areia Granito	C01-AG-0,6	1,00	1,77	0,95	1,75	0,60	

Fonte: Autor, 2020

### 3.4 Caracterização do concreto

Serão apresentados a seguir, os procedimentos e ensaios realizados no concreto no estado fresco e endurecido, a fim de obter as características e propriedades importantes para entender o comportamento do concreto nos ensaios de absorção, compressão axial e principalmente no ensaio de migração de cloretos.

### 3.4.1 Procedimentos de moldagem e cura

Inicialmente não seriam utilizados aditivos nas misturas, mas como a grande variação, na granulometria e na forma do grão dos tipos de agregados, proporcionaria concretos com trabalhabilidade e consistência muito distintos, isso poderia afetar o adensamento e a homogeneidade do concreto. Por esse motivo optou-se por fixar um valor de abatimento de tronco de cone nas misturas, e através do uso de aditivos, tentar manter esse valor o mais próximo possível entre as misturas.

A classe de consistência segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015), escolhida para este estudo foi a S100 ( $100 \leq a < 160$ ), e o ensaio utilizado para determinar o abatimento foi realizado de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998). Devido as diferenças entre os agregados dos traços, foi difícil a obtenção de um valor de abatimento constante, e alguns resultados ficaram fora do valor desejado. A dosagem de aditivo em cada traço e seu respectivo abatimento de tronco de cone, estão resumidos na Tabela 26.

**Tabela 26 - Quantidade de aditivo utilizado e respectivo abatimento de cada traço**

Nomenclatura	Aditivo (% em relação a massa de cimento )		Slump (mm)
	Eucon 211	Plastol 6040	
B1-AN-0,5	0,10%	-	150
B01-AN-0,5	0,25%	-	140
B01-AG-0,5	1,61%	-	80*
B01-AB-0,5	-	0,77%	190*
B01-AN-0,6	-	-	160
B01-AB-0,6	0,91%	-	180*
C1-AG-0,5	0,73%	-	160
C01-AN-0,5	0,10%	-	120
C01-AG-0,5	1,29%	-	90*
C01-AB-0,5	-	0,65%	190*
C01-AN-0,6	-	-	165*
C01-AG-0,6	0,57%	-	155

\*Resultados fora da margem estipulada

Fonte: Autor, 2020

A moldagem dos corpos de prova de cada traço obedeceu a NBR 5738 (ABNT, 2015), sendo realizado o adensamento dos corpos de prova de maneira manual em 2 camadas com 12 golpes cada. Assim como a moldagem, o procedimento de cura executado obedeceu a NBR 5738 (ABNT, 2015), onde foi feita a submersão dos corpos de prova moldados, em água saturada com hidróxido de cálcio, por um período de 28 e 63 dias e temperatura de  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ .



### **3.4.2 Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto**

O ensaio para determinação da absorção de água, do índice de vazios e massa específica do concreto endurecidos, através de imersão em água, foi realizado baseando-se no método prescrito pela NBR 9778 (ABNT, 2005). Inicialmente as amostras cilíndricas (CPs) foram secas em estufa ( $100 \pm 5$ ) °C durante um período de 72h, obtendo-se após a massa seca das amostras. Posteriormente as amostras foram imersas em água a temperatura de ( $23 \pm 2$ ) °C durante um período de 72h. Porém devido a impossibilidade de realizar o procedimento de fervura no laboratório da universidade durante as 5h previstas em norma, a massa dos corpos de prova em imersão, foi obtida através da balança hidrostática logo após as 72h de imersão em água, sem a etapa de fervura. As amostras foram então retiradas da água, enxugadas com pano úmido, e registradas as suas massas saturadas.

Foram ensaiados 2 corpos de prova por traço de concreto, porém devido a razões externas não foi possível realizar o ensaio aos 28 dias em todos os traços, nos quais a idade no momento do ensaio variou de 26 a 31 dias.

### **3.4.3 Determinação da resistência à compressão axial**

Os corpos de prova ensaiados atendem aos requisitos da NBR 5738 (ABNT, 2015), sendo cilíndricos e com dimensões de 10cm de diâmetro por 20cm de altura. O ensaio de compressão axial do corpo de prova cilíndrico obedeceu ao procedimento da NBR 5739 (ABNT, 2018). O ensaio foi executado em uma prensa da marca Emic modelo DL30000N com capacidade de carga de compressão de 2000 kN e a velocidade de carregamento durante o ensaio foi constante e dentro do intervalo de ( $0,45 \pm 0,15$ ) MPa/s.

Os corpos de prova ensaiados permaneceram em cura saturada até o momento do ensaio. As faces dos corpos de prova foram retificadas para obter uma superfície lisa e livre de ondulações, e foi utilizado um disco de Neoprene nas extremidades, contribuindo para a transferência uniforme das cargas aplicadas à amostra. Foram ensaiadas 3 amostras por traço nas idades de 28 e 63 dias.

### **3.5 Ensaio de migração de cloretos**

O ensaio de migração de cloretos utilizado foi a adaptação do ensaio da ASTM C1202, proposta por Andrade (1993) para obter os coeficientes de difusão de cloretos no concreto, pois

existem críticas ao procedimento da ASTM C1202, referentes à proximidade da amostra em relação à malha que funciona como eletrodo e à elevada tensão aplicada de 60 Volts, ocasionando um elevado aquecimento das amostras, influenciando os resultados (RIBEIRO, 2018). Como um teste de penetração natural de cloretos consumiria muito tempo, têm sido realizadas tentativas de calcular o coeficiente de difusão, através de medidas de resistividade ou ensaios acelerados de migração de íons cloreto pela aplicação de um campo elétrico, (ANDRADE, 1993).

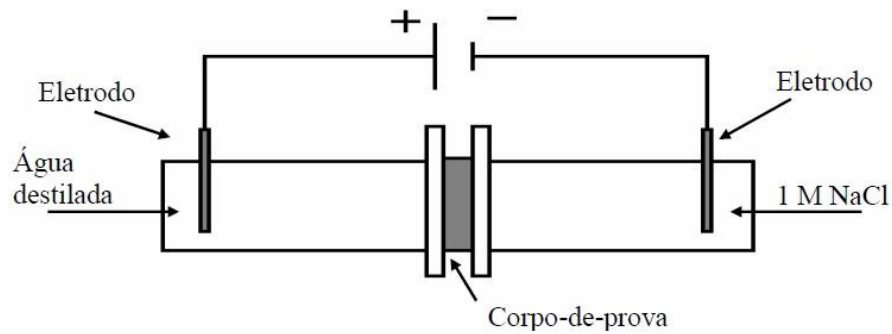
Este ensaio é baseado no princípio da aplicação de uma diferença de potencial elétrico entre uma célula com solução de cloretos (catódica) e uma sem cloretos (anódica), onde a amostra de concreto em estudo é colocada entre as duas células (RIBEIRO, 2018).

Ao se aplicar um campo elétrico de até 10.5V/cm, a migração de íons cloreto se produz de forma similar e através de poros de mesmo tamanho que os poros em caso de difusão natural, portanto a determinação do coeficiente de difusão não se mostra afetada mediante ensaios de migração (ALONSO, ANDRADE E CASTELLOTE, 2004).

A tensão escolhida para o ensaio foi a mesma utilizada em muitos estudos de diversos autores como Ribeiro, Labrincha e Morelli (2011), Alonso, Andrade e Castellote (2001) e GjØrv e Tong (2001), sendo de 12 V, proporcionando um fluxo de íons próximo do obtido em caso de difusão natural. Como não foi possível utilizar a saturação à vácuo no experimento, optou-se por manter as amostras em água por um período de 5 dias antecedentes ao início do teste, já dentro do aparato, conforme proposto por Santos (2006). A amostra de concreto analisada foi retirada da região central dos cilindros moldados para reduzir as heterogeneidades. A espessura escolhida da amostra foi de 50mm, a mesma utilizada pela ASTM C1202 (2019) e GjØrv e Tong (2001), sendo adequada para o tamanho máximo (25mm) dos agregados utilizados, evitando com que o fluxo de cloretos ocorra de maneira facilitada pela zona de transição da interface pasta-agregado.

Para determinar a concentração de cloretos na célula anódica foi realizado o mesmo procedimento do estudo de Ribeiro, Labrincha e Morelli (2011), o qual consiste na medição periódica da condutividade elétrica da solução da célula anódica através de um Condutivímetro portátil e com esses resultados realizar uma estimativa da concentração de cloretos empregando a correlação obtida experimentalmente. O modelo esquemático do ensaio está indicado na Figura 22.

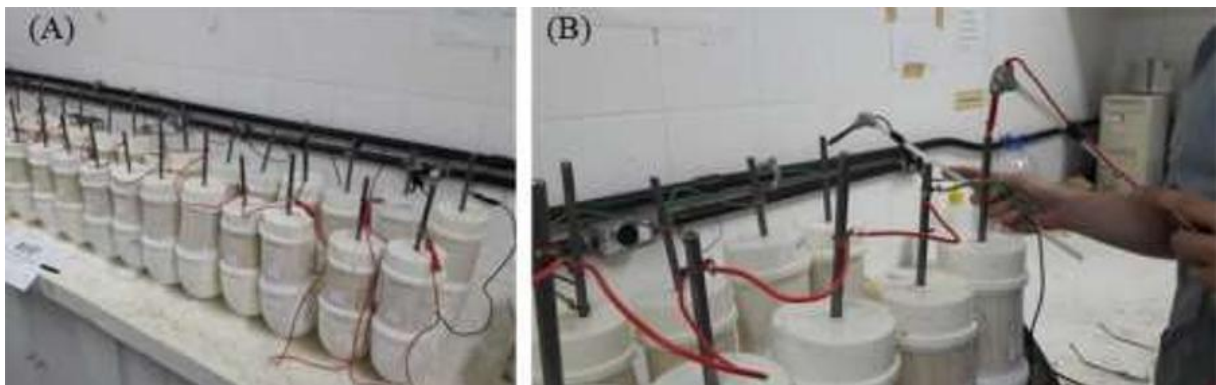
**Figura 22 - Representação esquemática do ensaio de migração de cloretos**



Fonte: Santos, 2006

O aparato de ensaio utilizado, foi uma adaptação muito similar aos modelos utilizados por diversos pesquisadores Brasileiros, sendo baseado no exemplo da Figura 23.

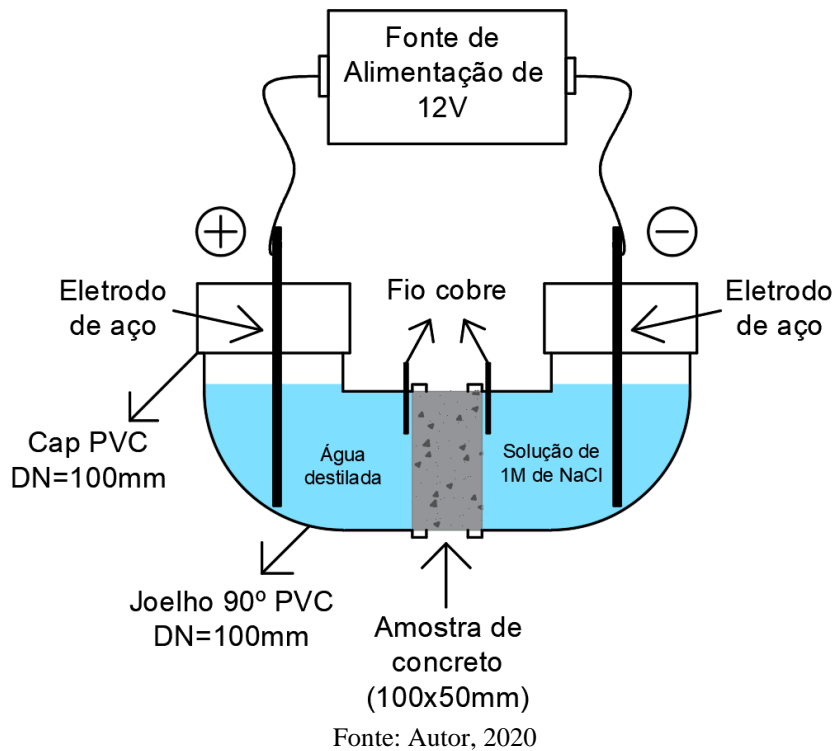
**Figura 23 - Exemplo do aparato de ensaio de migração de cloretos, feito com tubos e peças de PVC**



Fonte: Baptista *et al*, 2019

As peças utilizadas na montagem do aparato de ensaio foram de tubos/conexões de PVC, e seus encaixes com a amostra de concreto foram devidamente selados com selante a base de Poliuretano (PU30) e selante a base de poli éter Siloxano. A Figura 24 representa o modelo do aparato utilizado no ensaio.

**Figura 24 -Representação do aparato utilizado no ensaio de migração**



### 3.5.1 Realização do ensaio

Foi analisado um total de 20 amostras (fatias) extraídas da região central de seu respectivo CP. Nos traços com relação a/c de 0,50 executou-se o ensaio em 2 amostras por traço. Já nos traços com relação a/c de 0,60, devido ao custo dos materiais do ensaio, foi utilizado apenas 1 amostra por traço. A idade das amostras no início do ensaio era de 42 dias.

Para visualização dos diferentes agregados em cada traço, são apresentadas as imagens da face de uma amostra de cada traço no APÊNDICE A. Após o corte das fatias, efetuou-se 4 medições espaçadas igualmente em cada fatia, através de um paquímetro digital. A média dessas medidas resultou na espessura média de cada fatia, que foi utilizada nos cálculos para obtenção do coeficiente de difusão. Além da espessura, o diâmetro das fatias também foi medido, porém não oscilou mais do que 1mm entre todas as amostras analisadas, portanto, todas as fatias tiveram o diâmetro utilizado nos cálculos como sendo de 100mm. A Tabela 27 mostra o resultado das espessuras medidas.

**Tabela 27 - Espessura média das fatias utilizadas no ensaio de migração**

<b>Traço</b>	<b>Fatia</b>	<b>Espessura média (mm)</b>
B1-AN-0,5	1	47,47
	2	47,60
B01-AN-0,5	1	46,44
	2	48,77
B01-AG-0,5	1	47,63
	2	47,95
B01-AB-0,5	1	47,62
	2	47,54
B01-AN-0,6	1	48,33
B01-AB-0,6	1	45,22
C1-AG-0,5	1	44,64
	2	46,80
C01-AN-0,5	1	48,62
	2	48,07
C01-AG-0,5	1	45,37
	2	49,29
C01-AB-0,5	1	46,50
	2	49,36
C01-AN-0,6	1	47,97
C01-AG-0,6	1	47,09

Fonte: Autor, 2020

Após realizadas as medições de dimensões, as amostras tiveram sua lateral selada com selantes a base de Poliuretano e Siloxano, evitando que ocorra a percolação da solução de NaCl através da região de contato da amostra de concreto com o tubo de PVC, e não permitindo vazamentos da solução de NaCl / água destilada do aparato de ensaio, garantido o fluxo unidirecional de cloretos somente através da amostra. A Figura 25 mostra os procedimentos de medição da espessura e selagem das amostras de concreto.

**Figura 25 - Medição e selagem das amostras de concreto**

Fonte: Autor, 2020

Os aparatos foram montados cuidando para que a colagem das fatias com os tubos de PVC fosse bem executada, evitando falhas e vazamentos. As distâncias entre as extremidades das fatias e o eletrodo posicionado em cada célula do aparato, foram mantidas constantes, para evitar que houvesse uma diferença de tensão aplicada às fatias nos diversos aparatos. Os eletrodos utilizados foram de aço comum e a fonte de tensão foi de 12,82V. Foram realizadas medidas diárias para verificar se a tensão estava sendo aplicada corretamente nos aparatos, conforme Figura 26.

**Figura 26 - Medição da tensão nos aparatos de migração de cloretos**



Fonte: Autor, 2020

A tensão efetiva na amostra de concreto foi obtida através de um fio de cobre posto em cada uma das faces da amostra, sendo verificada em intervalos de 2 a 3 dias. A tensão efetiva no estado não estacionário de difusão ficou em média no valor de 6V em todos os aparatos analisados. Já no estado estacionário de difusão, onde ocorre o fluxo constante de cloretos, a tensão efetiva ficou em média no valor de 12V. Essa diferença entre a tensão aplicada pela fonte (12,82V) e a tensão efetivamente aplicada no concreto, ocorre devido a presença de soluções entre os eletrodos e a amostra de concreto (CALÇADA, 2004, apud SANTOS, 2006).

Como a água na célula anódica é destilada no início do ensaio, apresentando condutividade elétrica muito baixa (0 a 10 uS/cm), ela tem uma alta resistência elétrica, já que ainda não há presença de cloretos e outros íons na solução. Conforme se inicia a passagem de cloretos para a célula anódica, há um grande incremento na condutividade elétrica da solução, e com isso a tensão efetiva aplicada à amostra chega próxima a tensão da fonte.

A condutividade elétrica na célula anódica foi medida a cada 24h, sempre após desligar a fonte de alimentação. As leituras foram realizadas introduzindo o condutímetro portátil AK50 da marca AKSO, na solução da célula anódica, agitando-se a solução por cerca de 10s para sua homogeneização e obtenção de uma leitura estável e confiável, conforme Figura 27. O aparelho

possuía compensação automática de temperatura (0 a 50°C), não sendo necessária uma correção nos valores obtidos no ensaio, o qual foi realizado numa temperatura média de 25 °C.

**Figura 27 - Medição da condutividade na célula anódica**



Fonte: Autor, 2020

A corrente elétrica que atravessa o aparato de migração de cloretos (solução + amostra de concreto) foi medida diariamente, através de um multímetro digital Et-1507b da marca Minipa, conforme a Figura 28.

**Figura 28 - Medição da corrente elétrica que atravessa o aparato de migração**



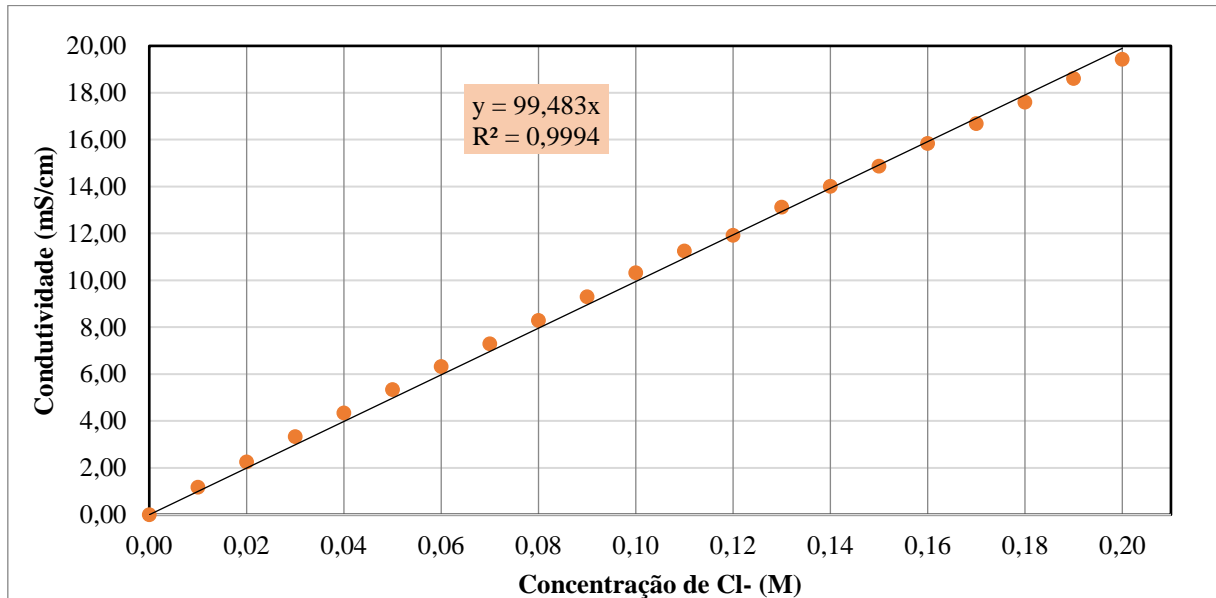
Fonte: Autor, 2020

### 3.5.2 Obtenção da curva experimental de cloretos

Para que fosse possível obter a concentração de cloretos na célula anódica com o passar do tempo, foi necessário realizar uma curva experimental de cloretos VS condutividade. Essa curva foi obtida através de adições sucessivas de 0,01 mol de NaCl (Cloreto de Sódio) em solução inicialmente destilada, e logo após cada adição, foram realizadas as respectivas medições de condutividade da solução através do condutivímetro portátil. Foram traçados 20

pontos experimentais e através deles obteve-se uma excelente correlação entre a condutividade elétrica e a concentração de íons cloreto na célula anódica, como mostrado na Figura 29.

**Figura 29 - Correlação entre a condutividade elétrica e a concentração de íons cloreto**



Fonte: Autor, 2020

### 3.5.3 Cálculo dos coeficientes de difusão e estimativa da vida útil do concreto

Para calcular os coeficientes de difusão através do ensaio de migração, o procedimento escolhido foi o utilizado por Ribeiro (2018), iniciando pela obtenção do coeficiente de difusão no estado estacionário através da equação de Nerst-Plank modificada (12), mostrada abaixo.

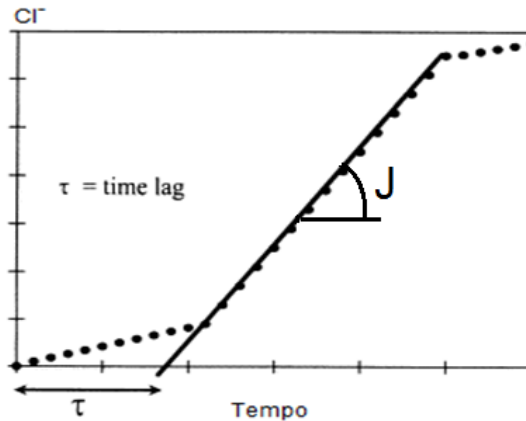
$$D_s = \frac{J_{Cl}RTI}{zFC_{Cl}\gamma\Delta\Phi} \quad (12)$$

Sendo  $D_s$  o coeficiente de difusão no estado estacionário ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),  $J_{Cl}$  o fluxo de íons ( $\text{mol}/\text{s}\cdot\text{cm}^2$ ),  $R$  a constante universal dos gases ( $1,9872 \text{ cal}/\text{mol}\cdot\text{K}$ ),  $T$  a temperatura (K),  $I$  a espessura do corpo de prova (cm),  $z$  a valência dos íons (1 para cloretos),  $F$  a constante de Faraday ( $23.063 \text{ cal}/\text{volt}\cdot\text{eq}$ ),  $C_{Cl}$  a concentração de íons cloreto na célula catódica ( $\text{mol}/\text{cm}^3$ ),  $\gamma$  o coeficiente de atividade da solução da célula catódica (0,657 para cloreto), e  $\Delta\Phi$  a média da tensão que efetivamente atravessa o corpo de prova durante o estado estacionário (Volt).

Para encontrar o fluxo de íons cloreto ( $J_{Cl}$ ) foi definida a inclinação da parte linear do gráfico de concentração de cloretos na célula anódica em função do tempo, obtida através das medidas de condutividade realizadas no ensaio de migração (RIBEIRO, 2018), conforme a Figura 30.



**Figura 30 - Representação gráfica para obtenção do *timelag* e do fluxo de cloretos (J)**



Fonte: Pinto, 2016

O fluxo é representado pela equação 13 abaixo.

$$J_{Cl} = \frac{V}{A} \cdot \frac{dC}{dt} \quad (13)$$

Onde,  $A$  é a área da seção exposta do corpo de prova ( $\text{cm}^2$ ),  $V$  o volume da célula catódica ( $\text{cm}^3$ ), e  $dC/dt$  é a inclinação da parte linear do gráfico de concentração de cloretos em função do tempo.

Para encontrar o coeficiente de difusão no estado não estacionário ( $D_{ns}$ ), foi utilizada a equação 14 proposta por Alonso, Andrade e Castellote (2001), a qual relaciona implicitamente o tempo que os íons cloreto levariam para atingir, no ensaio de difusão natural, a mesma profundidade obtida no ensaio de migração acelerada.

$$D_{ns} = \frac{2l^2}{\tau v^2} \cdot \left[ \left[ v \cdot \coth \frac{v}{2} - 2 \right] \right], \text{ onde } v = \frac{ze\Delta\Phi}{kT} \quad (14)$$

Onde  $\tau$  é o *time lag* do ensaio de migração (s),  $k$  a constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$ ),  $T$  a temperatura (K), e a carga do elétron ( $1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ ),  $z$  (1), e  $\Delta\Phi$  a média da tensão que efetivamente atravessa o corpo de prova durante o estado não estacionário (Volt).

Para facilitar o entendimento dos valores dos coeficientes de difusão de cada traço, foi realizada uma estimativa da vida útil de cada traço, através do método indicado por Ribeiro (2018), que utiliza a segunda lei da difusão de Fick, representada nas equações 15 e 16.

$$PC = 2(z)\sqrt{D_{ns} \cdot t} \quad (15)$$

$$\text{erf}(z) = 1 - \frac{C_{cl} - C_o}{C_s - C_o} \quad (16)$$

Onde  $PC$  (cm), representa a profundidade em que a concentração de cloretos atinge o limite para a ocorrência da despassivação da armadura,  $D_{ns}$  é o coeficiente de difusão no estado não estacionário ( $\text{cm}^2/\text{ano}$ ),  $t$  é o tempo de vida útil (anos),  $\text{erf}(z)$  é a função Gaussiana de erros,  $C_s$  é a concentração superficial de cloretos (%), e  $C_{cl}$  é a concentração de cloretos em função da profundidade e do tempo, em relação a massa de cimento (%) e  $C_o$  é a concentração inicial de cloretos (%).

Utilizando os mesmos valores adotados por Ribeiro, Labrincha e Morelli (2011) e Medeiro e Helene (2009), o valor adotado para  $C_s$  foi de 1,8%, para  $C_o$  foi 0% e para  $C_{cl}$  foi de 0,4%, ou seja, quando a concentração de cloretos atingir 0,4% em relação a massa de cimento na região da armadura, considera-se o início da sua despassivação. Segundo a classificação de GjØrv (2009), para a estimativa da concentração superficial de cloretos em estruturas de concreto em ambientes marinhos severos, a concentração superficial utilizada neste trabalho seria uma concentração moderada. O valor de  $PC$  utilizado nos cálculos foi de 50mm, obedecendo ao prescrito pela NBR 6118 (ABNT, 2014), para o elemento viga/pilar exposto à uma classe de agressividade ambiental muito forte (IV).

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Serão apresentados a seguir, os resultados dos ensaios de caracterização do concreto no estado endurecido, para então analisar a influência dos agregados nas propriedades relacionadas a durabilidade de estruturas de concreto armado através do coeficiente de difusão.

### 4.1 Absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto

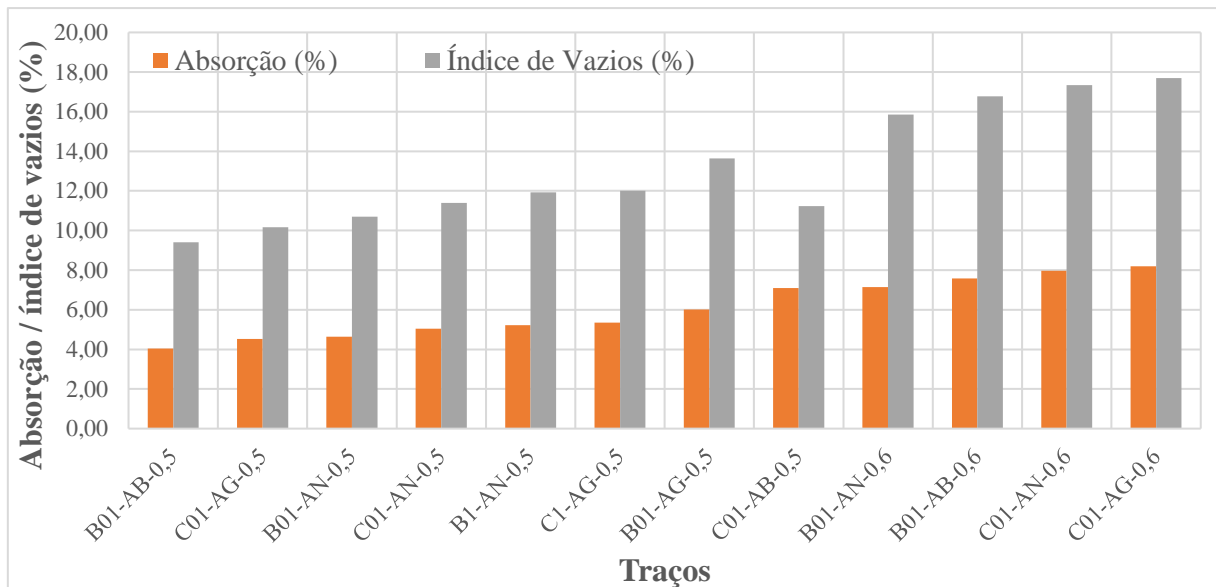
Os resultados da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica estão apresentados na Tabela 28, relacionando a média dos valores das duas amostras analisadas em função dos diferentes traços. Como esperado, os traços elaborados com relação a/c de 0,60 mostraram os maiores valores de absorção de água e de índice de vazios no concreto, independentemente do tipo de agregado quando comparado aos traços com relação a/c de 0,50.

**Tabela 28 - Resultados de absorção, índice de vazios e massa específica do concreto**

Traço	Idade	Absorção (%)	Índice de Vazios (%)	Massa Específica Seca (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Específica Saturada (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Específica Real (g/cm <sup>3</sup> )
<b>C01-AG-0,6</b>	28	8,20	17,70	2,16	2,34	2,62
<b>C01-AN-0,6</b>	28	7,97	17,33	2,17	2,35	2,63
<b>B01-AB-0,6</b>	29	7,58	16,78	2,21	2,38	2,66
<b>B01-AN-0,6</b>	29	7,15	15,85	2,22	2,38	2,64
<b>C01-AB-0,5</b>	28	7,10	11,23	2,23	2,39	2,65
<b>B01-AG-0,5</b>	29	6,02	13,63	2,27	2,40	2,62
<b>C1-AG-0,5</b>	30	5,34	12,01	2,25	2,37	2,55
<b>B1-AN-0,5</b>	31	5,21	11,93	2,29	2,41	2,60
<b>C01-AN-0,5</b>	27	5,04	11,39	2,26	2,37	2,55
<b>B01-AN-0,5</b>	29	4,64	10,70	2,30	2,41	2,58
<b>C01-AG-0,5</b>	27	4,52	10,17	2,25	2,35	2,50
<b>B01-AB-0,5</b>	26	4,04	9,41	2,33	2,42	2,57

Fonte: Autor, 2020

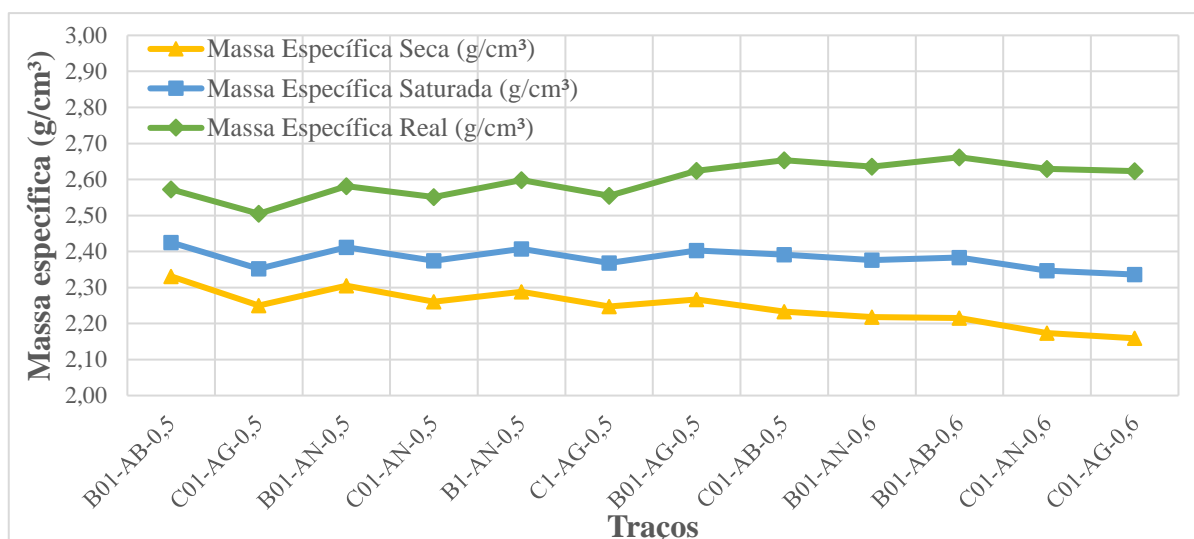
Para melhor visualização dos resultados obtidos, a Figura 31, apresenta graficamente os resultados médios obtidos, para os parâmetros de absorção e índice de vazios. Quando se analisa a influência do agregado graúdo na absorção dos traços com fator a/c de 0,60, é possível verificar que o concreto com agregado de calcário resultou na maior absorção de água e índice de vazios. Já quanto aos agregados miúdos, nos concretos de relação a/c 0,60, a areia natural apresentou menor valores de absorção e índice de vazios. Esta constatação é explicada devido a maior interconexão dos poros capilares nos concretos de relação a/c 0,60.

**Figura 31 - Resultados de absorção de água e índice de vazios do concreto**

Fonte: Autor, 2020

Nos traços de relação a/c de 0,50 os resultados de absorção e índice de vazios considerando o tipo de agregado graúdo e miúdo, não tiveram diferenças claras. Quando comparada a influência da granulometria do agregado graúdo, percebeu-se que as misturas com granulometria menos compacta (apenas brita 1) apresentam valores maiores de absorção e índice de vazios.

Os resultados gráficos de massa específica, Figura 32, comprovam que os traços com maior absorção e índice de vazios foram os que tiveram menor massa específica seca, devido a maior porosidade e consequente evaporação de água.

**Figura 32 - Resultados de massa específica do concreto**

Fonte: Autor, 2020

## 4.2 Resistência do concreto à Compressão Axial

Através do ensaio de compressão foi possível comparar a resistência à compressão axial dos traços com seus respectivos coeficientes de difusão, no sentido de verificar a influência que os agregados tiveram. A Tabela 29 mostra os resultados de resistência média obtidos.

**Tabela 29 - Resultados de resistência à compressão axial do concreto**

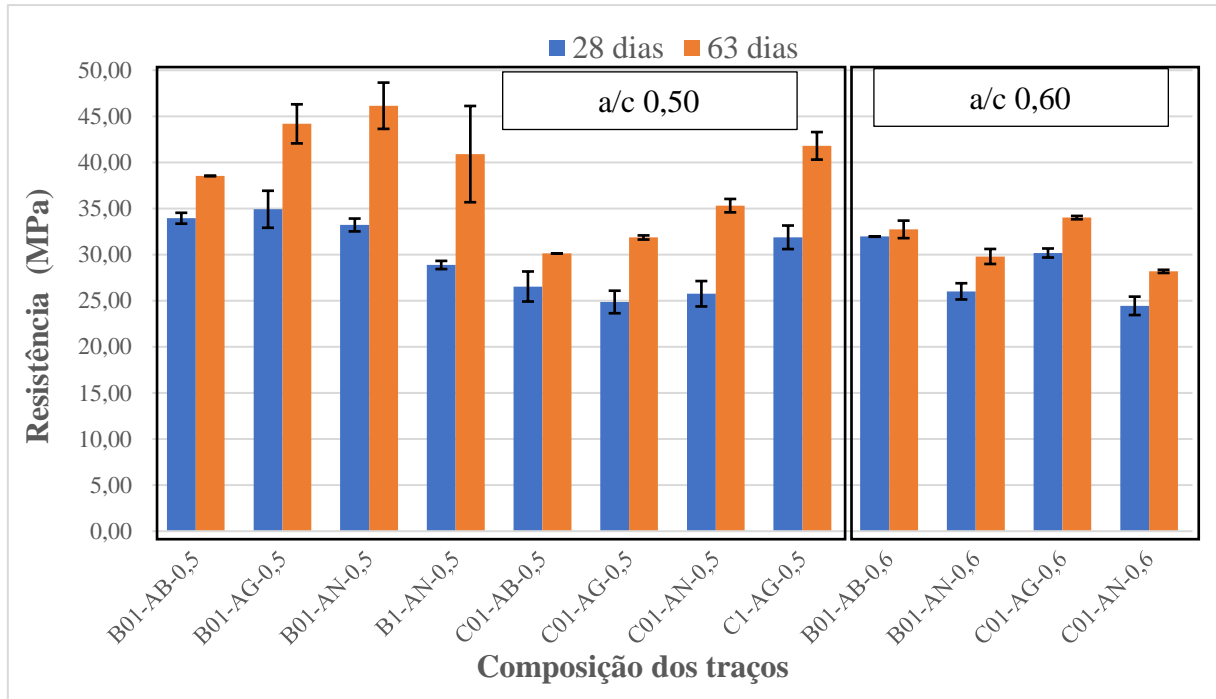
Idade	28 dias			63 dias		
	Resistência Média (MPa)	S <sub>e</sub> (Mpa)	CV <sub>e</sub> (%)	Resistência Média (MPa)	S <sub>e</sub> (Mpa)	CV <sub>e</sub> (%)
B1-AN-0,5	28,88	0,44	1,53%	40,91	5,22	12,77%
B01-AN-0,5	33,22	0,70	2,10%	46,15	2,51	5,44%
B01-AG-0,5	34,92	2,01	5,75%	44,19	2,12	4,80%
B01-AB-0,5	33,95	0,59	1,74%	38,53*	-	-
B01-AN-0,6	26,02	0,88	3,38%	29,80	0,82	2,74%
B01-AB-0,6	31,96	0,02	0,06%	32,74	0,95	2,90%
C1-AG-0,5	31,88	1,28	4,00%	41,80	1,49	3,58%
C01-AN-0,5	25,76	1,38	5,34%	35,31	0,73	2,06%
C01-AG-0,5	24,86	1,22	4,92%	31,86	0,22	0,70%
C01-AB-0,5	26,54	1,63	6,14%	30,13*	-	-
C01-AN-0,6	24,45	1,00	4,08%	28,18	0,17	0,61%
C01-AG-0,6	30,18	0,49	1,62%	34,02	0,18	0,54%

\* Valor estimado segundo o item 12.3.3 da NBR 6118 (ABNT, 2014), pois não foi possível obter resultados através de ensaios aos 63 dias nestes traços

Fonte: Autor, 2020

Para melhor visualização dos resultados, a Figura 33, apresenta graficamente os resultados médios obtidos com o respectivo desvio padrão.

**Figura 33 - Resultados de resistência à compressão axial do concreto**



Fonte: Autor, 2020

Analisando os resultados, é possível constatar que os traços com relação a/c de 0,60 não obtiveram ganho de resistência expressivos dos 28 aos 63 dias, em relação aos traços com menor relação a/c. Também é visível que alguns traços com relação a/c de 0,50 obtiveram valores de resistência menores do que o esperado, e isso pode ter ocorrido devido a falhas no adensamento e empacotamento dos grãos, já que os agregados miúdos artificiais diminuíram a trabalhabilidade e as dosagens de aditivo tiveram que ser maiores, chegando próximo a segregação (no caso do aditivo RA2), e um leve retardo de pega (no caso do aditivo RA1). Por esse motivo os resultados de resistência dos traços de calcário com areia artificial de granito e basalto devem ser interpretados com cuidado.

Uma tendência geral, foi de resultados menores de resistência para os traços com agregado graúdo de calcário, e isso é explicado pela menor resistência a compressão e módulo de elasticidade desse tipo de rocha, quando comparado ao basalto. Isso ficou evidente através da análise visual dos CPs de calcário após rompidos, visto que apresentavam agregados graúdos fraturados.

Com relação ao agregado miúdo, os traços com areia artificial possuem uma tendência de absorver uma maior quantidade de água da mistura, devido a sua maior área específica, e com isso possibilitaram a obtenção dos traços mais resistentes analisados.

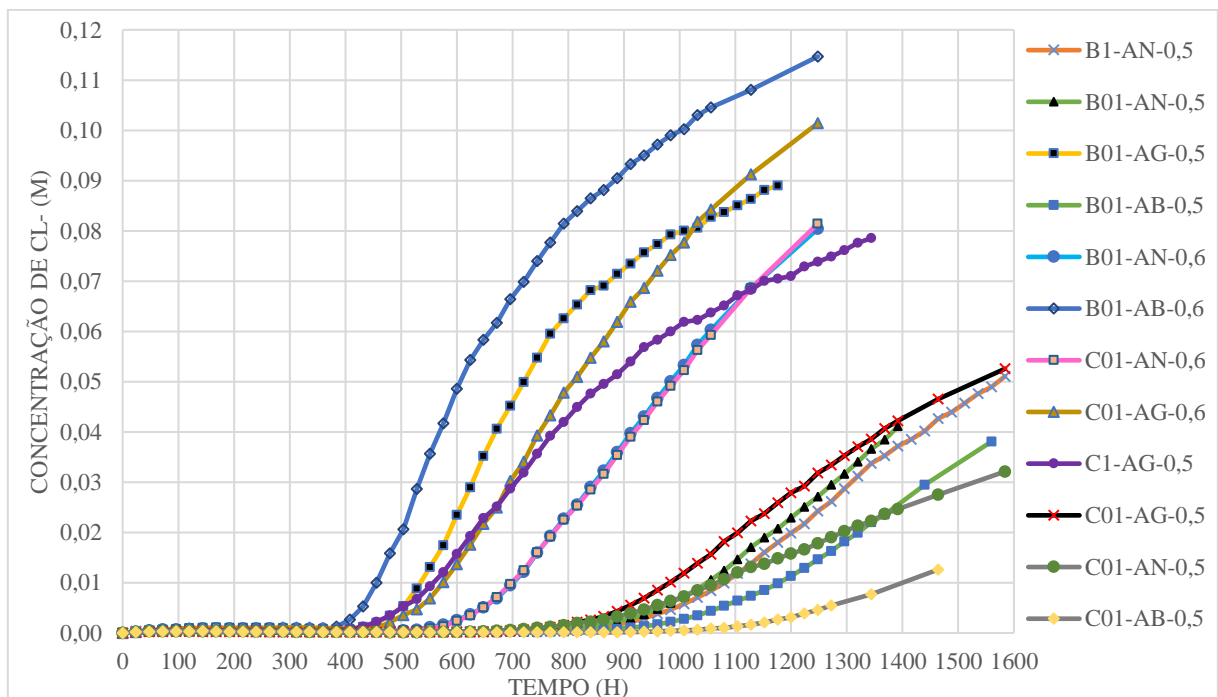
Quando se compara a granulometria do agregado graúdo, é possível observar que o traço que continha apenas brita 1 de basalto teve resistências inferiores ao mesmo traço, porém com brita 0 e 1 (granulometria compacta). Essa tendência é contrária no caso da brita de calcário, pois ocorreram problemas na pega e adensamento do traço C01-AG-0,5.

Por fim, é visível que os agregados, com suas diferentes composições mineralógicas, formas dos grãos e granulometria, afetam diretamente os resultados de resistência do concreto.

### 4.3 Migração de cloretos

Devido ao tempo limitado disponível para realização do ensaio de migração, duas amostras não iniciaram completamente a difusão no estado estacionário, contudo já foi possível estimar o *timelag* e o coeficiente de difusão de todos os traços analisados. Na Figura 34 são apresentados os resultados médios da evolução da concentração de cloretos na solução da célula anódica de cada traço. Houve pequenas diferenças no *timelag* de duas amostras do mesmo traço, devido a diferença de espessura das amostras. Em geral o fluxo de cloretos no estado estacionário se mostrou muito semelhante nas 2 amostras de cada traço, indicando uma baixa variação dos coeficientes de difusão calculados para um mesmo traço.

**Figura 34 - Evolução da concentração de Cl<sup>-</sup> na célula anódica durante o ensaio de migração**



Fonte: Autor, 2020

Para facilitar a visualização do comportamento de cada traço no ensaio de migração de cloretos, foi calculado a média dos valores de *timelag*, fluxo de cloretos, e coeficientes de difusão no estado estacionário e não estacionário das amostras, conforme mostrado na Tabela 30.

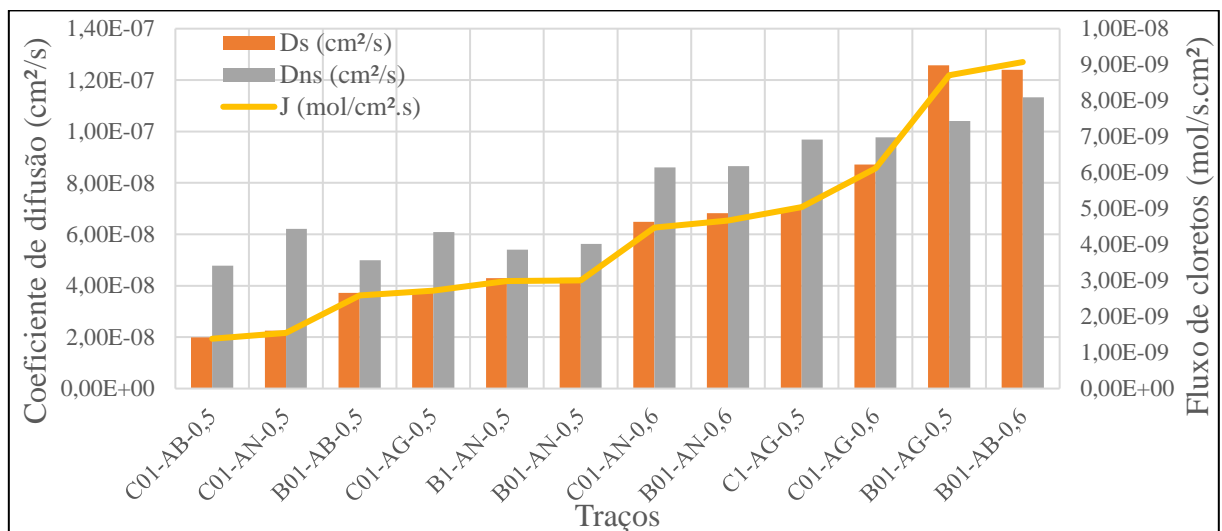
**Tabela 30 - Resultados do ensaio de migração de cloretos**

Traço	J (mol/cm <sup>2</sup> .s)	Ds (cm <sup>2</sup> /s)	Dns (cm <sup>2</sup> /s)	Timelag (h)
C01-AB-0,5	1,38E-09	1,99E-08	4,78E-08	1123,66
B01-AB-0,5	2,59E-09	3,72E-08	4,99E-08	1062,07
B1-AN-0,5	2,99E-09	4,30E-08	5,40E-08	977,67
B01-AN-0,5	3,01E-09	4,31E-08	5,63E-08	940,85
C01-AG-0,5	2,72E-09	3,84E-08	6,09E-08	860,19
C01-AN-0,5	1,55E-09	2,25E-08	6,21E-08	885,08
C01-AN-0,6	4,47E-09	6,48E-08	8,60E-08	625,30
B01-AN-0,6	4,67E-09	6,83E-08	8,65E-08	631,20
C1-AG-0,5	5,04E-09	6,96E-08	9,68E-08	508,59
C01-AG-0,6	6,12E-09	8,71E-08	9,77E-08	530,55
B01-AG-0,5	8,70E-09	1,26E-07	1,04E-07	516,52
B01-AB-0,6	9,07E-09	1,24E-07	1,13E-07	421,59

Fonte: Autor, 2020

A Figura 35 mostra a excelente relação entre o fluxo de cloretos e o coeficiente de difusão no estado estacionário (Ds). É possível visualizar que um aumento no coeficiente de difusão estacionário não é proporcional a um aumento no coeficiente de difusão no estado não estacionário (Dns).

**Figura 35 - Coeficientes de difusão e fluxo de cloretos**

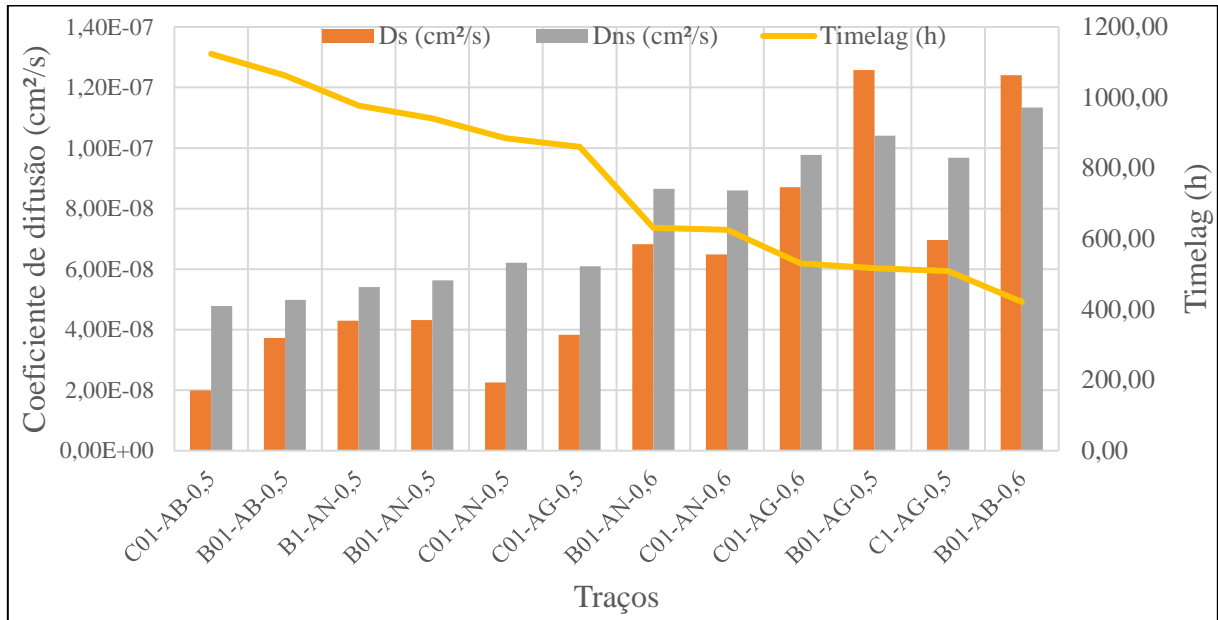


Fonte: Autor, 2020



Através da Figura 36, é possível observar a relação inversamente proporcional existente entre o *timelag* e o coeficiente de difusão não estacionário ( $D_{ns}$ ) dos traços analisados.

**Figura 36 - Relação entre os coeficientes de difusão e o Timelag**



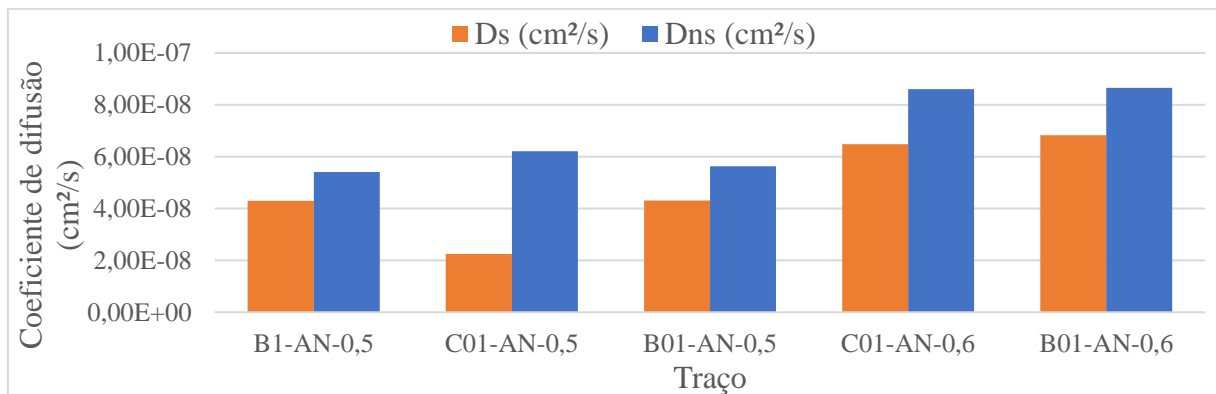
Fonte: Autor, 2020

Para evidenciar a influência que os agregados tiveram nas propriedades de transporte de íons cloretos através das fatias de concreto, a análise foi separada de acordo com o tipo de agregado graúdo e miúdo, conforme os itens abaixo.

#### 4.3.1 Influência dos agregados graúdos

A diferença nos coeficientes de difusão para os concretos com relação  $a/c$  de 0,60, em que se variou apenas o tipo de brita, foi praticamente nula. Nos concretos com relação  $a/c$  de 0,50 as variações devidas à mudança de agregado graúdo foram um pouco maiores. Os traços B01-AN-0,5 e C01-AN-0,5 obtiveram valores semelhantes de  $D_{ns}$ , porém os valores de  $D_s$  variaram em quase 100%, indicando um maior fluxo de cloretos no traço de basalto. Quando se compara a influência da granulometria do agregado graúdo, é possível visualizar que praticamente não houve mudança nos coeficientes de difusão dos traços B1-AN-0,5 e B01-AN-0,5. Os resultados dos coeficientes de difusão dos traços contendo areia natural são apresentados na Figura 37.

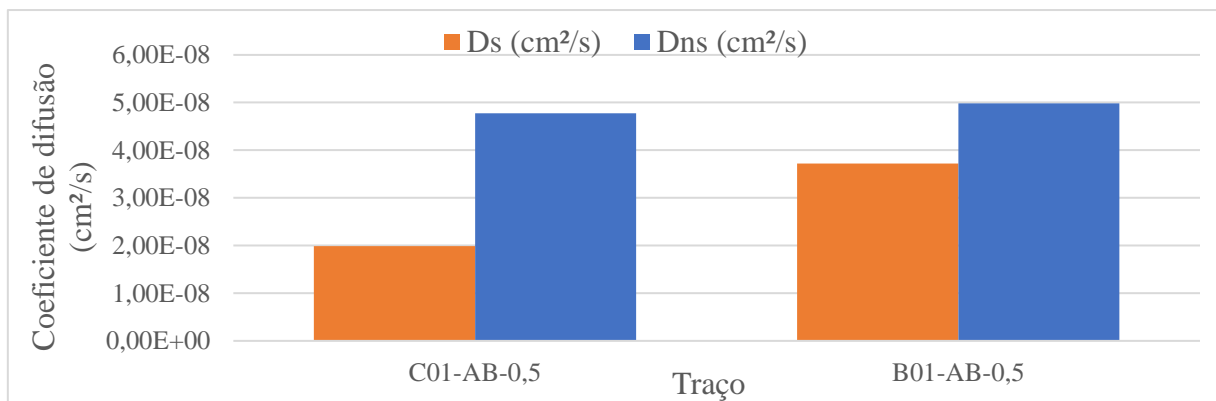
**Figura 37 - Comparação dos coeficientes de difusão dos traços com areia natural**



Fonte: Autor, 2020

Ao comparar os traços com agregado miúdo de basalto, foi verificado que o agregado graúdo exerceu pouca influência nos coeficientes de difusão, assim como nas misturas de areia natural. A Figura 38 apresenta tais resultados.

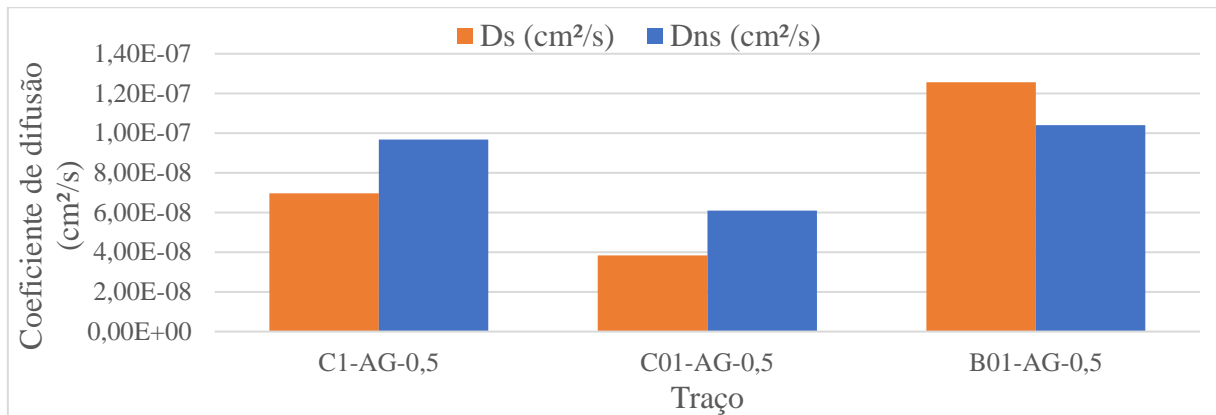
**Figura 38 - -Comparação dos coeficientes de difusão dos traços com areia artificial de basalto**



Fonte: Autor, 2020

Conforme a Figura 39, nas misturas com areia industrial de granito, a variação dos coeficientes de difusão conforme o tipo de brita foi expressiva. Porém ressalta-se que esses valores não necessariamente têm relação com o agregado graúdo, já que podem ter ocorrido diferenças de moldagem, e conseqüentemente de porosidade do concreto.

**Figura 39 - Comparação dos coeficientes de difusão dos traços com areia artificial de granito**

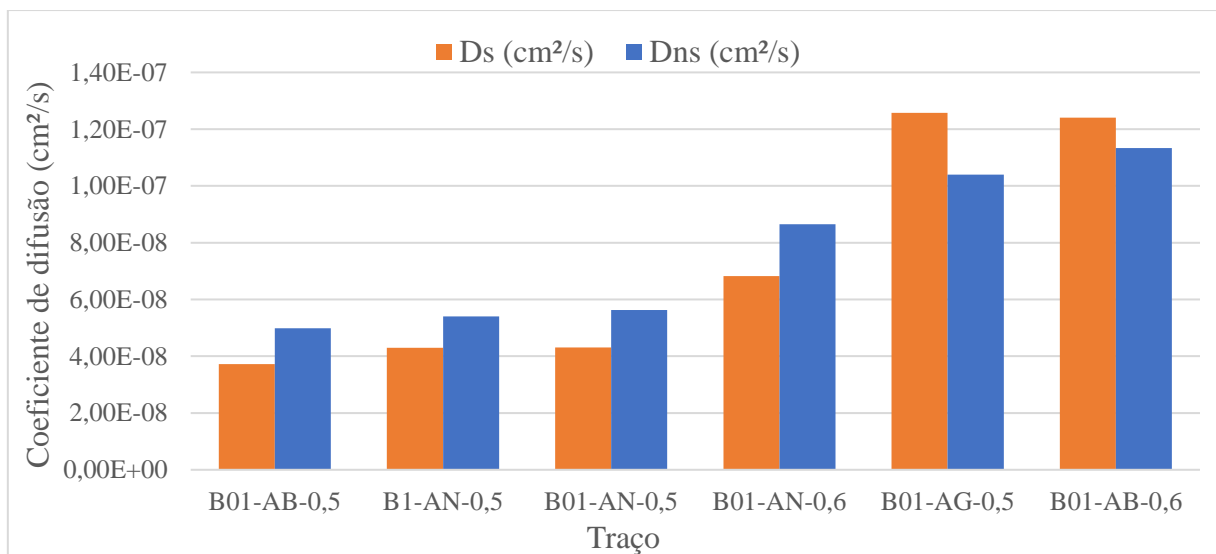


Fonte: Autor, 2020

#### 4.3.2 Influência dos agregados miúdos

Fixando o agregado graúdo de basalto pode-se verificar a influência do tipo de areia utilizado nas misturas, conforme a Figura 40. A areia natural apresentou os melhores resultados, enquanto a areia artificial de granito mostrou resultados preocupantes, já que teve coeficientes de difusão mais do que dobrados em relação aos traços de mesmo fator a/c. O resultado insatisfatório da areia de granito foi obtido nas duas amostras analisadas.

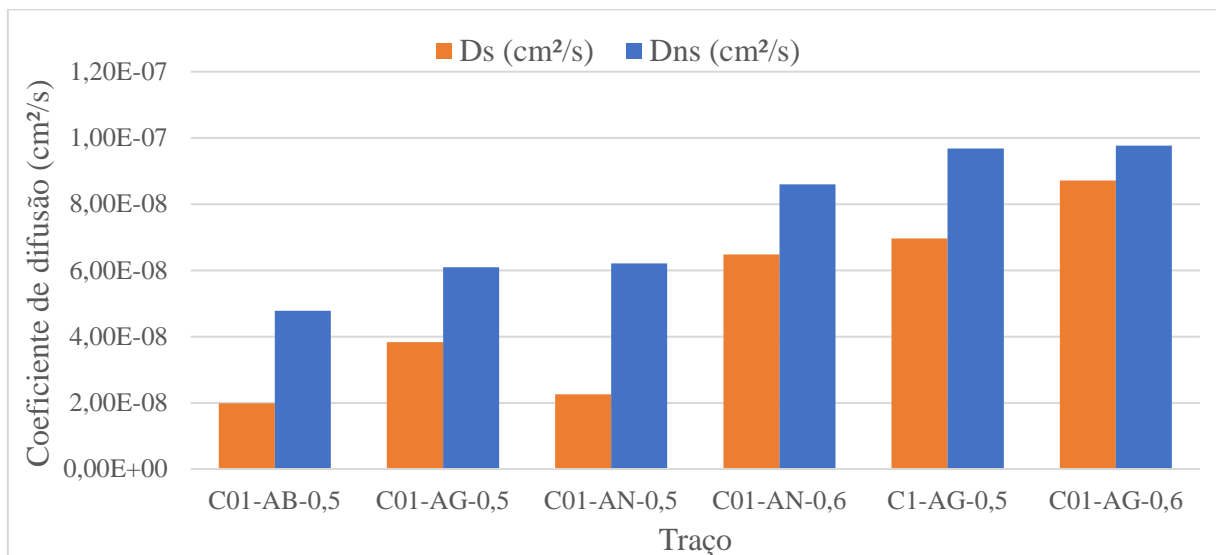
**Figura 40- Comparação dos coeficientes de difusão dos traços com brita de basalto**



Fonte: Autor, 2020

Fixando o agregado graúdo de calcário pode-se verificar a influência do tipo de areia utilizado nas misturas, conforme a Figura 41. A areia natural e a artificial de basalto apresentaram resultados semelhante, enquanto a areia artificial de granito mostrou novamente resultados preocupantes, já que teve coeficientes de difusão muito superiores em relação aos traços de mesmo fator a/c. O resultado insatisfatório da areia de granito foi obtido nas duas amostras analisadas.

**Figura 41- Comparação dos coeficientes de difusão dos traços com brita de calcário**



Fonte: Autor, 2020

Fica claro que a areia artificial de granito afetou os resultados dos coeficientes de difusão de cloretos, porém não foi possível descobrir ao certo a origem de tal resultado. Algumas hipóteses são feitas sobre a possível causa de um desempenho muito baixo da areia artificial de granito, sendo elas:

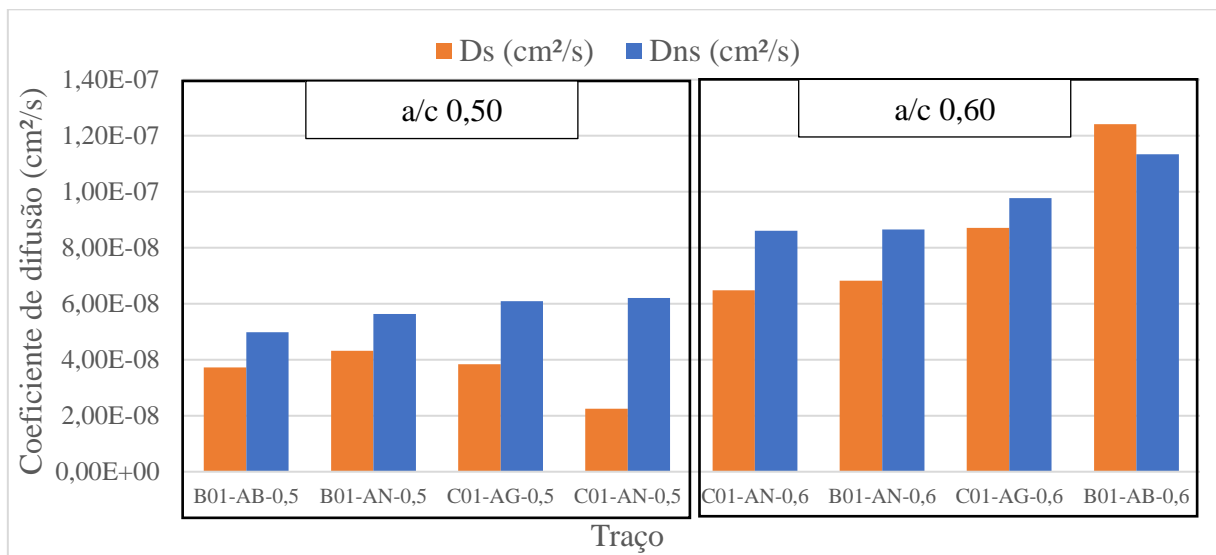
- Poderiam existir impurezas no agregado utilizado que afetaram a microestrutura do concreto, principalmente na zona de transição pasta-agregado.
- O agregado pode ter sofrido alguma reação química ou eletroquímica durante a execução do ensaio de migração de cloretos.
- A composição mineralógica do agregado pode ter afetado o processo de difusão de íons através de reações químicas com os constituintes do cimento.

Devido aos bons resultados de resistência a compressão axial nos traços elaborados com a areia artificial de granito, descarta-se a possibilidade de porosidade excessiva nas misturas, que poderia ter ocorrido devido a falhas na moldagem, água em excesso na mistura e problemas devido a utilização do aditivo.

### 4.3.3 Influência da relação água/cimento

Na Figura 42 é possível visualizar a influência da relação a/c nos coeficientes de difusão do concreto. Um concreto com relação a/c maior tende a maiores valores de coeficientes de difusão, devido a sua maior porosidade e interconexão dos poros, o que facilita o fluxo de íons cloreto.

**Figura 42 - Influência da relação a/c no coeficiente de difusão**

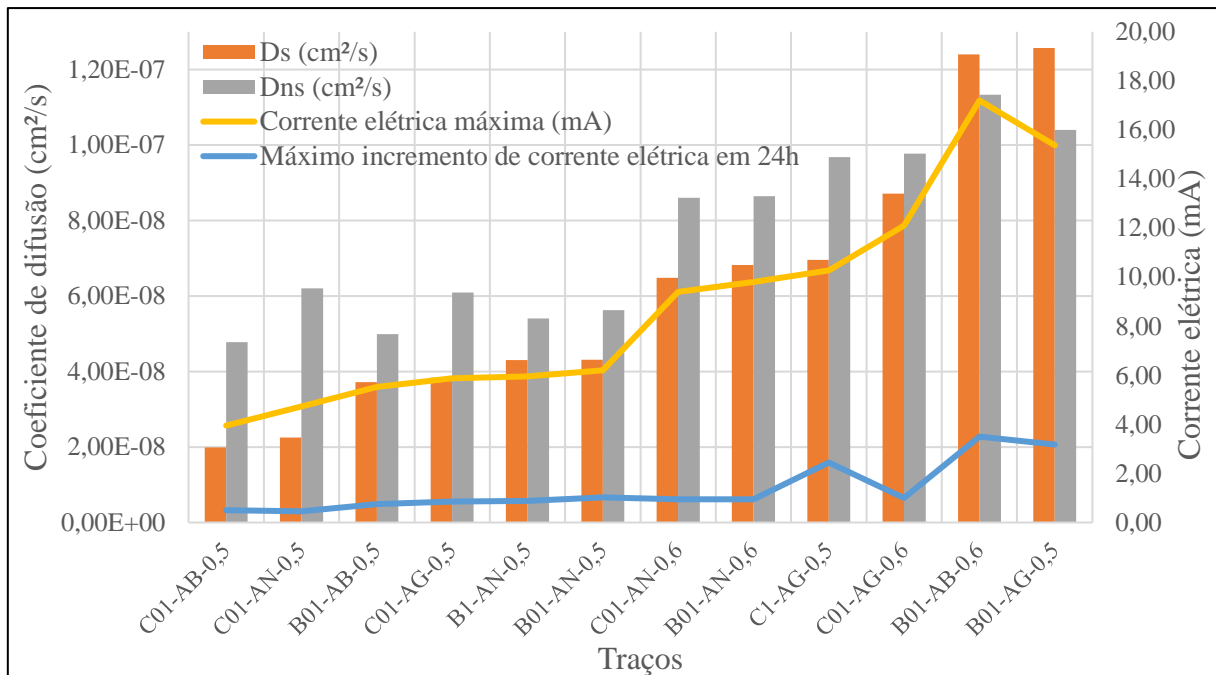


Fonte: Autor, 2020

### 4.3.4 Relação entre a corrente elétrica e os parâmetros de difusividade do concreto

Analisando os dados obtidos através das medições diárias de corrente elétrica passante nos aparatos de ensaio, foi possível observar a excelente correlação existente entre o coeficiente de difusão estacionário e a corrente elétrica máxima (pico) durante todo o ensaio. A máxima diferença positiva de corrente elétrica entre duas medições sucessivas (24h) também foi analisada, porém mesmo apresentando uma correlação significativa com o coeficiente de difusão estacionário, não se mostrou tão confiável e precisa como o pico de corrente durante todo o ensaio. Esses resultados são apresentados na Figura 43.

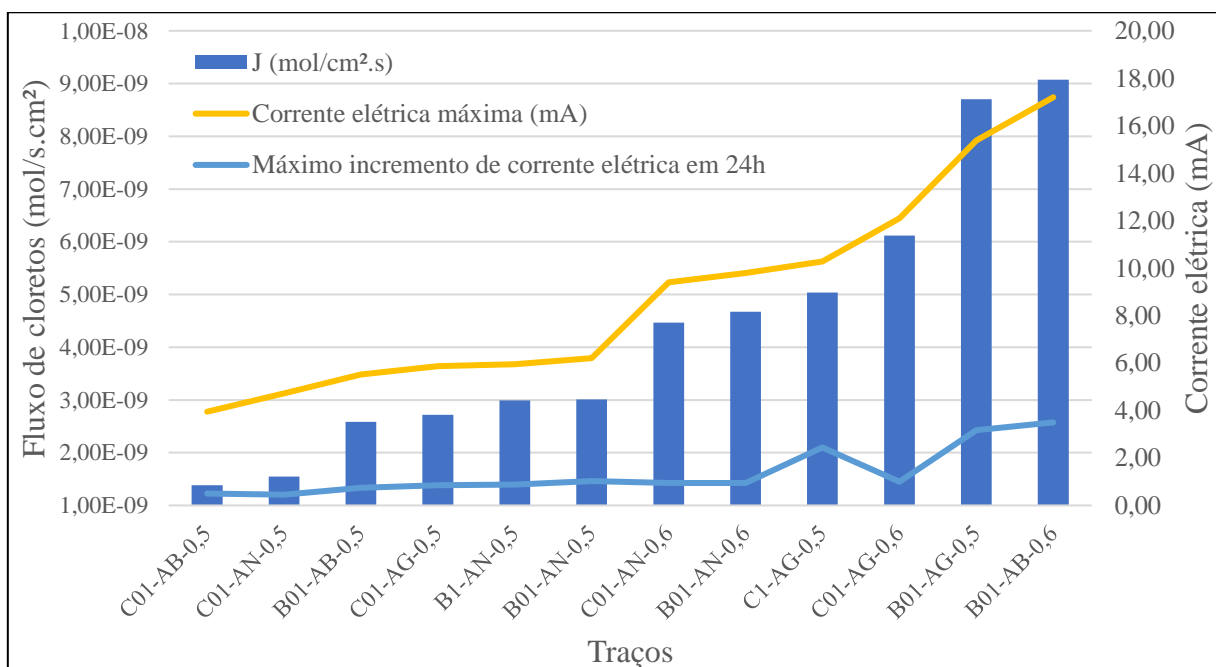
**Figura 43 – Coeficientes de difusão VS Corrente elétrica**



Fonte: Autor, 2020

Ao se comparar o pico de corrente obtido no ensaio com o fluxo de cloretos no estado estacionário, é possível observar que há uma correlação melhor ainda. Como o coeficiente de difusão estacionário depende de fluxo de cloretos, ambos parâmetros estão relacionados. A Figura 44 mostra tal relação.

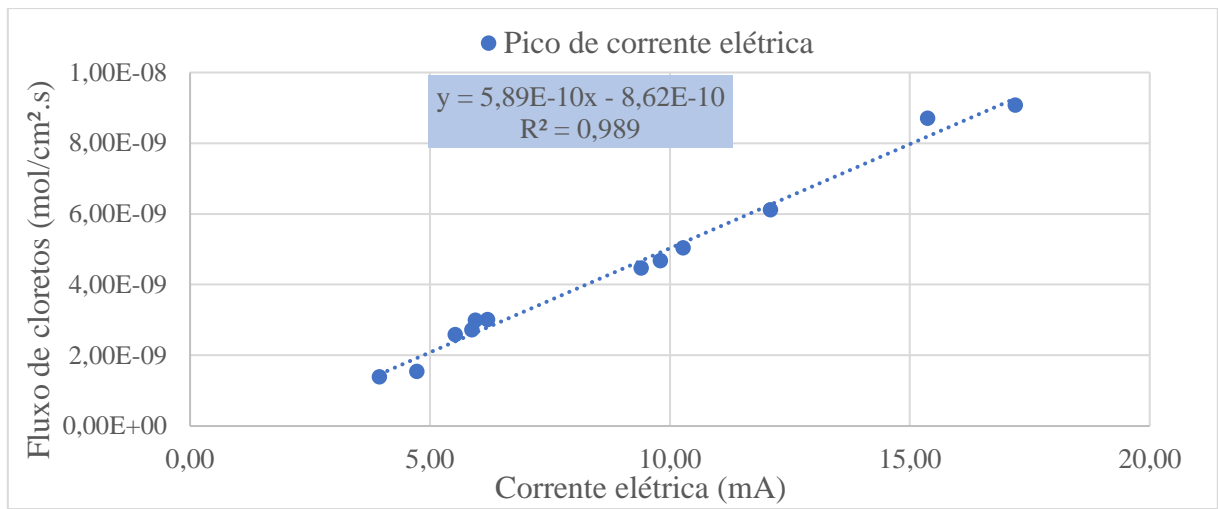
**Figura 44 - Fluxo de cloretos VS Corrente elétrica**



Fonte: Autor, 2020

Através dos dados de fluxo de cloretos médio de cada traço e seu pico de corrente médio, obteve-se a reta de correlação linear mostrada na Figura 45. Como o fluxo de íons no concreto está relacionado à dificuldade com que os íons se movem da solução catódica para a anódica, há também uma maior facilidade de passagem de corrente elétrica nos concretos mais porosos, e isso é demonstrado com a excelente correlação obtida.

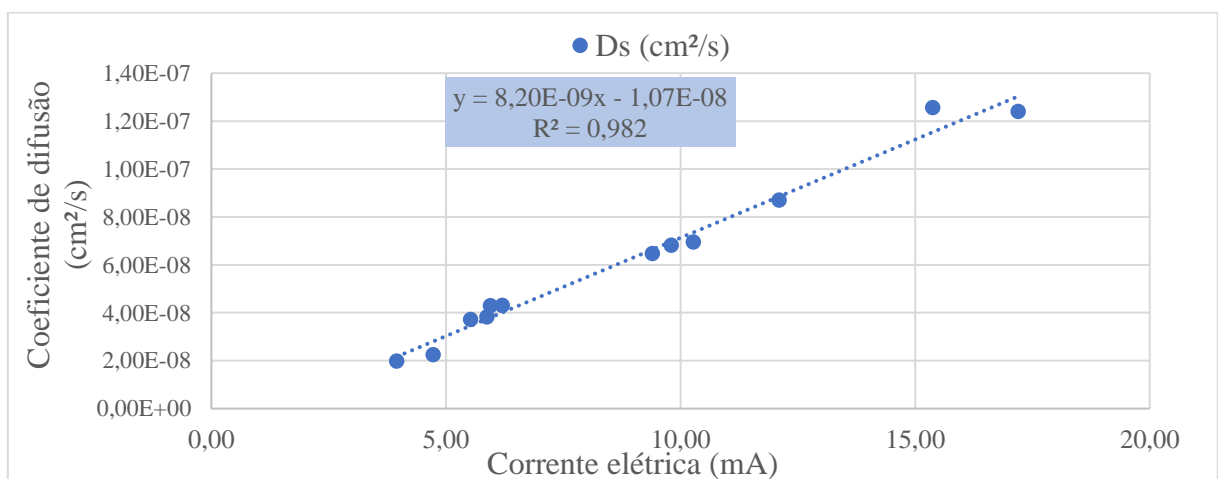
**Figura 45 -Correlação entre o fluxo de cloretos e o pico de corrente elétrica**



Fonte: Autor, 2020

Como o coeficiente de difusão estacionário depende do fluxo de cloretos, ambos parâmetros estão relacionados entre si, portanto, a corrente elétrica que atravessa a amostra também tem boa relação com o coeficiente de difusão não estacionário, conforme apresentado na Figura 46.

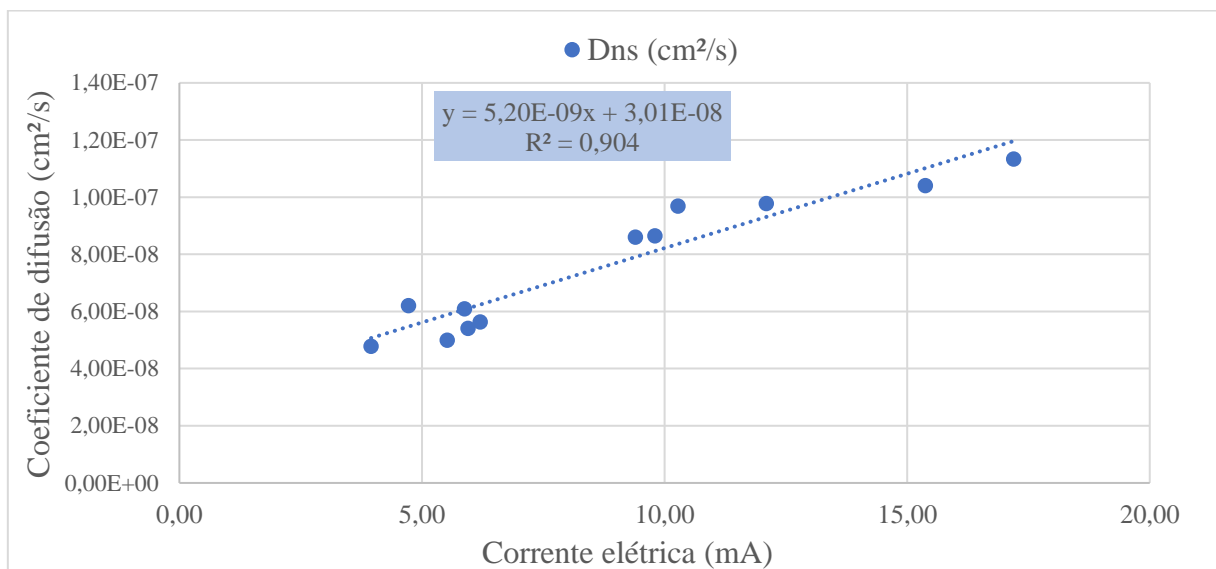
**Figura 46 -Correlação entre o coeficiente de difusão estacionário e o pico de corrente elétrica**



Fonte: Autor, 2020

Quando comparamos a corrente elétrica máxima no ensaio com o coeficiente de difusão no regime não estacionário, a correlação existente diminui um pouco em relação às comparações anteriores, conforme a Figura 47. Isso porque o coeficiente de difusão no regime não estacionário está relacionado com o *timelag* das amostras, portanto, é influenciado pela capacidade de cada amostra de fixar cloretos através do C<sub>3</sub>A do cimento, e pela espessura da amostra.

**Figura 47 - Correlação entre o coeficiente de difusão não estacionário e o pico de corrente elétrica**



Fonte: Autor, 2020

Um estudo de Medeiros-Junior e Lima (2014) com vários tipos de cimento, também mostrou bons resultados de correlação linear entre o coeficiente de difusão estacionário e o pico de corrente elétrica ( $R^2 = 0,83$ ). Segundo Medeiros-Junior e Lima (2014), em concretos de maior relação a/c, os íons estão mais dissolvidos, o que favorece a mobilidade iônica da solução, e contribui para um maior pico de corrente elétrica em concretos com maior relação a/c.

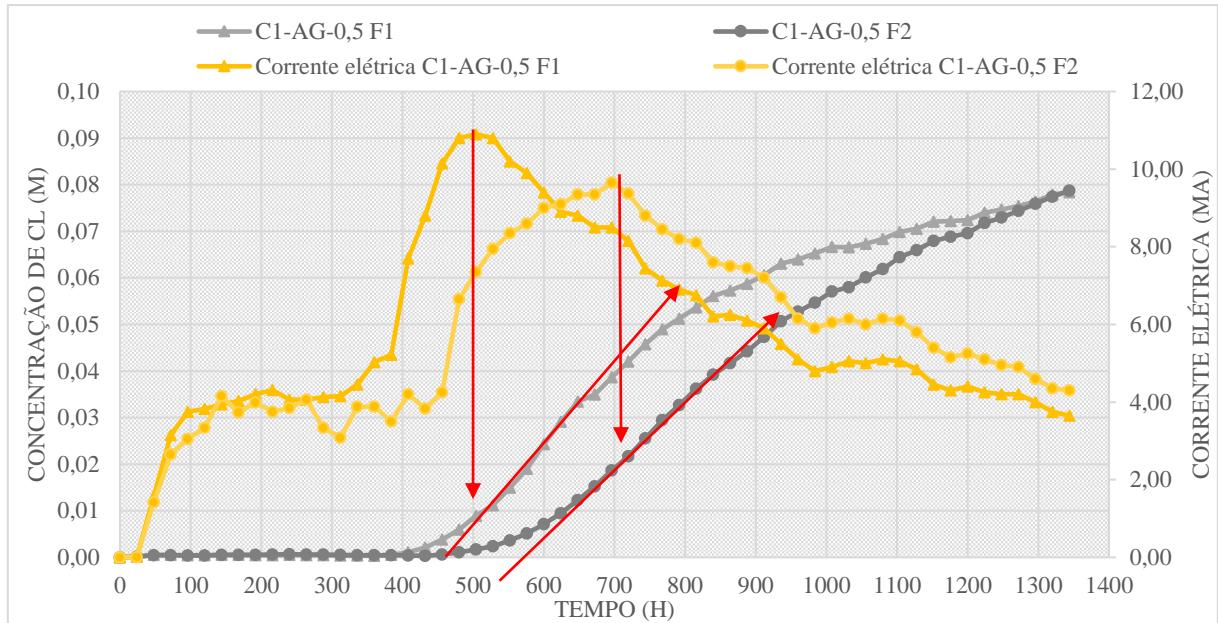
Essa mesma tendência também foi verificada nos traços do estudo que tinham maior relação a/c, com exceção dos traços que continham o agregado miúdo artificial de granito.

Santos (2006) também verificou que a intensidade da corrente elétrica que atravessa a amostra de concreto está relacionada com a quantidade de íons que migram para o compartimento anódico.

A Figura 48 mostra a evolução da corrente elétrica e da concentração de cloretos nas duas amostras ensaiadas do traço C1-AG-0,5. É possível observar que o pico de corrente elétrica acontece no período de fluxo constante de cloretos, ou seja, no estado estacionário da difusão.



**Figura 48 - Evolução da corrente elétrica e concentração de cloretos**

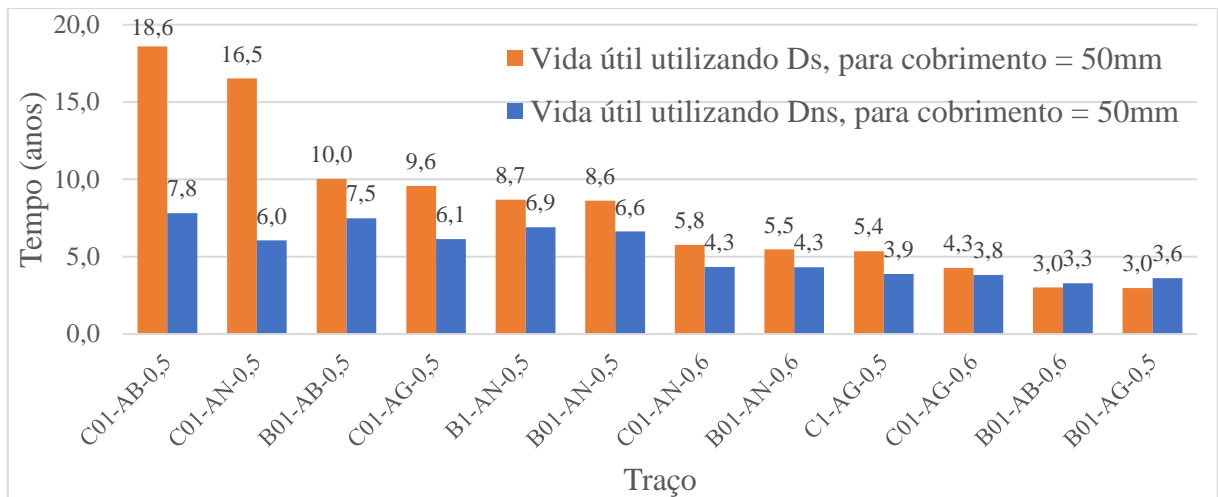


Os gráficos de evolução da concentração de cloretos VS corrente elétrica, de cada amostra analisada, são apresentados no APÊNDICE B.

**4.3.5 Estimativa de vida útil**

Os resultados estimados de vida útil dos traços, apresentados na Figura 49, foram elaborados utilizando-se o coeficiente de difusão não estacionário conforme proposto na metodologia, e o estacionário, para fins de comparação.

**Figura 49 - Vida útil estimada através dos coeficientes de difusão**



Observa-se que os traços com menor relação a/c obtiveram maiores resultados de vida útil, com exceção dos traços confeccionados com areia industrial de granito, que não seguiram esta tendência.

Os traços C01-AB-0,5 e C01-AN-0,5, obtiveram um fluxo de cloretos muito menor do que os demais, portanto, quando a vida útil foi calculada com o coeficiente de difusão no regime estacionário, eles obtiveram resultados de vida útil muito mais elevados. Isso pode ser devido à uma maior tortuosidade e refinamento dos poros da matriz cimentícia, resultante de um bom empacotamento dos agregados e baixa relação a/c.

Os melhores resultados de vida útil (utilizando o  $D_s$ ) quando comparados os tipos de areia, foram dos traços confeccionados com areia artificial de basalto, seguidos da areia natural e areia artificial de granito.

A areia de Basalto influenciou a quantidade de água disponível na mistura, devido a sua maior finura, textura áspera e material pulverulento, tornando o concreto menos poroso, e resultando nos maiores valores de vida útil, apesar de ter piorado a trabalhabilidade da mistura.

A areia Natural, facilitou a moldagem devido a excelente trabalhabilidade resultante da sua forma arredondada dos grãos e textura lisa, sendo positivo para uma boa compactação, mesmo sem ter reduzido a relação a/c.

A areia artificial de Granito mostrou resultados baixos de vida útil, apesar de ter apresentado bons resultados de resistência, inclusive superiores à areia natural. A causa exata desse resultado inferior de vida útil requer mais investigações, mas mostra que o agregado miúdo pode exercer grande influência na vida útil da estrutura de concreto armado.

Os resultados de vida útil (utilizando o  $D_{ns}$ ) quando comparados ao tipo de agregado graúdo, não resultaram em diferenças consideráveis, indicando pouca influência desta variável.

Cabe ressaltar que os valores obtidos possuem erros, por considerar a difusão e a concentração de cloretos no concreto como constantes, já que numa estrutura exposta a condições naturais as concentrações de cloretos, idade, temperatura e umidade podem variar consideravelmente. Portanto esses valores servem apenas para fornecer uma ideia do comportamento de cada traço referente à sua durabilidade.

Após a finalização do ensaio, as fatias de concreto foram removidas do aparato e analisadas. Constatou-se que havia um depósito, dos produtos da corrosão da barra de aço que funcionava como eletrodo positivo, na face da fatia que estava exposta à solução do compartimento anódico. O material depositado encontrava-se predominantemente na região da pasta de cimento, já que a pasta é mais permeável do que os agregados. Esse fenômeno também

foi observado por Hoffmann (2001) e Pereira (2001). As imagens das faces de algumas amostras após o ensaio de migração, constam no APÊNDICE C.

## 5 CONCLUSÕES

Os parâmetros prescritivos da norma brasileira de projeto de estruturas de concreto armado, como a relação a/c, consumo mínimo de cimento e o cobrimento mínimo, podem não ser suficientes para garantir a vida útil mínima de 50 anos, quando uma estrutura está exposta às condições severas de agressividade ambiental, como nas regiões de respingos de água do mar e zonas de maré.

Os valores de resistência a compressão do concreto, podem sugerir uma durabilidade inadequada para uma estrutura, tendo em vista que o traço B01-AG-0,5 com resistência média de 44,2 MPa aos 63 dias, obteve resultado de vida útil 16% inferior ao traço B01-AN-0,6, que tinha resistência média de 29,8 MPa aos 63 dias. Essa constatação de que o parâmetro de resistência a compressão não é adequado para estimar uma durabilidade de concretos com diferentes materiais, foi obtida também por Pereira (2001).

Devido a maior área específica dos agregados miúdos no concreto em relação aos agregados graúdos, e sabendo que as zonas de transição agregado-pasta, exercem um caminho preferencial no ingresso de íons cloreto, foi visto que os agregados miúdos podem exercer uma influência significativa no coeficiente de difusão do concreto, através dos resultados obtidos nas amostras com areia artificial de granito.

Quanto a granulometria do agregado graúdo utilizado no concreto, constatou-se que exerceu pouca influência na difusão de cloretos, chegando a mesma constatação do estudo de Lobet (2003) citado por Ollivier e Torrenti (2008).

Os traços com agregado graúdo de calcário apesar de apresentarem resistências a compressão um pouco inferiores aos traços com brita de basalto, obtiveram aproximadamente o mesmo coeficiente de difusão de cloretos. Isso também contribui para confirmar a necessidade de serem avaliados parâmetros de durabilidade, como o coeficiente de difusão, nos projetos de estruturas para zonas litorâneas, especialmente aquelas em contato com a água do mar.

A corrente elétrica passante no ensaio de migração de cloretos, é uma boa alternativa para a determinação mais simplificada do coeficiente de difusão não estacionário, evitando assim a análise periódica da concentração de cloretos na solução anódica (YANG, CHIANG e WANG, 2006). Medeiro e Lima (2009) constataram que o pico de corrente elétrica está relacionado com os coeficientes de difusão de cloretos, atentando para as condições do ensaio e os tipos de amostras analisadas. Assim como mencionado acima, o presente estudo também contactou a relação existente entre os coeficientes de difusão do concreto e o pico de corrente elétrica no

ensaio acelerado de migração de cloretos, principalmente em relação ao coeficiente de difusão no regime estacionário.

Obteve-se uma excelente correlação entre o pico de corrente elétrica e o fluxo de cloretos nos ensaios de migração nas amostras analisadas, o que indica que para um tipo conhecido de concreto, é possível que os coeficientes de difusão possam ser obtidos apenas através da corrente elétrica. Contudo, a obtenção do fluxo de cloretos ou do coeficiente de difusão do concreto, através das medidas de corrente elétrica obtidas no ensaio acelerado de migração, deve ser avaliada com precaução, já que existem muitas variáveis que podem afetar o comportamento do concreto no ensaio, como a espessura da fatia, as adições na mistura, o tipo de cimento, relação a/c, idade do concreto etc.

Apesar dos resultados do coeficiente de difusão de íons cloretos nas misturas contendo areia industrial de granito, terem sido inferiores aos outros tipos de agregados miúdos, não é correto afirmar que os agregados deste tipo de rocha apresentem problemas, pois existem inúmeras variáveis que podem ter afetado os resultados.

### **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Portanto, para melhorar a confiabilidade dos resultados de difusão de cloretos obtidos, com a finalidade de verificar qual a real influência que os agregados miúdos e graúdos podem exercer nesse parâmetro, sugere-se a realização de uma pesquisa mais aprofundada, com maior número de amostras, menos fatores que possam influenciar os resultados, e analisar amostras com mais tipos de cimento, relação a/c e idade.

Sugere-se realizar o ensaio de migração de cloretos, com a medição da concentração de cloretos no compartimento catódico (*upstream*), método proposto por Truc, Ollivier e Carcassès (2000), que segundo os autores resultará num fluxo constante e independente de interações, pois na célula anódica ocorrem reações químicas com o ânodo que são difíceis de controlar e mensurar.

Avaliar a corrente elétrica passante no ensaio de migração de cloreto em amostras com mais tipos de cimento e relação a/c, com a finalidade de propor um método de ensaio e cálculo para obtenção do coeficiente de difusão do concreto de uma maneira mais simples e rápida, atentando para a influência que os demais íons presentes no concreto podem exercer na corrente elétrica medida.

Realizar ensaios de difusão natural em elementos de concreto armado, com diferentes tipos de agregados miúdos, expostos a altas concentrações de cloretos.

Realizar ensaios de migração de cloretos acelerada em amostras de concreto com presença de carbonatação superficial.

Avaliar a resistividade superficial de concretos com diferentes tipos de agregados graúdos e miúdos.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 5738*: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

\_\_\_\_\_. *ABNT NBR 5739*: Concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

\_\_\_\_\_. *ABNT NBR 6118*: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

\_\_\_\_\_. *ABNT NBR 7211*: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. *ABNT NBR 9778*: Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. *ABNT NBR 9935*: Agregados: Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

\_\_\_\_\_. *ABNT NBR 12655*: Concreto de cimento Portland: preparo, controle, recebimento e aceitação: Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

\_\_\_\_\_. *ABNT NBR 15900-1*: Água para amassamento do concreto: Parte 1: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. *ABNT NBR 16605*: Cimento Portland e outros materiais em pó: Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

\_\_\_\_\_. *ABNT NBR 16697*: Cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

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

\_\_\_\_\_. *ABNT NBR NM 46*: Agregados: Determinação do material fino que passa através da peneira 75  $\mu\text{m}$ , por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. *ABNT NBR NM 52*: Agregado miúdo: Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. *ABNT NBR NM 53*: Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. *ABNT NBR NM 66*: Agregados: Constituintes mineralógicos dos agregados naturais: Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

\_\_\_\_\_. *ABNT NBR NM 248*: Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ALMEIDA, F.C.R.; SALES, A. Ação do meio ambiente sobre as estruturas de concreto: efeitos e considerações para projeto. In: RIBEIRO, D.V. (coord.) *et al.* Corrosão e degradação em estruturas de concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. p. 97-124, cap. 5.

AKROUT, K. *et al.* *Using limestone aggregates for enhancing resistance of mortar to chloride attack: Durability.* Advances in geomaterials and structures (AGS). p. 431-436, 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/312191860>. Acesso em: 11 maio 2020.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *ACI 318: Building code requirements for structural concrete.* Farmington Hills: ACI, 2019.

\_\_\_\_\_. *ACI 222.3R: Guide to Design and Construction Practices to Mitigate Corrosion of Reinforcement in Concrete Structures.* Farmington Hills: ACI, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C1202: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.* West Conshohocken, 2019.

ANDRADE, C. *Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements.* Cement and Concrete Research. v.23, p. 724-742, 1993. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884693900233>. Acesso em: 9 junho 2020.

ANDRADE, C. *Concepts on the chloride diffusion coefficient. Third RILEM workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete.* Madrid, 2002. Disponível em: <https://www.rilem.net/images/publis/pro038-001.pdf>. Acesso em: 29 setembro 2020.

ANDRADE, J. J. O. Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: Iniciação por cloreto. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2001. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/2613>. Acesso em: 30 março 2020.

BAROGUEL-BOUNY, V.; CUSSIGH, F.; ROUGEAU, P. Durabilidade dos concretos a partir da abordagem de desempenho. Tradução: Bastos P.K.X. In: OLLIVIER, J.P; VICHOT, A. (ed.). Durabilidade do Concreto: Bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. Tradução: Cascudo, O.; Carasek, H (ed.). 1ª. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. p. 237-254, cap. 8.

BAROGUEL-BOUNY, V.; CAPRA, B.; LAURENS, S. A durabilidade das armaduras e do concreto de cobertura. Tradução: Cascudo, O. In: OLLIVIER, J.P; VICHOT, A. (ed.). Durabilidade do Concreto: Bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. Tradução: Cascudo, O.; Carasek, H (ed.). 1ª. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. p. 255-326, cap. 9.

BAUER, L. A. F *et al.* Aditivos e adições. In: DIAS, J.F. (Coord.). Materiais de Construção. 6ª. ed. Rio de Janeiro, 2019. p. 161-204, cap. 6.



BERTOLINI, L. et al. *Corrosion of Steel in Concrete: prevention, diagnosis, repair*. 1ª ed. Weinheim: WILEY-VCH, 2004.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. *BS EN 206: Concrete: specification, performance, production and conformity*. Brussels: BSI, 2013.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. *BS EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures: Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels: BSI, 2004.

BROOMFIELD, J. P. *Corrosion of steel in concrete: understanding investigation and repair*. 2ª ed. New York: Taylor & Francis, 2007.

CARÉ, S. *Influence of aggregates on chloride diffusion coefficient into mortar*. *Cement and Concrete Research*. v. 33, p. 1021-1028, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884603000097>. Acesso em: 11 maio 2020.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. *Efecto de la aplicación de campos eléctricos sobre las interacciones entre los iones cloruro y la matriz de cemento*. *Boletín de la sociedad Española de cerámica y vidrio*. v. 43, p. 565-568, 2004. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/39395139\\_Efecto\\_de\\_la\\_aplicacion\\_de\\_campos\\_electricos\\_sobre\\_las\\_interacciones\\_entre\\_los\\_iones\\_cloruro\\_y\\_la\\_matriz\\_de\\_cemento](https://www.researchgate.net/publication/39395139_Efecto_de_la_aplicacion_de_campos_electricos_sobre_las_interacciones_entre_los_iones_cloruro_y_la_matriz_de_cemento). Acesso em: 9 junho 2020.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. *Measurement of the steady and non-steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber: Comparison with natural diffusion tests*. *Cement and Concrete Research*. v. 31, p. 1411-1420, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884601005622>. Acesso em: 15 junho 2020.

ESCADEILLAS, G.; HORNAIN, H. A durabilidade do concreto frente a ambientes quimicamente agressivos. Tradução: Quarcioni, V.A. In: OLLIVIER, J.P; VICHOT, A. (ed.). *Durabilidade do Concreto: Bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*. Tradução: Cascudo, O.; Carasek, H (ed.). 1ª. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. p. 433-508, cap. 11.

EL-REEDY, M. A. *Steel-Reinforced Concrete Structures: Assessment and Repair of Corrosion*. 2ª ed. New York: Taylor & Francis Group, 2018.

FARÍAS, J. P. *Corrosion of steel in cracked concrete: chloride microanalysis and service life predictions*. 2015. Thesis (PhD) - Delft University of Technology (TUDelft), Delft, 2015. Disponível em: <https://repository.tudelft.nl/>. Acesso em: 21 abril 2020.

GENTIL, V. *Corrosão*. 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

GJØRV, O.E. *Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments*. 1ª. ed. New York: Taylor & Francis, 2009.

HELENE, P. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. 1993. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1993. Disponível em: <http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/TD1.pdf>. Acesso em: 2 maio 2020.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, G.C. (ed.). *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*. 3ª ed. São Paulo: IBRACON, 2017. Volume 2. p. 970-1005, cap. 29.

HELENE, P. Introdução. In: RIBEIRO, D.V. (coord.) *et al.* *Corrosão e degradação em estruturas de concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção*. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. p. 1-10, cap. 1.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. *JSCE Guidelines for Concrete n.15, Standard specifications for concrete structures: "Design"*. JSCE: Tokyo, 2007. Disponível em: [https://www.jsce-int.org/system/files/JGC15\\_Standard\\_Specifications\\_Design\\_1.0.pdf](https://www.jsce-int.org/system/files/JGC15_Standard_Specifications_Design_1.0.pdf). Acesso em: 10 maio 2020.

KOCH, G. *et al.* *International measures of prevention, application, and economics of corrosion Technologies study*. NACE International. 2016. Disponível em: <http://impact.nace.org/economic-impact.aspx>. Acesso em: 10 abril 2020.

LI, K. *Durability Design of Concrete Structures: Phenomena, Modeling, and Practice*. Singapore, 2016.

LOURENÇO, M.Z.; SOUZA, C.A.C. Métodos de proteção e aumento da durabilidade do concreto. In: RIBEIRO, D.V. (coord.) *et al.* *Corrosão e degradação em estruturas de concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção*. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. p. 243-290, cap. 9.

MEDEIROS, M.H.F.; ANDRADE, J.J.O.; HELENE, P. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: *Concreto: ciência e tecnologia*. ISAIA, G.C. (ed.). São Paulo: IBRACON, 2011. cap. 22.

MEDEIROS, M.H.F.; HELENE, P. *Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption*. *Construction and Building Materials*. V. 23, p. 1476–1484, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061808001803>. Acesso em: 15 novembro 2020.

MEDEIROS-JUNIOR, R.A.; LIMA, M. G. Correlação entre o coeficiente de difusão e a corrente elétrica durante ensaio multiregime de migração de cloretos. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil (REEC)*. V. 9, n. 3, p. 41-52, dezembro 2014. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/reec/article/view/32038>. Acesso em: 1 dezembro 2020.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 3ª ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

MEIRA, G. R. *Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: fundamentos, diagnóstico e prevenção*. João Pessoa: IFPB, 2017.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. Tradução: Cremonini R. A. 5ª. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OLLIVIER, J.P.; TORRENTI, J.M. A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte. Tradução: Cascudo, O.; Carasek, H. *In*: OLLIVIER, J.P; VICHOT, A. (ed.). Durabilidade do Concreto: Bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. Tradução: Cascudo, O.; Carasek, H (ed.). 1ª. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. p. 41-112, cap. 3.

OLLIVIER, J.P. *Durability of concrete*. Boletim técnico da escola politécnica da USP – Departamento de engenharia de construção civil. São Paulo: BT/PCC/192, 1998. Disponível em: [http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT\\_00192.pdf](http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00192.pdf). Acesso em: 4 abril 2020.

PEREIRA, V.G.A. Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: Influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/2801>. Acesso em: 15 junho, 2020.

PINTO, S.A. Correlações entre ensaios de penetração de cloretos e análise da influência do uso da sílica ativa na durabilidade do concreto armado. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016. Disponível em: <http://www.ppec.ufba.br/site/publicacoes/correlacoes-entre-ensaios-de-penetracao-de-cloretos-e-analise-da-influencia-do-uso-da-si>. Acesso em: 5 novembro 2020.

REGINATO, L. A. Otimização de traços de concreto: estudo aplicado a postes de concreto armado visando o aumento da vida útil. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2014. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/159267>. Acesso em: 6 maio 2020.

RIBEIRO, D.V.; LABRINCHA, J.A.; MORELLI, M.R. *Chloride diffusivity in red mud-ordinary Portland cement concrete determined by migration tests*. Materials Research, v. 14, n. 2, p. 227-234, abril 2011. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/262495302\\_Chloride\\_Diffusivity\\_in\\_Red\\_Mud-Ordinary\\_Portland\\_Cement\\_Concrete\\_Determined\\_by\\_Migration\\_Tests](https://www.researchgate.net/publication/262495302_Chloride_Diffusivity_in_Red_Mud-Ordinary_Portland_Cement_Concrete_Determined_by_Migration_Tests). Acesso em: 9 junho 2020.

RIBEIRO, D.V.; CASCUDO, O. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. *In*: RIBEIRO, D.V. (coord.) *et al.* Corrosão e degradação em estruturas de concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. p. 33-50, cap. 3.

RIBEIRO, D.V. Estrutura dos poros e mecanismos de transporte no concreto. *In*: RIBEIRO, D.V. (coord.) *et al.* Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. p. 51-96, cap. 4.

RIBEIRO, D.V. Corrosão em estruturas de concreto armado como consequência da carbonatação e da ação dos cloretos. *In*: RIBEIRO, D.V. (coord.) *et al.* Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. p. 125-158, cap. 6.

SANTOS, L. Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto armado. 2006. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília (UnB), Brasília, 2006. Disponível em: <https://repositorio.unb.br>. Acesso em: 1 maio 2020.

SANTOS, I.H.; SOUZA, C.A.C.; RIBEIRO, D.V. *Porosity influence on life time of concrete structures analysed by chloride migration testing*. In: RILEM International workshop on performance-based specification and control of concrete durability, Zagreb, Croácia. Proceedings of RILEM International workshop on performance-based specifications and control of concrete durability. Bagnaux, France: RILEM, 2014. p. 471-480. Disponível em: [https://www.rilem.net/publication/publication/433?id\\_papier=9761](https://www.rilem.net/publication/publication/433?id_papier=9761). Acesso em: 12 abril 2020.

SAVIJA, B. *Experimental and numerical investigation of chloride ingress in cracked concrete*. 2014. Thesis (PhD) – Delft University of Technology (TUDelft), Delft, 2014. Disponível em: <https://repository.tudelft.nl/>. Acesso em: 21 abril 2020.

SHI, C. *et al. Transport and interactions of chlorides in cement-based materials*. New York: CRC Press, 2019.

SILVA, F.G. Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos. 2006. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia do Materiais) – Universidade de São Paulo Interunidades (EESC – IFSC – IQSC), São Carlos, 2006. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses>. Acesso em: 30 março 2020.

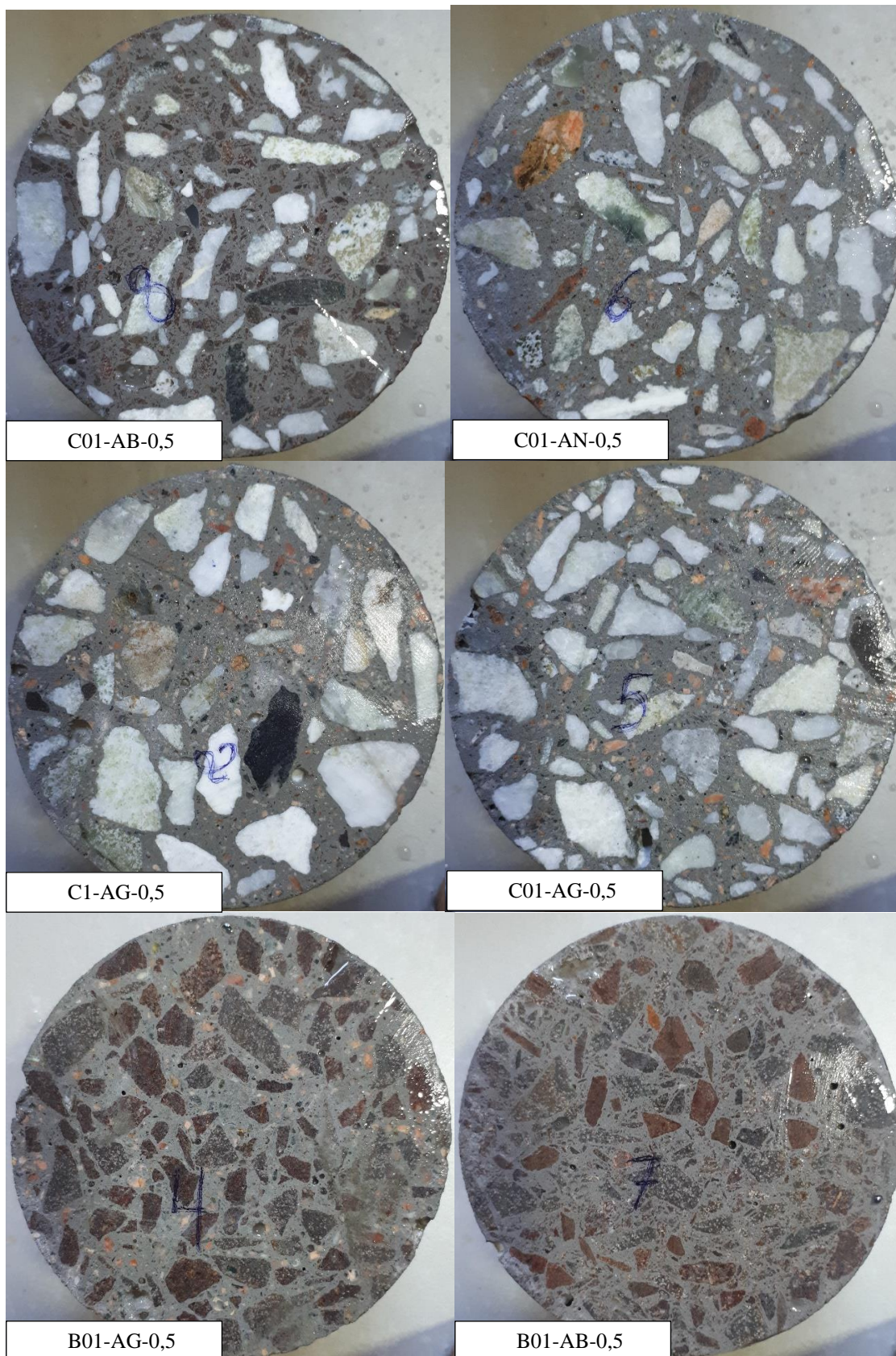
SOUZA, C.A.C. Princípios da corrosão eletroquímica. In: RIBEIRO, D.V. (coord.) *et al. Corrosão e degradação em estruturas de concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção*. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. p. 11-32, cap. 2.

TRUC, O.; OLLIVIER, J.P.; CARCASSÈS, M. *A new way for determining the chloride diffusion coefficient in concrete from steady state migration test*. Cement and Concrete Research, v. 30, p. 217-226, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000888469900232X>. Acesso em 25 dezembro 2020.

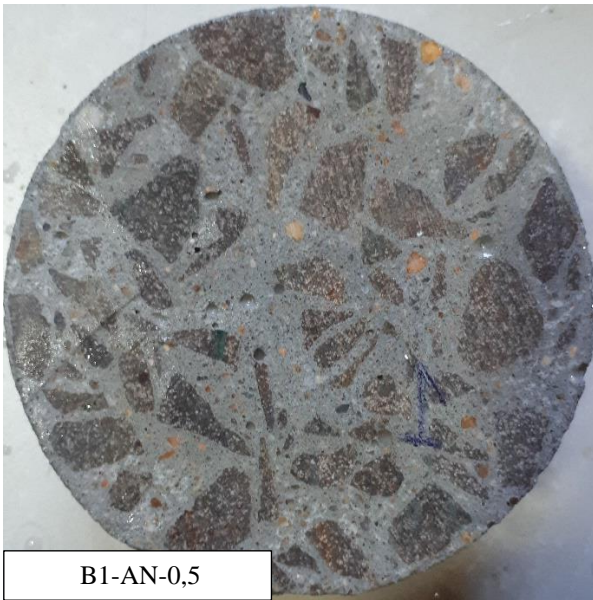
TUUTII, K. *Corrosion of steel in concrete*. Thesis (Doctor) – Lund University. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982. Disponível em: [https://portal.research.lu.se/portal/en/publications/corrosion-of-steel-in-concrete\(e97795b5-7f3a-4994-8beb-9438f5a51571\).html](https://portal.research.lu.se/portal/en/publications/corrosion-of-steel-in-concrete(e97795b5-7f3a-4994-8beb-9438f5a51571).html). Acesso em: 21 abril 2020.

YANG, C.C.; CHIANG, S.C.; WANG, L.C. *Estimation of the chloride diffusion from migration test using electrical current*. Construction and Building Materials. v.21, p. 1560-1567, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061806001462>. Acesso em: 10 julho 2020.

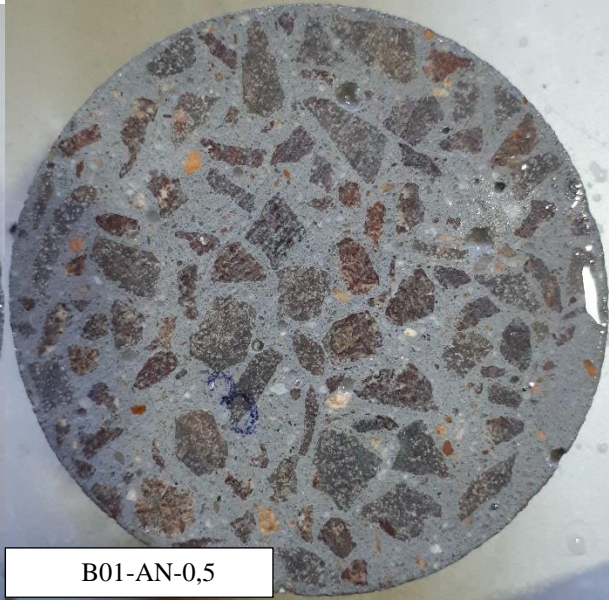
YU, Z. *Microstructure Development and Transport Properties of Portland Cement-fly Ash Binary Systems: in view of service life predictions*. 2015. Thesis (Doctor) - Delft University of Technology, Delft, 2015. Disponível em: <https://repository.tudelft.nl/>. Acesso em: 21 abril 2020.

**APÊNDICES****APÊNDICE A – Imagens da face de uma amostra de cada traço de concreto analisado**

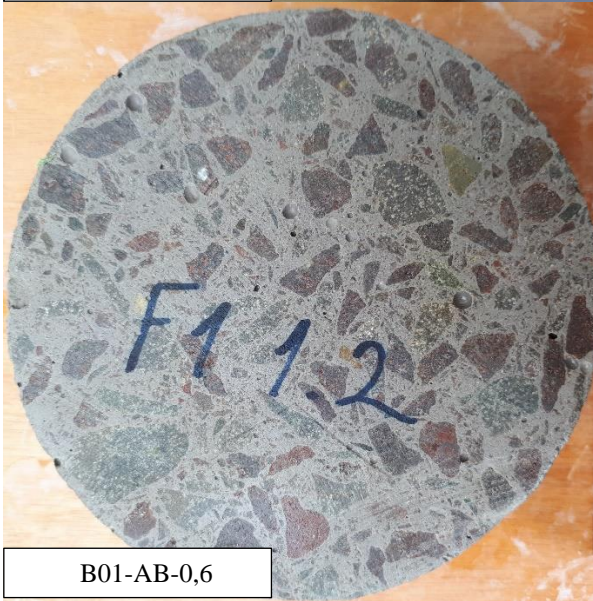
Fonte: Autor, 2020



B1-AN-0,5



B01-AN-0,5



B01-AB-0,6



B01-AN-0,6

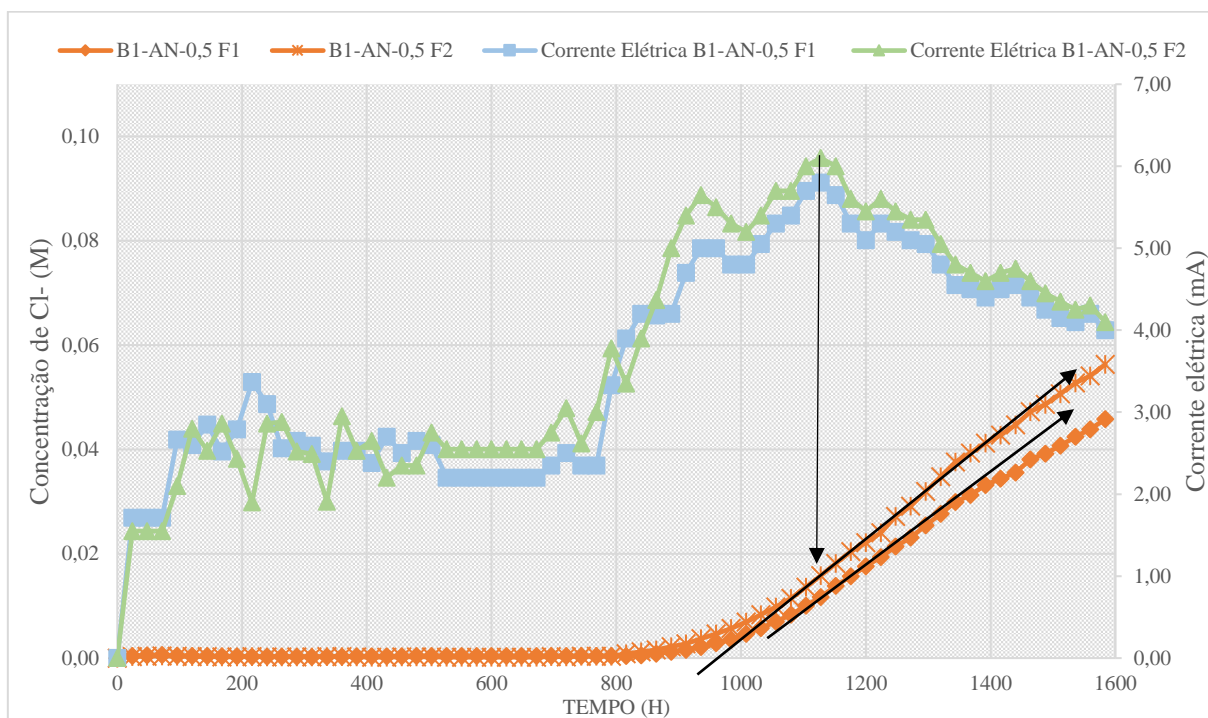


C01-AG-0,6

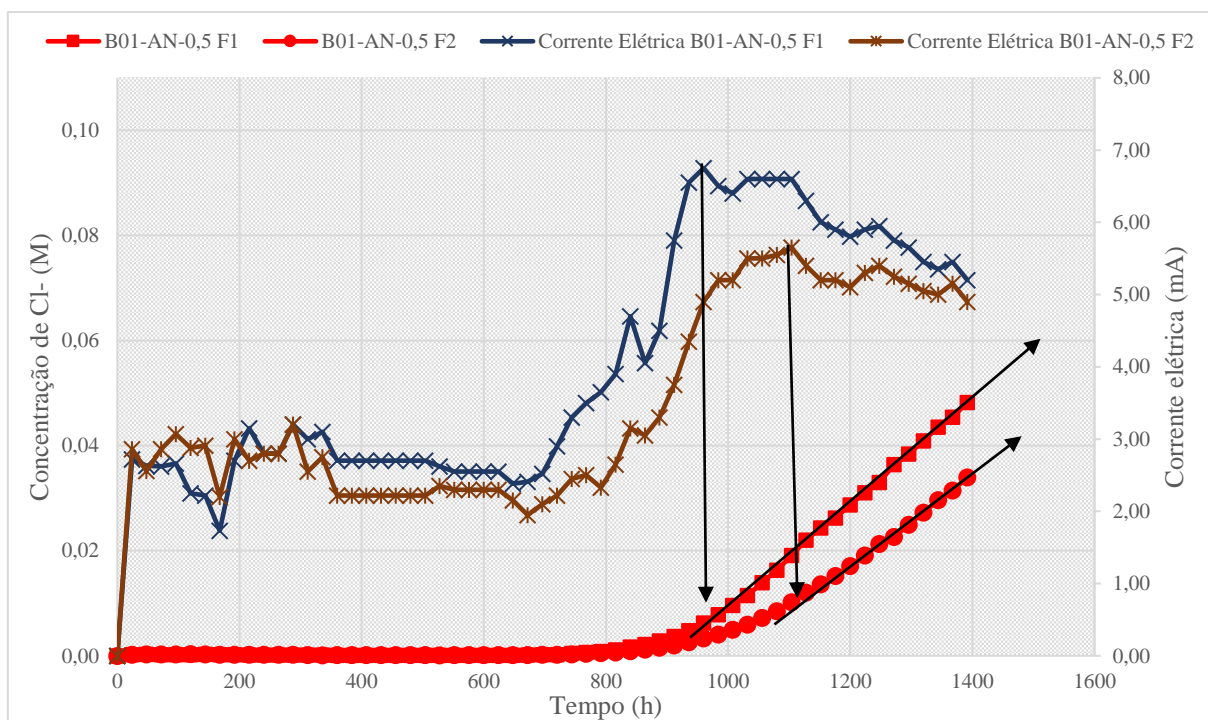


C01-AN-0,6

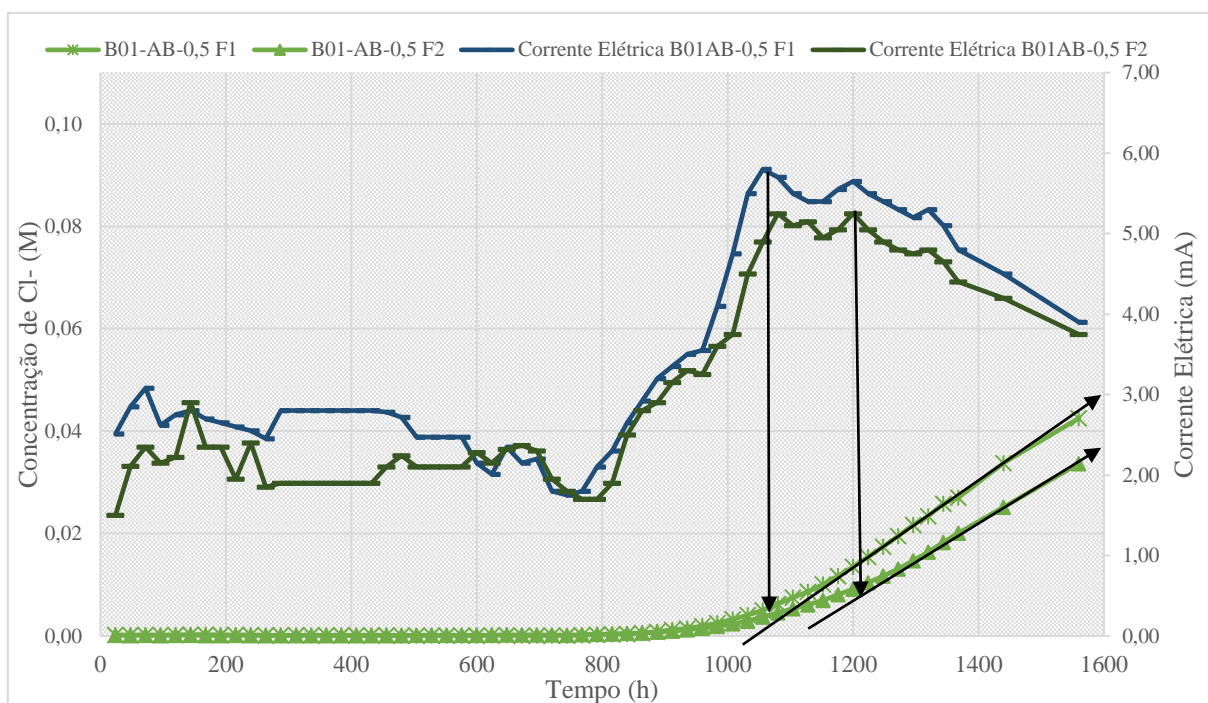
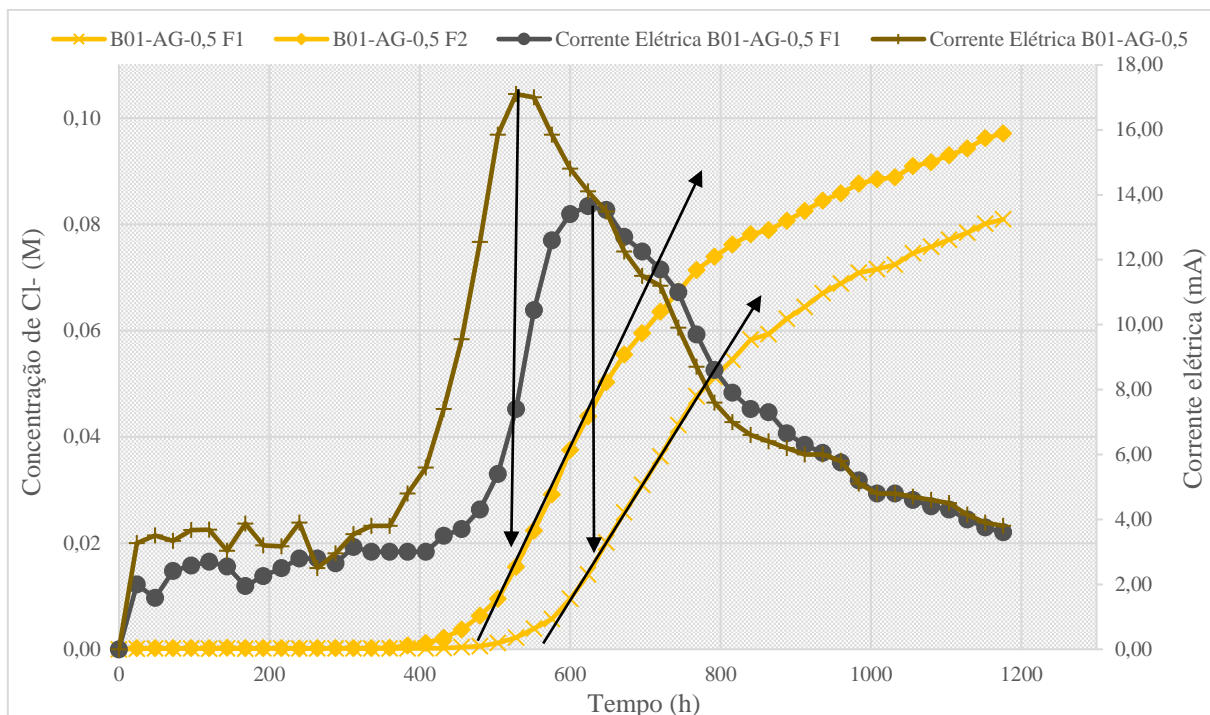
## APÊNDICE B – Gráficos da evolução da concentração de cloretos e da corrente elétrica nas amostras analisadas



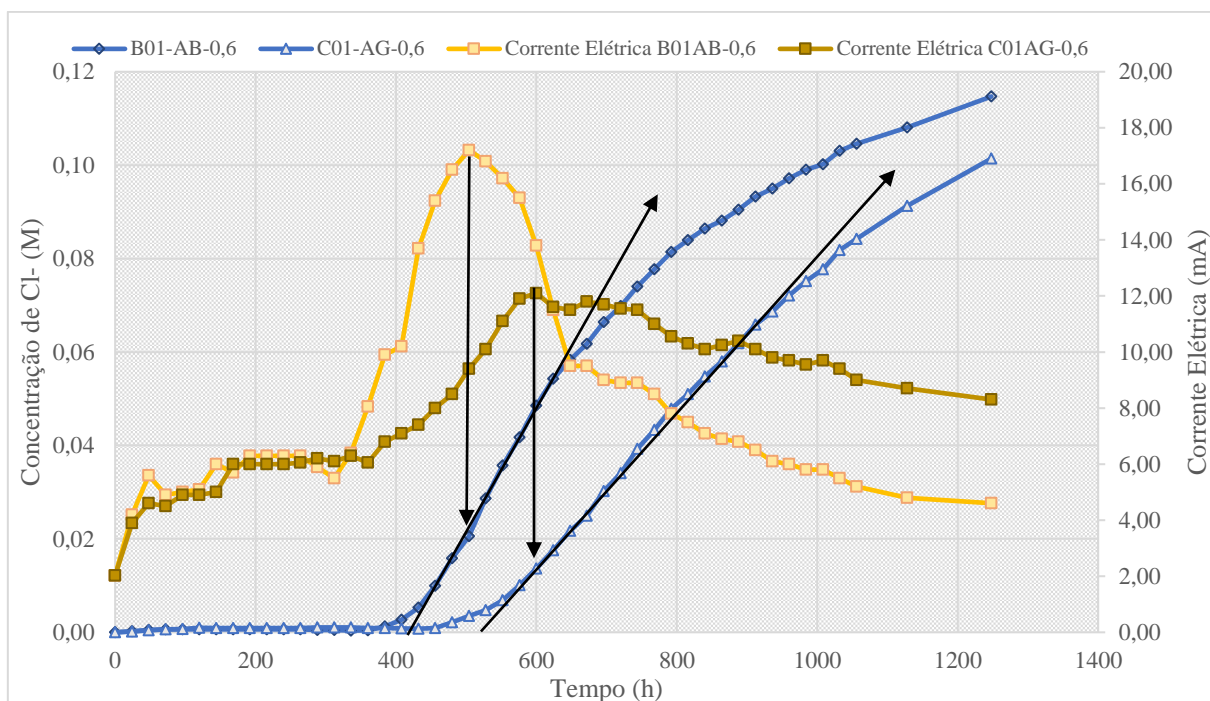
Fonte: Autor, 2020



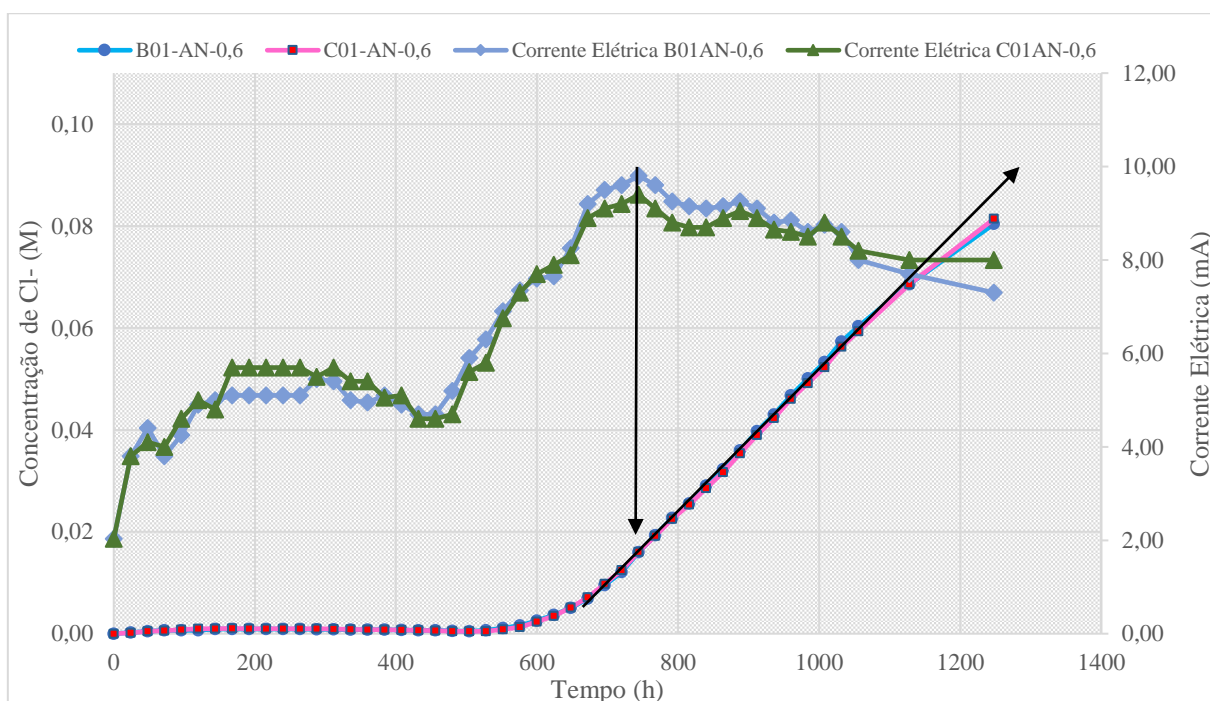
Fonte: Autor, 2020



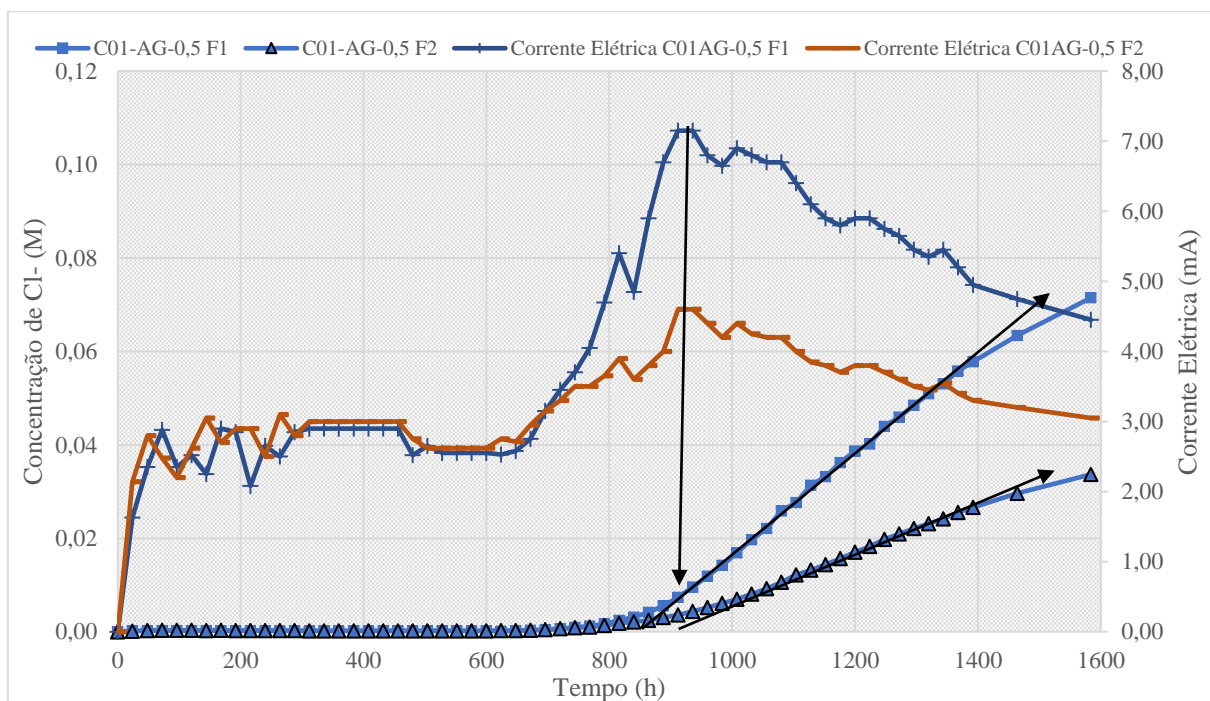
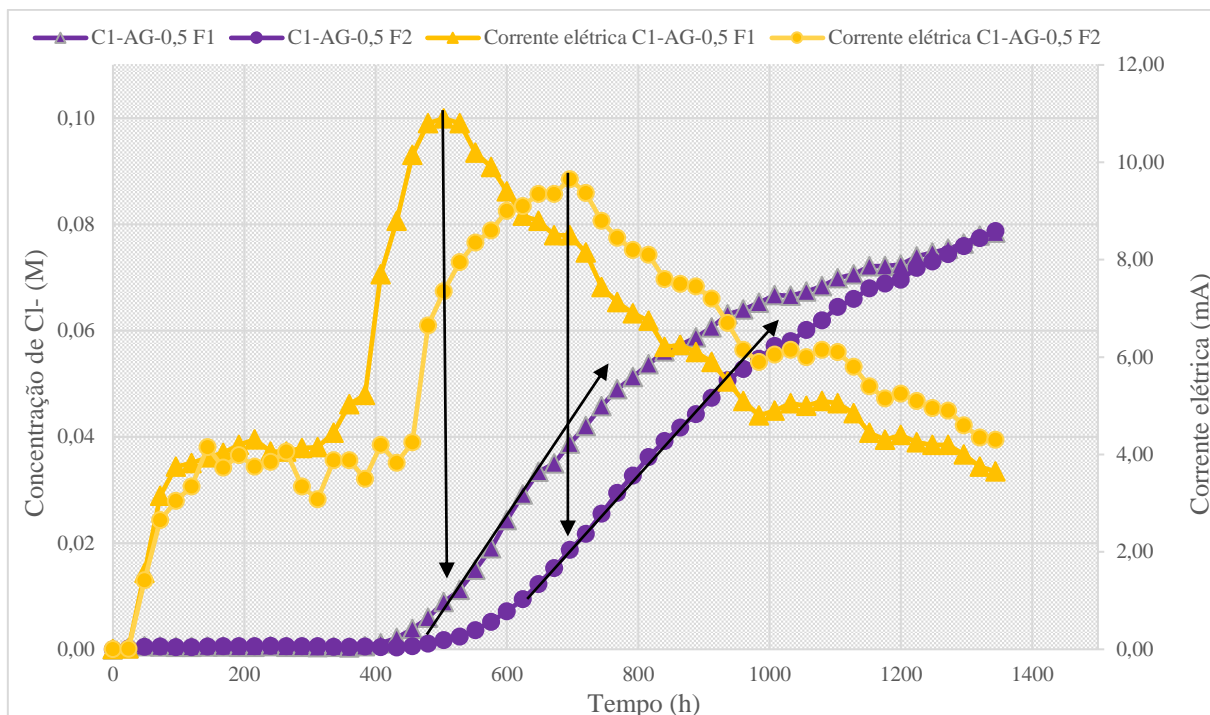


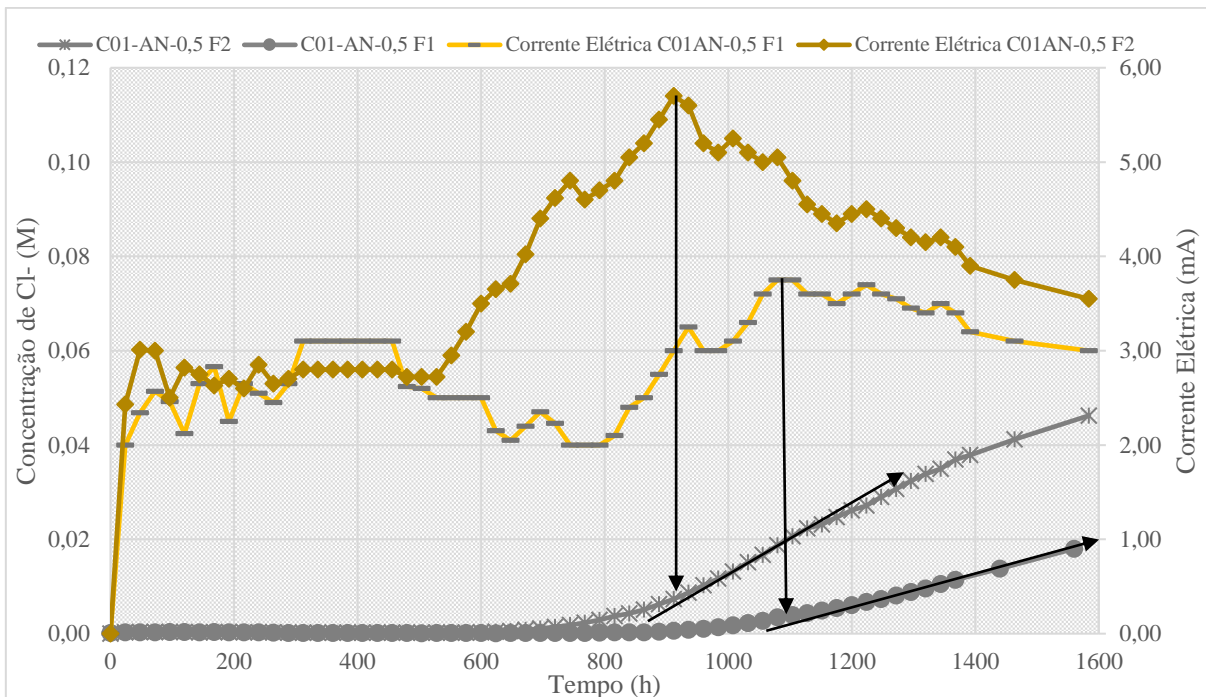


Fonte: Autor, 2020

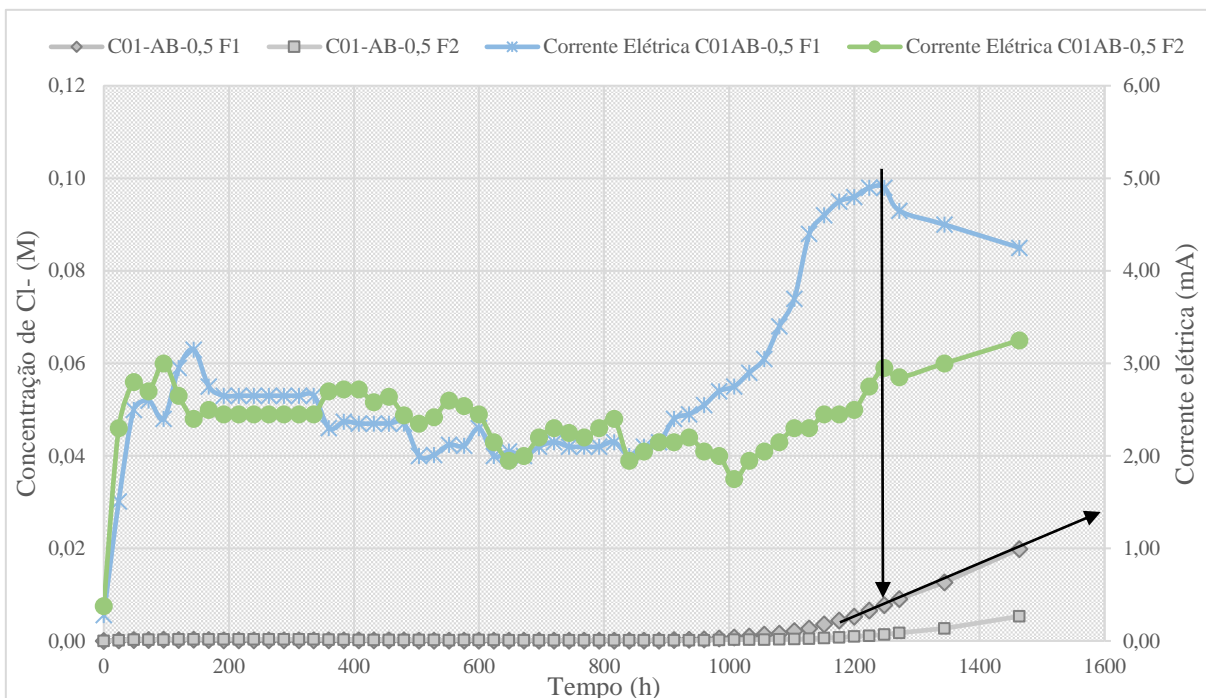


Fonte: Autor, 2020

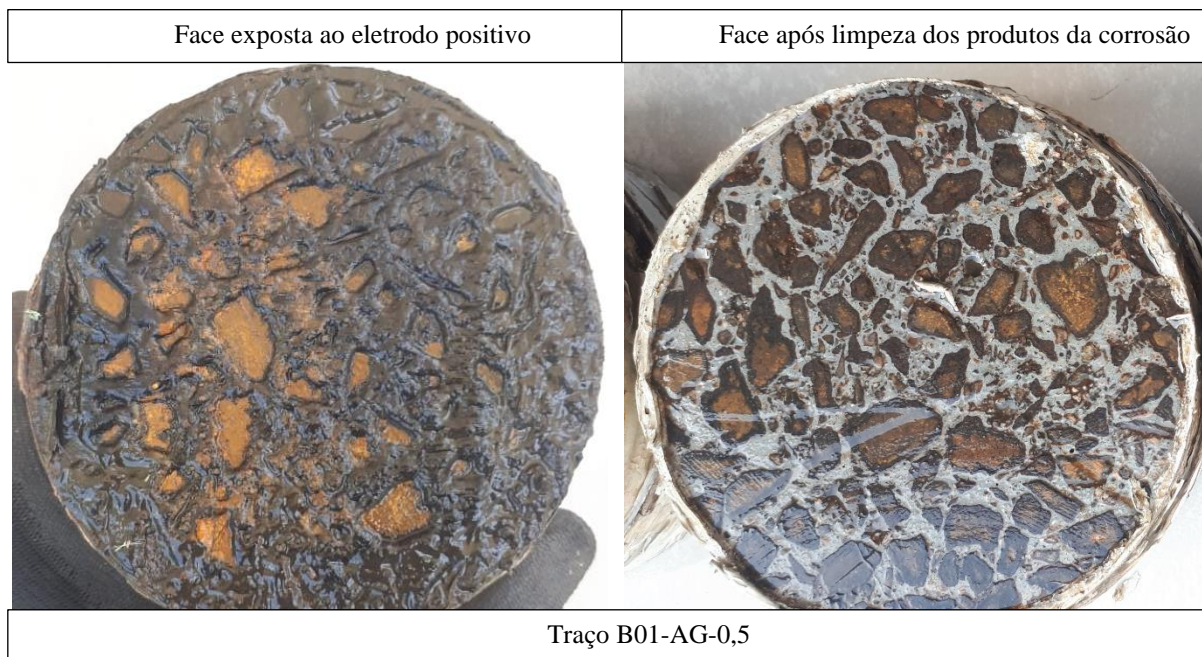




Fonte: Autor, 2020



Fonte: Autor, 2020

**APÊNDICE C – Imagens das faces de algumas amostras analisadas após o ensaio de migração**

Fonte: Autor, 2020

Face exposta ao eletrodo positivo – Traço B1-AN-0,5 – Fatia 1 e 2



Face após limpeza dos produtos da corrosão



Face exposta ao eletrodo negativo

