



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
CIVIL E AMBIENTAL**

**– MESTRADO –**

# **AVALIAÇÃO DO FATOR DE IDADE EM CONCRETOS COM ADIÇÕES MINERAIS**

Por

**Maria Silva Freitas**

Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da  
Paraíba para obtenção do grau de Mestre

**JOÃO PESSOA – PB, MARÇO DE 2022**



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
CIVIL E AMBIENTAL**

**– MESTRADO –**

## **AVALIAÇÃO DO FATOR DE IDADE EM CONCRETOS COM DISTINTAS COMPOSIÇÕES**

Dissertação submetida ao  
programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil e Ambiental da  
Universidade Federal da  
Paraíba, como parte dos  
requisitos para a obtenção do  
título de Mestre.

**Maria Silva Freitas**

**Orientador: Prof. Dr. Gibson Rocha Meira**

**JOÃO PESSOA – PB, MARÇO DE 2022**

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

F866a Freitas, Maria Silva.

Avaliação do fator de idade em concretos com  
distintas composições / Maria Silva Freitas. - João  
Pessoa, 2022.  
110 f. : il.

Orientação: Gibson Rocha Meira.  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Engenharia civil e ambiental. 2. Fator de idade.  
3. Coeficiente de difusão. 4. Resistividade elétrica  
superficial. 5. Adições minerais. I. Meira, Gibson  
Rocha. II. Título.

UFPB/BC

CDU 624:504(043)

Elaborado por Larissa Silva Oliveira de Mesquita - CRB-15/746



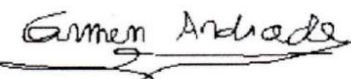
**"AVALIAÇÃO DO FATOR DE IDADE EM CONCRETOS COM ADIÇÕES MINERAIS"**

**MARIA SILVA FREITAS**  
Dissertação aprovada em 31 de março de 2022

Período Letivo: 2021.2

  
Prof. Dr. Gibson Rocha Meira – UFPA  
Orientador

  
Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa – UFPA  
Examinador Interno

  
Profa. Dra. Maria del Carmen Andrade Perdrix – CIMNE  
Examinadora Externa

João Pessoa/PB  
2022

A todas que virão depois de mim...  
22/02/2022

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, pela sua bondade infinita em minha vida.

Aos meus pais, Ana e Francisco, e meus irmãos, Paulo, Marcos e à minha cunhada, Angela, por todo o carinho e esforços dedicados à minha formação. Mesmo distância, eles se fizeram presentes, diariamente.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Gibson Rocha Meira, por todos os ensinamentos e pela confiança transmitida nos últimos três anos, até chegar neste trabalho final. Agradeço a paciência, os conselhos, os momentos de descontração, a franqueza, e por todos os momentos em que precisei de apoio e o senhor esteve presente, e não foram poucos. Professor, muito obrigada!

Um agradecimento especial aos meus amigos de curso, pela amizade e carinho de todos os momentos vividos e planejados. Tenho certeza de que eles irão se concretizar! A extraordinária alegria de Leane Priscilla, por todos os momentos de estudos na madrugada, valeu muito a pena; Wesley, obrigada por todos os momentos vividos, por cada história engraçada noite adentro no laboratório, não tenho palavras que definam a quão grata sou a Deus, por ter Lhe colocado em meu caminho.

A todos os colegas do PPGECA, em especial, Lucas Geovanni, Rafaela, Matheus, Rochana e Anselmo que estiveram sempre presente no dia a dia de laboratório, por todo apoio quando precisei, seja para um favor ou com uma palavra amiga.

A todos que fazem parte do grupo de Pesquisa de Materiais e Resíduos da Construção - GMAT, Wesley, Pablo, Robson e Taíssa, pela troca de conhecimento, conversas descontraídas e experiências. Tudo isso foi e é de grande contribuição para este estudo. Agradeço em especial, à Mariane, que me recebeu de braços abertos e se dispôs a me ajudar sempre, mesmo nos momentos em que ela não tinha tempo.

À minha família de apartamento, que foi minha base em João Pessoa e que levo comigo para sempre, Celia, Regiane e Jailson.

Ao Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas - LABEME, nas pessoas de Sebastião, a quem aqui expresso a minha extrema gratidão por todo apoio que o senhor me ofereceu; Delby, Jamilson, Umberto e Nely, que nunca mediram esforços

para ajudar-me, mesmo em horários e dias de folga e, inclusive, em momentos de pandemia.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental - PPGECA, pela oportunidade de dar continuidade a meus estudos.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação e conclusão deste trabalho final de curso;

A todos, o meu muito obrigada!

*“Bem sei que tudo podes, que nenhum dos teus planos podem ser frustrados”*

Jó 42:2



## RESUMO

O presente trabalho estudou e determinou o fator de idade para misturas de concretos contendo adições pozolânicas, considerando medidas de resistividade elétrica e difusão de íons cloretos, em ambiente de laboratório. Para tal, foram moldados corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para oito misturas diferentes, compostas por cimento Portland de alta resistência inicial, cinza volante, metacaulim e sílica ativa. Após o período de cura, as amostras foram submetidas aos ensaios de difusão pura, seguindo as recomendações da NT Build 443; resistividade elétrica superficial, pelo método de Wenner; resistência à compressão axial e absorção total de água por imersão. Os resultados mostraram que o fator de idade variou em uma faixa de 0,100 a 0,999. Para o fator de idade obtido a partir de dados de difusão, fator de idade “ $n$ ”, esse intervalo foi dividido em três: 0,100 – 0,450, concreto sem adição e concreto com adição de sílica ativa; 0,300 – 0,600, concreto com adição de metacaulim; 0,600 – 0,900, concreto com adição de cinza volante. Já para o fator “ $q$ ”, fator de idade obtido por leituras de resistividade elétrica superficial, esse intervalo variou de: 0 - 0,420, para concreto sem adição, concreto com adição de sílica ativa e concreto com adição de metacaulim e 0,620 – 0,999 para concreto com adição de cinza volante.

**Palavras-chave:** fator de idade; coeficiente de difusão; resistividade elétrica superficial; adições minerais.

## ABSTRACT

The present work studied and determined the aging factor for concrete mixtures containing pozzolanic additions, considering measurements of electrical resistivity and diffusion of chloride ions in a laboratory environment. For this purpose, cylindrical specimens with 100 mm diameter and 200 mm high were casted for eight different mixtures, composed of Portland cement of initial high strength, fly ash, metakaolin and silica fume. After the curing period, the samples were submitted to pure diffusion tests, following the recommendations of NT Build 443; surface electrical resistivity, by Wenner method; axial compressive strength and total water absorption by immersion. The results show that the age factor varied in a range of 0.100 to 0.999. For the age factor obtained from diffusion data, age factor "n", this interval was divided into three: 0.100 – 0.450, concrete without addition and concrete with the addition of silica fume; 0.300 - 0.600, concrete with the addition of metakaolin; 0.600 - 0.900, concrete with added fly ash. For the factor "q", an ageing factor obtained by readings of surface electrical resistivity, this interval ranged from: 0 - 0.420, for concrete without addition, concrete with the addition of silica fume and concrete with the addition of metakaolin, 0.620 - 0.999 for concrete with the addition of fly ash.

**Keywords:** aging factor; diffusion; surface electrical resistivity; mineral additions.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do transporte de cloretos por absorção capilar .....	24
Figura 2 - Representação esquemática do transporte de cloretos por permeabilidade .....	25
Figura 3 - Representação esquemática do transporte de cloretos por migração iônica .....	26
Figura 4 - Representação esquemática do transporte por difusão .....	27
Figura 5 - Coeficientes de difusão dependentes do tempo. ....	32
Figura 6 -- Ajuste da 2ª lei de Fick a três perfis de forma simultânea .....	34
Figura 7 - Exemplo de como calcular o fator de idade (q) graficamente .....	36
Figura 8 - Valores de n encontrados na literatura .....	42
Figura 9 - Valores de q encontrados na literatura .....	43
Figura 10 - Corpo de prova cilíndrico (100 X 200 mm) devidamente identificados. ..	50
Figura 11 - Amostras de concreto ( CP cilíndrico 100 X 200 mm) armazenadas para cura .....	50
Figura 12 - Esquema do procedimento de estimativa de fase proposto por Ribeiro (2010) .....	52
Figura 13 - Marcação de corte para obter amostra com dimensão de 100 x 100 mm .....	53
Figura 14 - Amostra 100 x 100 mm .....	53
Figura 15 - Amostras prontas para iniciar a impermeabilização com resina epóxi....	54
Figura 16 - Amostra pronta para início do ensaio de difusão .....	54
Figura 17 - Armazenamento das amostras de pasta para ensaios de DRX e TG/DTG .....	55
Figura 18 - Princípio de medição - Sonda de Wenner.....	56
Figura 19 - Arranjo do ensaio de difusão pela NT BUILD 443 .....	57
Figura 20 - Amostras em solução de NaCl [2,8 M], em ambiente de laboratório .....	58
Figura 21 - Marcação das camadas na amostra (a); pulverização das amostras do concreto (b, c); peneiramento (d); retirada de resíduos metálicos provenientes da lâmina de corte (e); armazenamento de amostra para análises posteriores .....	59
Figura 22 - Solução preparada para ensaio de titulação de acordo com as recomendações do RILEM TC 178:2012 .....	60

Figura 23 - Distribuição granulométrica dos agregados .....	62
Figura 24 - Distribuição granulométrica do CP V ARI MAX.....	63
Figura 25 - Curva granulométrica dos finos.....	65
Figura 26 - Difratoograma de raio X - Cinza volante .....	66
Figura 27 - Difratoograma de raio X - Metacaulim.....	67
Figura 28 - Difratoograma de raio X - sílica ativa .....	67
Figura 29 - Índice de atividade pozolânica – 5751 (ABNT, 2015) .....	69
Figura 30 - Índice de atividade pozolânica - NBR 5752 (ABNT, 2014).....	69
Figura 31 - Ensaio de TG/DTG da pasta CP V ARI_A aos 90 dias de cura .....	70
Figura 32 - Ensaio de TG/DTG da pasta CP V ARI_25 CV_A, aos 90 dias de cura. ....	71
Figura 33 - Ensaio de TG/DTG da pasta CP V ARI_10MK_A, aos 90 dias de cura. ....	71
Figura 34 - Ensaio de TG/DTG da CP V ARI_SA_A, aos 90 dias de cura. ....	72
Figura 35 - Ensaio de TG/DTG da pasta CP V ARI_B, aos 90 dias de cura .....	72
Figura 36 - Ensaio de TG/DTG da pasta CP V ARI_25CV_B, aos 90 dias de cura ..	73
Figura 37 - Ensaio de TG/DTG da pasta CP V ARI_10MK_B, aos 90 dias de cura..	73
Figura 38 - Ensaio de TG/DTG da pasta CP V ARI_8SA_B, aos 90 dias de cura. ...	74
Figura 39 - Resistência à compressão das amostras estudadas .....	77
Figura 40 - Correlação entre resistência à compressão e índice de vazios .....	79
Figura 41 - Evolução da RES ao longo do tempo .....	81
Figura 42 - Identificação de misturas que estabilizaram, e aquelas que ainda apresentam aumento da RES ao longo do tempo de monitoramento.....	82
Figura 43 - Perfis de cloretos totais para mistura CPV ARI _A .....	84
Figura 44 - Perfis de cloretos totais para mistura CPV ARI _25CV_A .....	84
Figura 45 - Perfis de cloretos totais para mistura CPV ARI _8SA_A.....	84
Figura 46 - Perfis de cloretos totais para mistura CPV ARI _10MK_A .....	85
Figura 47 - Perfis de cloretos totais para mistura CPV ARI _B .....	85
Figura 48 - Perfis de cloretos totais para mistura CPV ARI _25CV_B .....	85
Figura 49 - Perfis de cloretos totais para mistura CPV ARI _8SA_A.....	86
Figura 50 - Perfis de cloretos totais para mistura CPV ARI _10MK_B .....	86
Figura 51 - Perfis de cloretos livres para mistura CPV ARI _A.....	87
Figura 52 - Perfis de cloretos livres para mistura CPV ARI _25CV_A.....	87
Figura 53 - Perfis de cloretos livres para mistura CPV ARI _8SA_A.....	87
Figura 54 - Perfis de cloretos livres para mistura CPV ARI _10MK_A .....	88

Figura 55 - Perfis de cloretos livres para mistura CPV ARI _B.....	88
Figura 56 - Perfis de cloretos livres para mistura CPV ARI _25CV_A.....	88
Figura 57 - Perfis de cloretos livres para mistura CPV ARI _8SA_A.....	89
Figura 58 - Perfis de cloretos totais para mistura CPV ARI _10MK_A .....	89
Figura 59 - Representação esquemática dos intervalos considerados para o cálculo da integral da concentração do perfil, obtido para cloretos livres e totais .....	90
Figura 60 - Cloretos combinados x cloretos totais (% massa de cimento) .....	92
Figura 61 - Determinação do fator de idade pelo inverso da resistividade no tempo	95
Figura 62 - Fator q para todas as misturas de concreto trabalhadas .....	97
Figura 63 - Valores do “q” encontrados na literatura e aqueles calculados neste trabalho .....	98
Figura 64 - Relação entre o "n" semi dependente do tempo X "n" totalmente dependente .....	100
Figura 65 - valores para o fator "n" .....	100
Figura 66 - Fatores de idade n calculados e encontrados da literatura para abordagem semi dependente do tempo .....	102
Figura 67 - Fator de idade n, calculados e os já publicados para abordagem totalmente dependente do tempo .....	103
Figura 68 - Relação entre o fator de idade "n" e o fator de idade "q" para misturas com “n” semi dependente do tempo.....	104
Figura 69 - Relação entre o fator de idade "n" e o fator de idade "q" para misturas com “n” totalmente dependente do tempo .....	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de n para diferentes traços de concreto .....	38
Tabela 2 - Valores para n variando o traço e a quantidade de cinza volante na mistura .....	38
Tabela 3 - Valores para n, para diferentes adições minerais .....	38
Tabela 4 - Valores de n para diferentes misturas .....	39
Tabela 5 - valores para n calculado a partir de uma abordagem totalmente dependente do tempo .....	39
Tabela 6 - Valores de q, para diferentes tipos de cimentos europeus.....	40
Tabela 7 -Valores de q, para diferentes tipos de cimentos com adições minerais ....	40
Tabela 8 - Fator de idade para diferente tipo de cimento nacional.....	41
Tabela 9 - valores de q para diferentes relações água cimento e tipos de cimento brasileiro.....	41
Tabela 10 - valores de q para diferentes relações água cimento e tipos de cimento nacionais .....	42
Tabela 11 - Valores de q para cimento CP V -ARI e cimento com adição mineral de alta reatividade com substituição de 10% .....	42
Tabela 12 - Ensaios normatizados de caracterização dos insumos e concretos .....	45
Tabela 13 - Características das misturas desenvolvidas no programa experimental	48
Tabela 14 - Composição química do cimento CP V ARI MAX .....	63
Tabela 15 - Caracterização física e química do CP V ARI MAX .....	64
Tabela 16. Composição química das adições minerais .....	66
Tabela 17. Minerais encontrados no Difratoograma da cinza volante .....	67
Tabela 18. Tabela 3. Minerais encontrados no Difratoograma do metacaulim HP.....	67
Tabela 19. Minerais encontrados no Difratoograma da sílica ativa .....	68
Tabela 20 - Dados técnicos do aditivo .....	70
Tabela 21 – Teores obtidos a partir das curvas de TG/DTG .....	74
Tabela 22 - Resultados de absorção de água por imersão e índice de vazios obtido para todas as misturas na idade de 90 dias após a moldagem.....	75
Tabela 23 - Valores médios de resistência a compressão axial.....	76
Tabela 24 - Resultado da RES para todas as misturas estudadas nas idades de 28, 90, 154, 220 e 260 dias. ....	80

Tabela 25 - Integral de Cl por perfil de cloretos livres e totais para concretos com relação a/mc de 0,55 e 0,45 após 35, 90 e 180 dias de exposição na solução de NaCl, com concentração de 2,8 M. ....	91
Tabela 26 - Coeficiente de difusão (Dns) e concentração superficial (Cs) para as misturas de concreto após ajuste à segunda lei de Fick (solução 10) – Cloretos livres .....	93
Tabela 27 - Coeficiente de difusão (Dns) e concentração superficial (Cs) para as misturas de concreto após ajuste à segunda lei de Fick (solução 10) – Cloretos totais .....	93
Tabela 28 - Coeficiente de difusão inicial (D0) para as misturas de concreto após ajuste à segunda lei de Fick (solução 11); t0= 28 dias t= 180 dias .....	94
Tabela 29 - Coeficiente de difusão inicial (D0) e Cs (%) para as misturas de concreto após ajuste à segunda lei de Fick (solução 16) . t0 = 28; ts = 28; t = texp + ts .....	94
Tabela 30 - Valores do fator de idade (-q) para amostras de concreto referência e com adições minerais com relação a/mc de 0,55 e 045 após 260 dias de medição.....	96
Tabela 31 - Valores obtidos fator de idade n para todas as misturas de concreto ao longo do período de 180 dias. ....	99

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>CP</b>	Corpo de Prova
<b>a/c</b>	Relação água/cimento
<b>a/cm</b>	Relação água/materiais cimentícios
<b>IAP</b>	Índice de Atividade Pozolânica
<b>Cl<sup>-</sup></b>	Íons cloreto
<b>D</b>	Coeficiente de difusão
<b>D<sub>ns</sub></b>	Coeficiente de difusão em regime não estacionário
<b>D<sub>0</sub></b>	Coeficiente de difusão inicial
<b>C (x, t)</b>	Concentração dos cloretos na profundidade x e no tempo t
<b>C<sub>i</sub></b>	Concentração de cloretos inicial
<b>C<sub>s</sub></b>	Concentração de cloretos superficiais
<b>Erf</b>	Função erro de Gauss
<b>x</b>	Profundidade
<b>n</b>	Fator de idade
<b>q</b>	Fator de idade
<b>ρ</b>	Resistividade em qualquer idade
<b>ρ<sub>0</sub></b>	Resistividade elétrica superficial na primeira medição
<b>t<sub>0</sub></b>	Idade da primeira medição
<b>t</b>	Idade da última medição
<b>t<sub>exp</sub></b>	Idade da amostra
<b>t<sub>s</sub></b>	Idade de início à exposição
<b>CV</b>	Cinza Volante
<b>MK</b>	Metacaulim
<b>SF</b>	Sílica Ativa
<b>RES</b>	Resistividade Elétrica Superficial
<b>F</b>	Fator de correção
<b>R<sup>2</sup></b>	Coeficiente de determinação



## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	11
LISTA DE TABELAS .....	14
LISTA DE SÍMBOLOS .....	16
1. INTRODUÇÃO .....	20
1.1. OBJETIVOS.....	22
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	22
2. REFERENCIAL TEÓRICO .....	23
2.1. PRINCIPAIS MECANISMOS DE TRANSPORTE DE ÍONS CLORETOS NO CONCRETO .....	23
2.1.1. Absorção capilar .....	23
2.1.2. Permeabilidade.....	25
2.1.3. Migração iônica.....	26
2.1.4. Difusão iônica .....	27
2.2. DIFUSIVIDADE DOS ÍONS CLORETOS NO CONCRETO .....	29
2.3. PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO BASEADA NA DIFUSÃO .....	29
2.3.1. Solução da 2ª Lei de Fick e suas limitações.....	30
2.4. PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO BASEADA NA RESISTIVIDADE .....	34
2.4.1. Fator de idade em função da resistividade elétrica do concreto .....	35
2.5. FATOR DE IDADE DO CONCRETO (FATOR DE ENVELHECIMENTO) ....	36
2.6. VAREÁVEIS QUE INFLUENCIAM O FATOR DE IDADE .....	37
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
3.1. PRIMEIRA ETAPA: OBTENÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS E SUA CARACTERIZAÇÃO .....	44
3.1.1. Materiais utilizados e formas de obtenção.....	44
3.1.2. Caracterização dos materiais .....	45
3.1.2.3. Fluorescência de raios-X (FRX) .....	46

3.1.2.4. Análise termogravimétrica .....	46
<b>3.2. SEGUNDA ETAPA: DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS E MOLDAGEM; PREPARO DAS AMOSTRAS PARA EXPOSIÇÃO AOS SEUS DEVIDOS MEIOS DE EXPOSIÇÃO.....</b>	<b>47</b>
3.2.1. Definição dos traços e moldagem dos concretos .....	47
3.2.2. Preparo das amostras para os ensaios realizados.....	51
o Amostras para resistência a compressão axial .....	51
o Amostras submetidas ao ensaio de difusão de cloretos .....	51
<b>3.3. TERCEIRA ETAPA: REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO; ABSORÇÃO TOTAL POR IMERSÃO; RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL, DIFUSÃO DE CLORETOS. ....</b>	<b>55</b>
3.3.1. Resistência a compressão axial .....	55
3.3.3. Resistividade elétrica superficial (RES) .....	56
3.3.4. Difusão de cloretos .....	57
<b>3.4. QUARTA ETAPA: SOLUÇÕES EMPREGADAS PARA CÁLCULOS DO FATOR DE IDADE .....</b>	<b>60</b>
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>61</b>
<b>4.1. MATERIAIS EMPREGADOS .....</b>	<b>61</b>
4.1.1. Agregados .....	61
4.1.2. Cimento .....	62
4.1.3. Adições minerais .....	64
o Análise física .....	64
o Análise química.....	65
o Índice de atividade pozolânica .....	68
4.1.4. Aditivo.....	69
<b>4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS PASTAS NO ESTADO ENDURECIDO .....</b>	<b>70</b>
<b>4.3. CONCRETO ENDURECIDO .....</b>	<b>74</b>
4.3.1. Absorção de água por imersão e índice de vazios .....	74
4.3.2. Resistência à compressão axial .....	76
4.3.3. Resistividade elétrica superficial.....	79
4.3.4. Perfis de cloretos .....	83
4.3.5. Concentração de íons cloreto acumulada por mistura.....	89
4.3.6. Capacidade de ligação de cloretos.....	91

4.3.7. Coeficiente de difusão de cloretos.....	92
4.3.8. Capacidade de transporte de cloretos .....	94
<b>4.4. FATOR DE IDADE .....</b>	<b>95</b>
4.4.1. Fator de idade do concreto (q) considerando as medidas de resistividade 95	
4.4.2. Fator de idade do concreto (n) com dados de difusão natural de íons cloreto. 98	
4.4.3. Relação entre “n” e “q”.....	103
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>105</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>107</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Por razões econômicas e ambientais, o uso adições minerais no concreto está aumentando gradativamente (CASTRO, *et al.*, 2003). Atualmente, o desenvolvimento sustentável é uma forte linha de pesquisa e a indústria da construção civil está sendo fortemente integrada nesse novo cenário, tornando a durabilidade das construções um dos assuntos em pauta (DOMINICINI; CALMON, 2017).

O concreto é um dos materiais mais usados na construção civil ao longo dos anos. Dentre as suas qualidades, a durabilidade é um dos principais atrativos. No entanto, ele sofre com as intempéries ao longo do tempo e a redução do seu tempo de vida útil pode ser resultado da interferência de agentes agressivos externos, presentes no meio ambiente.

Nesse contexto, a corrosão de armaduras é uma das principais causas de deterioração precoce de uma estrutura (MEHTA; MONTEIRO, 2006). Esse processo corrosivo geralmente é desencadeado pela ação dos íons cloretos ou pela carbonatação do concreto (TUUTTI, 1982; MEIRA, 2004).

De acordo com Meira e Ferreira (2019), a ação dos íons cloreto ( $Cl^-$ ) é uma das principais causas da corrosão de armadura em estrutura de concreto armado. A forma de ingresso desse agente agressivo na estrutura pode acontecer por diversos mecanismos de transporte (absorção capilar, difusão iônica, permeabilidade e migração iônica). De acordo com Stanish *et al.* (1997) e Ferreira (2015), o mecanismo de absorção capilar limita-se à região mais externa do cobrimento e a partir de então a difusão é responsável pela continuidade do transporte. No entanto, aplica-se, em geral, as leis da difusão para avaliar o transporte dos íons cloreto no concreto (COSTA; APPLETON, 2007a).

A quantificação da taxa com que o processo de difusão ocorre é geralmente expressa através de um coeficiente de difusão. O coeficiente de difusão, no entanto, não é uma propriedade física verdadeira, mas uma constante de proporcionalidade nas leis de Fick (CRANK, 1975).

A previsão de vida útil de estruturas de concreto, em relação à corrosão de armadura desencadeada por cloretos, dispõe de inúmeros modelos, na literatura. Os dados de entrada são usualmente determinados por ensaios de laboratório.

Contudo, tem sido observado que o coeficiente de difusão tende a diminuir com o passar do tempo, com redução mais expressiva quando há a presença de adições pozolânicas na mistura (BAMFORTH, 1999; FIGUEIREDO *et al.*, 2014; MANGAT *et al.*, 1994; PILLAI *et al.*, 2020). Para corrigir esse comportamento, um fator de correção deve ser considerado, o fator de idade.

Por se tratar de um parâmetro calculado em função do tempo, a maior dificuldade em determinar valores para o fator de idade é o tempo dedicado ao envelhecimento das amostras e ao monitoramento ao longo do tempo. Ensaio de difusão e resistividade são a base de dados para determinação desses valores.

Para tanto, Justnes *et al.*, (2016) sugeriram que mais pesquisas sejam realizadas para descobrir o fator ideal de envelhecimento para cada estrutura, sujeita a diferentes condições ambientais. Do mesmo modo, Dominicini e Calmon (2017) ressaltam que, para aumentar a confiabilidade das previsões de vida útil, são necessários mais estudos abordando o fator de idade para diversos tipos e teores de adições. Em 2019, Junior *et al.* (2019), concluíram que o fator de idade foi reconhecido como um parâmetro que rege o cálculo de predição da vida útil, entretanto, os dados ainda são escassos.

Quanto ao conteúdo específico desta pesquisa, é necessário enfatizar serem poucos os estudos realizados para determinação desse parâmetro, o fator de idade. Alguns trabalhos se destacam, como os de Mangat e Molloy (1994) na Escócia; Bamforth (1998) no Reino Unido, Stanish e Thomas (2003) no Canadá; Andrade e D'Andrea (2010); de Markeset e Skjølsvold (2010) na Noruega; Andrade *et al.*, (2014b) na Espanha, Moffatt & Thomas (2018) no Canadá.

Nacionalmente, não foram encontrados estudos voltados a propor fatores de idade para concretos com adições minerais, aplicando dados de difusão pura ou exposição em ambiente natural com a presença de íons cloreto.

No entanto, pesquisas vêm sendo desenvolvidas para determinação de um fator de idade para concretos com base na resistividade, pelo modelo proposto por Andrade (2004). Os principais estudos dessas linhagens no Brasil são os de Medeiros Junior (2014), Real (2015) Medeiros Junior e Gans (2017), Gans *et al.*, (2017) e Real *et al.*, (2019).

Tendo em vista essas colocações, a presente pesquisa integra-se a esse contexto e se propõe a calcular e avaliar o fator de idade, com amostras submetidas

a ensaio de difusão pura e resistividade elétrica superficial. Trabalhando com amostras de concreto com distintas misturas, compostas por: cimento Portland de alta resistência inicial – CP V ARI, sílica ativa, metacaulim e cinza volante. Em especial, a pesquisa tem como finalidade contribuir substancialmente para a base de dados nacionais quanto ao fator de idade.

### **1.1.OBJETIVOS**

O objetivo geral deste trabalho é calcular e avaliar o fator de idade em concretos com adições minerais submetidos a ensaios de difusão natural e resistividade elétrica superficial, em ambiente de laboratório.

São objetivos específicos deste trabalho:

- Calcular o fato  $n$  e o fator  $q$  para os concretos estudados;
- Avaliar o valor do fator de idade para distintas misturas de concreto, a partir de medidas de difusão e resistividade elétrica superficial;
- Analisar a influência das adições minerais, da relação  $a/mc$  e do tempo para o fator de idade;
- Comparar os valores obtidos do fator de idade, por difusão e pela resistividade elétrica superficial;
- Estudar a influência da abordagem matemática nos resultados do fator de idade.

### **1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Este trabalho está sistematizado em cinco capítulos descritos a seguir.

No Capítulo 1, apresenta-se uma introdução ao tema, a importância do desenvolvimento dessa pesquisa para o campo de previsão de vida útil e os objetivos propostos.

No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre os mecanismos de transporte de cloretos, modelos de previsão de vida útil com base na segunda lei de Fick e previsão de vida útil com base na resistividade elétrica, o fator de idade e as variáveis que o influenciam.

No Capítulo 3, são descritos os procedimentos metodológicos adotados, bem como os materiais empregados para o desenvolvimento deste estudo.

O Capítulo 4 é composto pela apresentação e análise dos resultados.

E no Capítulo 5 apresentam-se as considerações finais e são sugeridos temas para trabalhos futuros, com o intuito de dar continuidade e aprofundamento no tema.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1.PRINCIPAIS MECANISMOS DE TRANSPORTE DE ÍONS CLORETO NO CONCRETO**

O transporte de íons cloreto do meio externo para o interior do concreto é um processo que ocorre apenas com a presença de água. É através da estrutura porosa do concreto que se dá essa penetração, especificamente pela rede contínua dos poros e/ou por fissuras, ou micro fissuras presentes na estrutura (COSTA; APPLETON, 2007a).

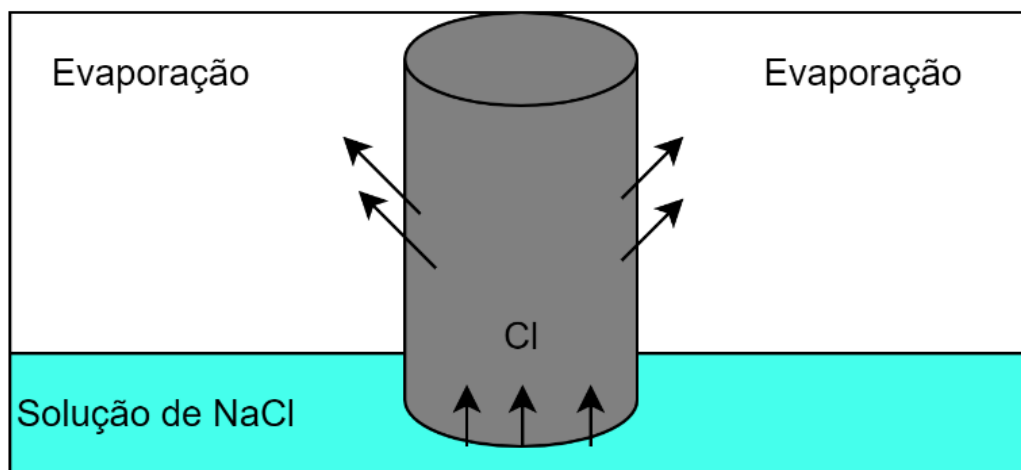
De acordo com Helene (1993), os íons cloreto podem se descolar para o interior do concreto mediante os mecanismos clássicos de transporte de água e de íons: absorção capilar, permeabilidade, difusão iônica e migração iônica. Porém, esses mecanismos podem atuar de forma conjunta ou isolada (NILSSON; TANG, 1996).

#### **2.1.1. Absorção capilar**

O mecanismo de transporte por absorção capilar é baseado na entrada de um líquido, contendo íons cloretos, devido à tensão superficial atuante nos poros. Essa tensão superficial provoca o surgimento de forças capilares que, no que lhe concerne, gera a ascensão do líquido através dos poros (HELENE, 1993a) (Figura 1).

Esse tipo de transporte não ocorrerá em estruturas em condições de saturação, pois, não haverá absorção capilar em concreto saturado (HELENE, 1993a). Ainda segundo o mesmo autor, os íons cloreto em sua forma cristalizada não conseguem permear os poros do concreto e o diâmetro dos cristais é superior aos diâmetros dos poros. Desse modo, é necessário que esses cristais depositados na superfície da estrutura venham a se dissolver para conseguirem transportar-se para o interior do concreto.

**Figura 1- Representação esquemática do transporte de cloretos por absorção capilar**



Fonte: HELENE (1993a).

Diante dessas premissas, presume-se que esse mecanismo de transporte seja muito importante para estruturas situadas na zona de flutuação de maré ou de respingo, onde ocorrem ciclos de molhagem e secagem nas estruturas. Nessa situação, há renovação contínua do agente agressivo, os íons cloretos, em condições favoráveis para deslocamento, atuando de forma efetiva nas primeiras camadas do concreto.

Segundo Hall (1989), a lei de Darcy ampliada é a mais adequada para representar o fenômeno do transporte por absorção capilar em materiais porosos. Ver Equações 1 e 2.

$$q = -D(\theta) \frac{d\theta}{dx} \quad (1)$$

$$D(\theta) = k(\theta) \frac{d\varphi}{dx} \quad (2)$$

Onde:  $q$  = volume de água transportado, em  $m^3$ ;  $D(\theta)$  = difusividade hidráulica, em  $m^2/s$ ;  $k(\theta)$  = condutividade hidráulica, em  $m/s$ ;  $\varphi$  = potencial capilar, que depende do teor de umidade do concreto ( $\theta$ );  $x$  = profundidade em relação à superfície do concreto, em metro (m).

De acordo com Helene (1993a), a ascensão capilar pode ser calculada de forma simplificada, utilizando a lei de Jurim (Equação 3), relacionando altura da ascensão no capilar ( $h$ ), em metros (m), à tensão superficial da água ( $\gamma$ ), em (kg/m), à densidade ( $\rho$ ) do líquido, em quilograma por metro cúbico ( $kg/m^3$ ) e ao raio do poro ( $\tau$ ), em metro (m).



$$h = \frac{2*\gamma}{\rho*\tau} \quad (3)$$

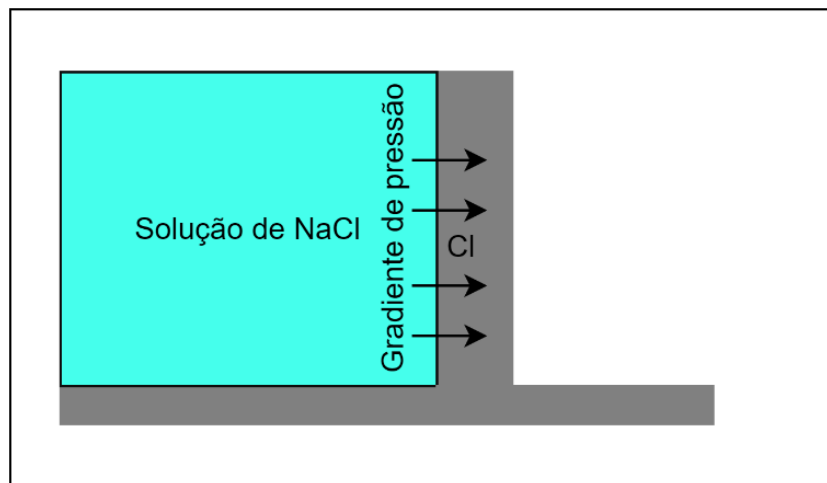
A partir do fluxo volumétrico transportado é possível determinar o fluxo máximo do agente agressivo transportado. O fluxo é dado pelo fluxo volumétrico do fluido ( $F_{fluido}$ ) [ $m^3/(m^2.s)$ ] e a concentração (C) da substância no fluido (NILSSON e TANG, 1996). Veja Equação 4.

$$j = C.F_{fluido} \quad (4)$$

### 2.1.2. Permeabilidade

O mecanismo de transporte por permeabilidade consiste no fluxo de um fluido pela rede porosa de um material, influenciada por um gradiente de pressão (Figura 2). Essa situação ocorre em situações específicas, como em estruturas submersas ou parcialmente submersas.

**Figura 2 - Representação esquemática do transporte de cloretos por permeabilidade**



Fonte: HELENE (1993a).

A permeabilidade do concreto está diretamente ligada à rede de poros. Segundo Pereira, Rice e Skalny (1988), a permeabilidade do concreto é fortemente afetada pela estrutura da pasta de cimento hidratada perante a sua estrutura de poros (tamanho e distribuição espacial, formato e conectividade). Para Helene (1993a), a permeabilidade da pasta de cimento depende da composição do cimento, da relação água/cimento e do grau de hidratação da pasta de cimento.

Em regime laminar, estacionário e não turbulento, a permeabilidade pode ser modelada pela lei de Darcy. Ver Equação 5.

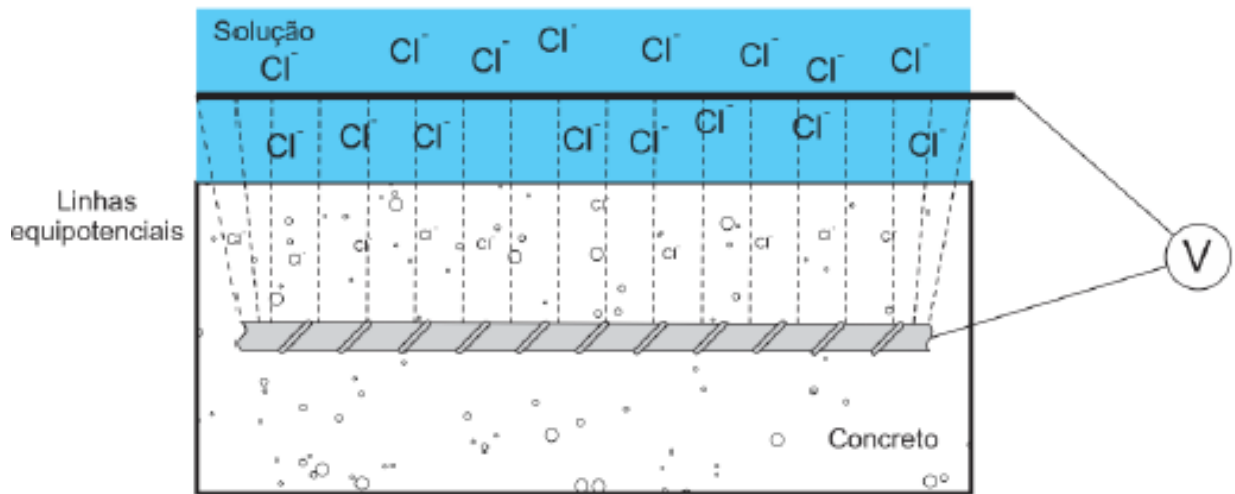
$$j = -\frac{kp}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (5)$$

Onde:  $j$  = fluxo de massa da substância, em kg/m<sup>2</sup>s;  $\eta$  = viscosidade do fluido, em Ns/m<sup>2</sup>;  $\frac{\partial p}{\partial x}$  = gradiente de pressão, em N/m<sup>2</sup>me  $Kp$  = coeficiente de permeabilidade do material, em m/s.

### 2.1.3. Migração iônica

A migração iônica é um mecanismo de transporte forçado de íons, através dos poros do concreto, pela ação de um campo elétrico que atua como força motriz, este podendo esse ser resultado de pilhas eletroquímicas ou de uma diferença de potencial (d.d.p.) gerado por uma fonte externa (HELENE, 1993a). Observe a representação esquemática desse mecanismo de transporte, quando é gerado uma d.d.p. no meio externo, na Figura 3.

**Figura 3 - Representação esquemática do transporte de cloretos por migração iônica**



Fonte: FERREIRA (2015).

A lei geral de transferência de massa em eletrólito dada pela equação de Nernst-Planck, segundo Andrade (1993) se adicionado os efeitos de difusão e convecção pode ser escrita da forma que se segue (Equação 6):

$$-j_j(x) = D_j \frac{\partial C_j(x)}{\partial x} + \frac{Z_j F}{RT} D_j C_j \frac{\partial E(x)}{\partial x} + C_j V(x) \quad (6)$$

Onde:  $J(x)$  = fluxo de massa da espécie iônica (kg/m<sup>2</sup>s);  $D_j$  = coeficiente de migração de cloretos (m<sup>2</sup>/s);  $R$  = coeficiente universal dos gases (8.3144 J/mol.k);  $T$  = temperatura do ambiente (k);  $Z$  = valência do íon, para cloretos é -1;  $F$  = constância

de Faraday (96485,33 J/V.mol);  $\partial E$  = variação do campo elétrico (V);  $\partial x$  = variação da distância (m);  $V(x)$  = velocidade de convecção em (m/s)

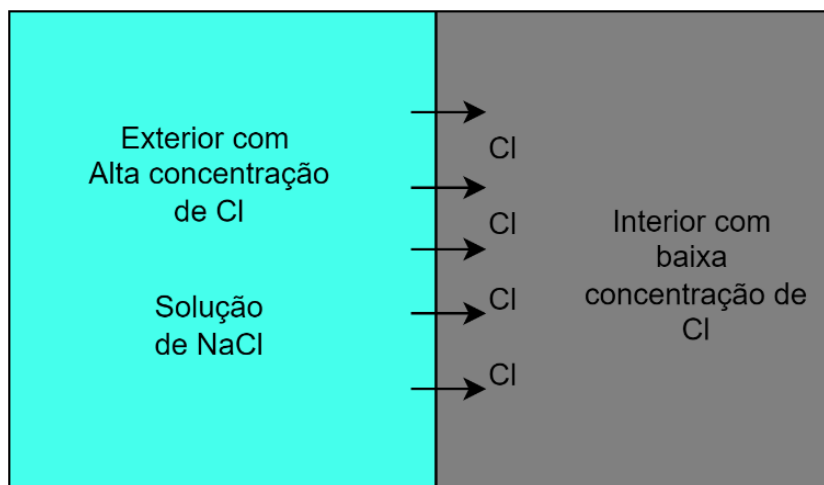
Por fim, admitindo as suposições de que não há convecção no interior do concreto e que o efeito de difusão é desprezível, se comparado ao efeito da migração sobre uma d.d.p. elevada, a Equação 6 pode ser expressa da seguinte forma (Equação 7) (ANDRADE, 1993):

$$j(x) = -\frac{zF}{RT} D_j C_j \frac{\partial E(x)}{\partial x} \quad (7)$$

#### 2.1.4. Difusão iônica

O mecanismo de transporte por difusão iônica consiste em transportar íons cloretos de uma área com alta concentração para outra com baixa concentração, buscando um equilíbrio químico, sem intervenção de um campo elétrico (Figura 4).

**Figura 4 - Representação esquemática do transporte por difusão**



Fonte: HELENE (1993a).

A quantificação da taxa com que o processo de difusão ocorre é geralmente expressa em termos de um coeficiente de difusão. De acordo com a teoria da difusão de Fick, a taxa de transporte dos íons cloretos através de uma área única de uma secção de concreto por unidade de tempo (Fluxo F) é proporcional ao gradiente de concentração de cloretos medido (CRANK, 1975) (COSTA; APPLETON, 2007b).

Existem duas equações para descrever o processo de difusão, a primeira e a segunda lei de Fick. A primeira lei de Fick considera um transporte unidirecional e

assume que a concentração é proporcional ao gradiente de concentração (Equação 8).

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (8)$$

Onde: J = fluxo de massa; X = profundidade onde se mede a quantidade de massa que penetrou; C = concentração de íons cloreto e D = coeficiente de difusão.

Já a segunda lei de Fick, levando-se em consideração o efeito do tempo no balanço de massa, assume que a concentração varia em função do tempo e da posição no interior do concreto (Equação 9).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (9)$$

Uma das soluções da Equação 9 pode ser obtida pela transformada de Laplace (CRANK, 1975), considerando um material sólido, semifinito e a concentração da solução externa constante. (Equação 10).

$$C(x, t) = C_i + (C_s - C_i) \operatorname{erfc} \frac{x}{\sqrt{4D_{ns}t}} \quad (10)$$

Onde: C(x,t) = concentração dos cloretos na profundidade x e no tempo t, (%); x = profundidade paralela ao fluxo de ingresso dos cloretos (cm); t = tempo (s); C<sub>i</sub> = concentração inicial de cloretos no interior do concreto (%); C<sub>s</sub> = concentração de cloretos na superfície do concreto (%); erf = função de erro de Gauss e D<sub>ns</sub> = coeficiente difusão no estado não-estacionário no tempo t, (cm<sup>2</sup>/s).

De maneira geral, a difusão de íons cloreto no concreto depende da natureza, dimensão e distribuição dos poros; temperatura; capacidade de ligação de íons cloretos à matriz cimentícia, que está relacionada diretamente com a composição e adições ao cimento e, por fim, do cátion presente na solução dos poros (HELENE, 1993a).

Em geral, a difusão iônica é o mecanismo de transporte predominante em estruturas de concreto. De acordo com Stanish, Hooton e Thomas, (1997) e Ferreira (2015), o mecanismo de absorção capilar limita-se à região mais externa do cobrimento. A partir de então, a difusão de íons é responsável pela continuidade do

transporte. Diante disso, esta pesquisa focará no transporte de íons cloretos por difusão iônica.

## **2.2. DIFUSIVIDADE DOS ÍONS CLORETO NO CONCRETO**

A difusividade dos íons cloreto no concreto reduz com o tempo. Isso porque o caminho da difusão iônica ocorre pela rede porosa do concreto. Ao ter o estreitamento desse caminho, consequentemente reduz-se a difusividade, sendo esse resultado do reflexo do tempo na hidratação do concreto (MAAGE *et al.*, 1996).

Segundo Dominicini e Calmon (2017), a redução da difusividade de íons cloreto no concreto, sob influência do tempo, irá depender do cimento utilizado e das adições empregadas na mistura. De acordo com Helene (1993a), a difusividade também pode ser afetada pela ligação de íons cloretos à matriz cimentícia.

Vale ressaltar que além da composição do ligante utilizado no traço, outros fatores, como umidade, temperatura, relação a/mc, concentração e fonte de íons cloreto, regime de cura e aditivo, também são conhecidos por afetar a difusividade de íons cloreto no concreto (AL-SODANI *et al.*, 2021).

Essa redução é atribuída ao refinamento da estrutura dos poros, devido ao efeito da hidratação da pasta de cimento ao longo do tempo. Dos primeiros a equacionar a relação do coeficiente de difusão variando no tempo foi Mangat e Molloy (1994), introduziram um fator de envelhecimento para justificar tal dependência, em um modelo com características empíricas.

Outro parâmetro capaz de ser medido é a resistividade elétrica do concreto. Assim como o coeficiente de difusão de cloretos, a resistividade pode ser mensurada em função do tempo (REAL, MEDEIROS e RIVAROLA, 2019; ANDRADE, D'ANDREA e RENATA, 2010). O aumento progressivo da resistividade com a hidratação do concreto, de acordo com Andrade (2018) é usado para monitorar o fator de idade do concreto, em função da resistividade.

A resistividade elétrica é uma característica geral de todos os materiais. A resistividade, por sua vez, controla o fluxo de íons que se difundem através da rede porosa do concreto. As medidas de resistividade apresentam valores na ordem  $10^2$   $\Omega$ m para o concreto saturado e  $10^6$   $\Omega$ m quando seco (HELENE, 1993a).

## **2.3. PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO BASEADA NA DIFUSÃO**

A previsão de vida útil de estruturas sujeitas a ambiente com presença de cloretos, com base na difusão, é associada à capacidade do concreto resistir ao transporte de íons cloreto até a armadura.

Um dos primeiros modelos que associou o tempo de vida útil com o início da corrosão de armadura foi apresentado por Tuutti (1982). Nesse modelo, o tempo de vida útil de uma estrutura é o intervalo entre o instante que a estrutura entra em contato com o agente agressivo, íons cloreto ou dióxido de carbono, até o momento que esse agente alcance a armadura em concentração suficientemente capaz de romper a capa passiva do aço.

A velocidade de ingresso do agente agressivo  $Cl^-$  e a capacidade de ligação desse agente à matriz cimentícia resultará em menor ou maior tempo de vida útil. Para estruturas existentes, conhecendo a concentração de cloretos (perfis de concentração), a profundidade em que foi determinada e o tempo de exposição da estrutura, calcula-se o coeficiente de difusão de cloretos. Com esse dado, é possível prever a velocidade do avanço de íons cloreto e assim calcular o tempo de vida útil restante (HELENE, 1993a).

Entretanto, vale ressaltar que não é simples prever e/ou definir o tempo de vida útil de uma estrutura, pois são muitas variáveis no sistema, tais como: condições ambientais, concentração e tipo do agente agressivo, características do concreto e do aço. Assim, a previsão de vida útil tornou-se um alvo de pesquisa em nível mundial, na busca de determinar modelos matemáticos capazes de representar a realidade das estruturas.

Tradicionalmente, o coeficiente de difusão de cloretos é calculado a partir da solução da segunda lei de Fick (Equação 9). No entanto, condições de contorno associadas à sua solução limita a aplicação dessa equação quando calculado o coeficiente de difusão de cloretos.

### 2.3.1. Solução da 2ª Lei de Fick e suas limitações

Historicamente, Crank (1975) foi o primeiro a modelar o ingresso de cloretos usando as leis de difusão. Segundo Crank (1975, p. 11), “Soluções gerais da equação de difusão podem ser obtidas para uma variedade de condições iniciais e de contorno desde que o coeficiente de difusão seja constante”.

Para a transformada de Laplace, em um meio semi-infinito ( $X > 0$ ), as seguintes condições iniciais são admitidas:

- I. o concreto é um material homogêneo;
- II. o único mecanismo de transporte atuante é a difusão;
- III. não ocorrem interações entre os cloretos e os componentes do concreto no momento da penetração;
- IV. o meio considerado é semi-infinito ( $X > 0$ );
- V. a concentração inicial de cloretos e o tempo é zero ( $C_i = 0$ ;  $t = 0$ )

No entanto, algumas dessas condições não representam o comportamento exato do transporte de cloretos na matriz cimentícia. Em situações de estruturas situadas em zona de atmosfera marinha, por exemplo, o mecanismo de transporte pode atuar de forma combinada, absorção + difusão, acelerando o transporte.

Para isso, então, outras condições devem ser admitidas, como: o período de absorção; a variação do coeficiente de difusão e da concentração de cloretos na superfície do concreto ao longo do tempo; a dependência do coeficiente de difusão com a concentração de cloretos na superfície; a influência do tipo de cimento no coeficiente de difusão de cloretos; o grau de saturação de água do concreto; além da capacidade de ligação de cloretos à matriz cimentícia (ANDRADE, 2001), admitindo um coeficiente de difusão que varia com o tempo (maturidade) do concreto.

Mangat e Molloy (1994), foram uns dos primeiros a equacionar a relação do coeficiente de difusão com o tempo, introduzindo um fator de envelhecimento para justificar tal dependência, em um modelo com características empíricas. A equação 11 expressa matematicamente o modelo proposto para o coeficiente de difusão em função do tempo por Mangat e Molloy:

$$D(t) = D_0 \left( \frac{t_0}{t} \right)^{-n} \quad (11)$$

Onde:  $D(t)$  = Coeficiente de difusão no tempo  $t$  (final);  $D_0$  = Coeficiente de difusão inicial (geralmente aos 28 dias);  $t_0$  = Tempo inicial (geralmente aos 28 dias);  $t$  = tempo final de exposição;  $n$  = fator de idade.

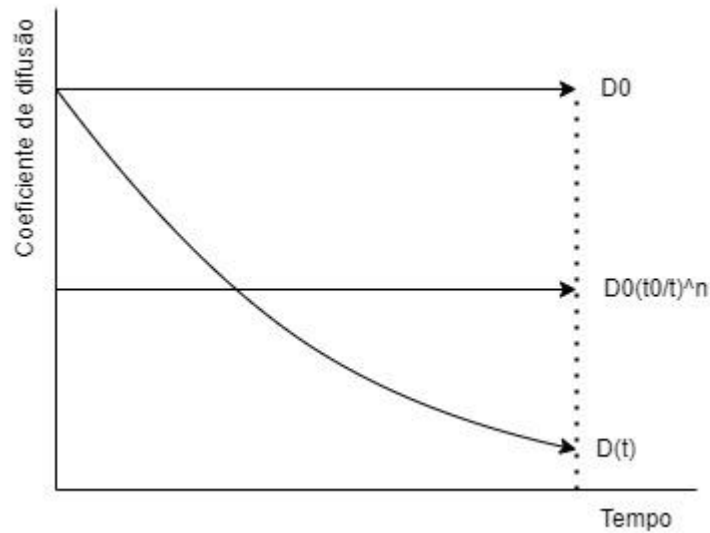
Observa-se pelo arranjo da equação que, para determinar o fator de idade, é necessário ter conhecimento do coeficiente de difusão no tempo  $t$ , o qual foi determinada pela equação 10. Segundo Visser; Gaal; Rooij de, (2002) calcular perfis

por equações separadas, leva a dados errôneos. Uma forma de minimizar os erros é incorporar a equação 11 na equação 10 e assim poder calcular o coeficiente de difusão considerando o tempo de exposição (Equação 12).

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_i) \operatorname{erf} \frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_0 \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \cdot t}} \quad \text{Para: } n > 0; n \neq 1 \quad (12)$$

A Equação 12 é válida para um coeficiente de difusão constante em um tempo  $t$ , classificada por Gaal (2004) como um coeficiente de difusão semi-dependente do tempo, representado na Figura 5 como  $D(0)(t_0/t)^n$ .

**Figura 5 - Coeficientes de difusão dependentes do tempo.**



Fonte: Gaal; Koenders e Polder (2006).

Segundo Visser, Gaal e Rooij, (2002) aplicando integral na Equação 11, considerando os limites de tempo 0 (início de exposição do concreto ao agente agressivo) até o tempo  $t$  (tempo total de exposição da amostra), será considerado todo o histórico de tempo de exposição, como apresentado na Equação 13. Dessa forma, tem-se uma metodologia de cálculo mais eficiente para representar a realidade da estrutura quanto à velocidade de difusão de íons cloreto.

$$\int_0^t D(t) dt = \frac{D_0}{1-n} \left(\frac{t_0}{t}\right)^n * t \quad (13).$$

Quando adicionada a Equação 13 na Equação 10, é possível determinar um coeficiente de difusão em função do tempo de forma integral. No entanto, a Equação



14 é indeterminada, quando se tem disponível apenas um perfil (VISSER; GAAL e ROOIJ, 2002).

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_i) \operatorname{erf} \frac{x}{\sqrt{4 \cdot \frac{D_0}{1-n} \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \cdot t}}; \text{Para: } 0 < n < 1 \quad (14)$$

Gaal; Koenders e Polder, (2006) observaram que, quando trabalhado com amostras em laboratório, existe um tempo de cura para as amostras, para então dar início ao período de exposição ao agente agressivo, e esse tempo deve ser considerado nos cálculos. Desse modo, a integral aplicada na Equação 11 deve considerar o tempo de cura dessas amostras até o momento de exposição, representado na Equação 15.

$$\int_{t_s}^{t_s+t_{exp}} D(t) dt = \frac{D_0}{1-n} * t_0^n \left[ (t_s + t_{exp})^{1-n} - t_s^{1-n} \right]; (t_s + t_{exp} = t) \quad (15)$$

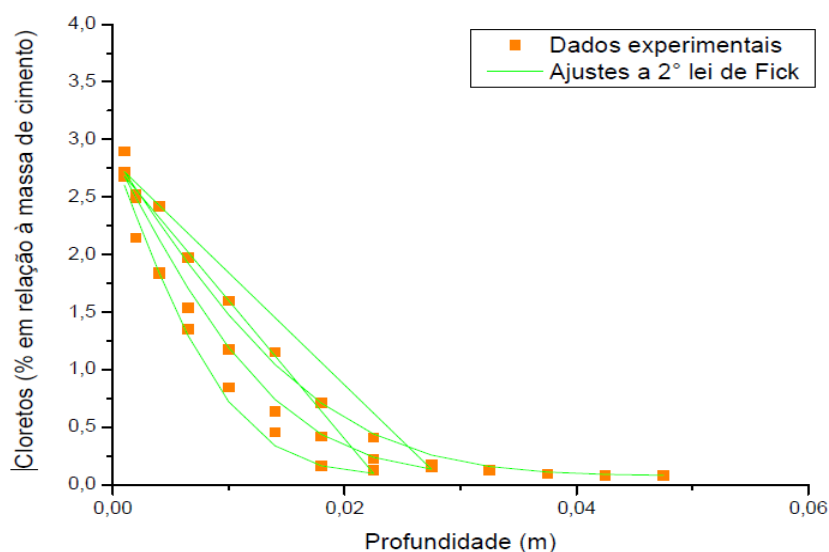
Onde:  $t_s$  = idade de início da exposição ao agente agressivo;  $t_{exp}$  = duração do ensaio;  $t$  = tempo (idade total da amostra); e  $t_0$  = tempo inicial (28 dias) (s).

Então, aplicando a Equação 15, na Equação 10, tem-se a Equação 16, totalmente dependente do tempo, segundo Gaal, Koenders e Polder, (2006).

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_i) \operatorname{erf} \frac{x}{\sqrt{4 \cdot \frac{D_0}{1-n} * t_0^n [t^{1-n} - t_s^{1-n}]}; (t > t_s); \quad (16)$$

Assim, como a Equação 14, o ajuste da Equação 16 só é possível quando se tem disponível dois ou mais perfis de cloretos pois, para a condição de apenas um perfil, tem-se três constantes a serem definidas, coeficiente de difusão inicial ( $D_0$ ), concentração de cloretos superficiais ( $C_s$ ) e fator de idade ( $n$ ), e apenas dois dados de entrada. Para solucionar essa situação, dois ou mais perfis de cloretos da mesma amostra podem ser avaliados simultaneamente, como mostra a Figura 6.

**Figura 6 -- Ajuste da 2ª lei de Fick a três perfis de forma simultânea**



Fonte: Autora (2022).

Gaal, Koenders e Polder (2006) validaram o modelo proposto (Equação 16) com os dados da pesquisa Bamforth (1998) para concretos compostos com escória granulada de alto forno, submetida a três regimes de cura. Os autores ressaltam que, com esta solução, é possível determinar a entrada de cloretos para diferentes períodos de cura.

Embora tenha sido apresentado que o cálculo do coeficiente de difusão inicial ( $D_0$ ), da concentração de cloretos superficiais ( $C_s$ ) e do fator de idade ( $n$ ) tenham resultados mais precisos pela abordagem da 2ª lei de Fick totalmente dependente do tempo, apresenta por Gaal (2004); Gaal, koenders e polder (2006); Visser, Gaal e Rooij (2002), aplicando a Equação 16, a aplicação da Equação 11 é amplamente aplicada na determinação desses parâmetros. (ANDRADE, CASTELLOTE e D'ANDREA, 2011a; BAMFORTH, 1998; MARKESET e SKJØLSVOLD, 2010; MOFFATT E THOMAS, 2018; STANISH e THOMAS, 2003).

## **2.4.PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO BASEADA NA RESISTIVIDADE**

A aplicação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para modelagem da previsão de vida útil ainda é um fato recente. O modelo proposto por Andrade (2004), Equação 17, foi o primeiro nessa linha de pesquisa (ANDRADE e D'ANDREA, 2010). Ele pode ser aplicado tanto para o período de iniciação quanto para o período de propagação.

$$t_l = \frac{x^2 * \rho_{ef} \left(\frac{t}{t_0}\right)^q * r_{cl,co2}}{F_{cl,co2}} + \frac{P_{corr} * \xi * \rho_m \left(\frac{t}{t_0}\right)^q}{K_{corr}} \quad (17)$$

Onde:  $P_{corr}$  = seção transversal de aço encontrada no tempo;  $\rho_{ef}$  = resistividade a 28 dias em condições saturadas (efetiva ou superficial);  $\rho_m$  = resistividade média para um clima particular;  $q$  = fator de idade para resistividade;  $K_{corr}$  = constante com um valor de 26  $\mu A/cm^2 \cdot k\Omega \cdot cm$  a 26 mV/cm relacionando a resistividade e a taxa de corrosão  $I_{corr}$ ;  $x$  = profundidade de carbonatação ou penetração do limiar de cloretos;  $\xi$  = é um fator de tempo, depende das condições ambientais, do clima;  $r_{cl,co2}$  = fator de reação dos cloretos com a pasta de cimento;  $t$  = tempo final de exposição; e  $t_0$  = tempo de referência.

Segundo Real (2015), o modelo foi aplicado recentemente para desenvolvimento do concreto aplicado na ampliação do canal do Panamá. Todo o programa experimental está detalhado em Andrade *et al.*, (2014). Em Andrade (2018) é apresentado exemplo prático de como aplicar as variáveis no modelo, desde a introdução dos dados de entrada até calcular o tempo de iniciação da corrosão.

Medeiros Junior (2014) também trabalhou o modelo proposto por Andrade (2004), com o objetivo de ajustar os parâmetros do modelo para a realidade de dimensionamento de concretos nacionais, determinando o fator de reação dos cloretos ( $r_{cl}$ ) e o fator de idade ( $q$ ), para diferentes amostras. Real, Medeiros e Rivarola (2019) também estudaram a influência de adições pozolânica de alta reatividade sobre o fator de idade ( $q$ ).

Os resultados encontrados por Real, Medeiro e Rivarola (2019) e Medeiros Junior (2014) serão apresentados no decorrer do texto.

#### 2.4.1. Fator de idade em função da resistividade elétrica do concreto

A medida que a RES evolui com o tempo, devido à hidratação do concreto, um fator de idade ( $q$ ) é introduzido para justificar o aumento de resistividade do concreto (REAL, MEDEIROS e RIVAROLA, (2019) ANDRADE, D'ANDREA e RENATA, (2010) (MEDEIROS JUNIOR (2014). Esse fator de idade é obtido pela Equação 18.

$$\rho_t = \rho_0 \left(\frac{t}{t_0}\right)^q \quad (18)$$

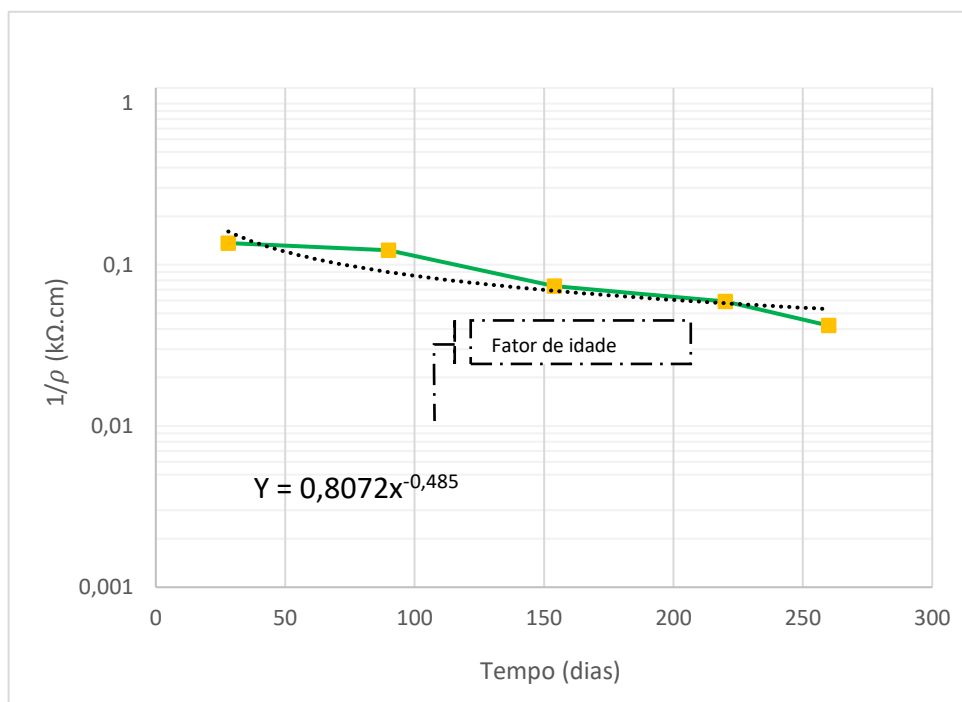
Onde:  $\rho_t$  = é a resistividade em qualquer idade;  $\rho_0$  = a resistividade elétrica superficial na primeira medição;  $t$  = é a idade da última medição;  $t_0$  = idade da primeira medição; e  $q$  = é o fator de idade.

Reorganizando a Equação 18 e aplicando log10, o fator  $q$  pode ser calculado diretamente pela Equação 19 (PRESUEL-MORENO, WU e LIU, 2013).

$$q = \frac{\log\left(\frac{\rho_t}{\rho_0}\right)}{\log\left(\frac{t}{t_0}\right)} \quad (19)$$

O fator  $q$  também pode ser definido graficamente, se o inverso da resistividade for plotado em função do tempo, podendo, dessa forma, ser obtido diretamente pela inclinação da curva de regressão (ANDRADE e D'ANDREA, 2010) (Figura 7.).

Figura 7 - Exemplo de como calcular o fator de idade ( $q$ ) graficamente



Fonte: Autora (2022).

## 2.5. FATOR DE IDADE DO CONCRETO (FATOR DE ENVELHECIMENTO)

O fator de idade é um parâmetro matemático que se relaciona com o refinamento do sistema de poros do concreto, decorrente da hidratação do cimento ao longo do tempo (ANDRADE, CASTELLOTE, D'ANDREA, 2011).

Para previsões de vida útil de uma estrutura de concreto armado, é fundamental considerar o impacto da maturação do concreto frente à ação de agentes agressivos, os íons cloreto, admitindo um parâmetro de correção, o fator de idade ( $n$ ,  $q$ ), tanto nos modelos com base na difusão de íons cloreto quanto nos modelos com base na resistividade elétrica do concreto.

Para obter resultados para o fator de idade em amostras de concreto é preciso longos períodos de exposição em ambiente natural ou em laboratório, pois, para curtos períodos de exposição as determinações podem ser equivocadas, não representando a realidade da estrutura ao longo da sua vida útil.

Dentre os resultados encontrados com amplo uso em publicações, tem-se as determinações validadas de Bamforth (1999), com dados de fator de idade para modelos com base na difusão de cloretos; e de Andrade e D'Andrea (2010), para modelos fundamentados na resistividade elétrica do concreto.

## **2.6. VAREÁVEIS QUE INFLUENCIAM O FATOR DE IDADE**

O fator de idade pode ser influenciado por diversos fatores, que estão ligados ao sistema de poros do concreto (AUDENAERT *et al.*, 2010). Entre os principais fatores estão: o tipo do cimento, o uso de adições minerais, a relação água/aglomerante, além das condições ambientais, como temperatura, umidade relativa, concentração de cloretos e tempo de exposição.

São abordados na sequência resultados para o fator de idade encontrados na literatura, calculados e apresentados em relação ao tipo de cimento, adições minerais e relação água/aglomerante. Esse valor varia entre 0 – 1 e seu resultado é associado a cada mistura, pois cada uma terá tempo de maturação diferente.

Como já colocado anteriormente, Mangat e Molloy (1994) foram uns dos primeiros a introduzir um fator de idade em modelos de previsão de vida útil baseado na segunda lei de Fick, para corrigir a redução do coeficiente de difusão em função do tempo. Inicialmente, eles atribuíram a relação água/cimento como única variável de influência sobre o fator de idade. Apresentaram uma relação capaz de definir o fator de idade sabendo apenas a relação água/cimento ( $a/c$ ), ( $n = 2,5*(a/c) - 0,60$ ).

Dando continuidade aos estudos de emprego e determinação do fator de idade, Bamforth (1998) propôs valores de entrada para o fator de idade para três tipos de concreto (Tabela 1).

**Tabela 1 - Valores de  $n$  para diferentes traços de concreto**

Nomenclatura	Cimento + adição	$n$
CPO	Cimento puro	0,264
concreto pfa	com cinza volante	0,699
concreto ggbs	Com escoria granulada de auto forno	0,621

Fonte: Bamforth (1998).

Embora Bamforth (1998) tenha determinado o valor do fator  $n$  de 0,699 para concretos com presença de cinza volante, Stanish e Thomas (2003) em seus resultados mostraram que a quantidade de cinza volante presente no traço influencia no valor de  $n$  (Tabela 2). Quanto maior a quantidade de cinza volante, mais próximo o fator de idade chega a 1, conseqüentemente, maior redução no coeficiente de difusão.

**Tabela 2 - Valores para  $n$  variando o traço e a quantidade de cinza volante na mistura**

Nomenclatura	Cimento + adição	$n$
Controle	CP V ARI	0,320
25% Fly ash	25% de cinza volante	0,660
56% Fly as	56% de cinza volante	0,790

Fonte: Stanish e Thomas (2003).

A combinação de adições minerais pode ser utilizada. Os resultados apresentados por Markeset e Skjølsvold (2010), Tabela 3, mostram que, quando realizada a aplicação de duas diferentes adições minerais na mistura, o fator de idade também sofre alteração.

Além disso, os resultados apresentados por Moffatt e Thomas (2018), Tabela 4, corroboram com os resultados de Markeset e Skjølsvold (2010), quanto à diferença no valor do fator de idade  $n$  quando adicionado adições minerais em substituição ao cimento. Além dessa observação, percebe-se que o fator de idade não apresenta alteração quando reduzida a relação água/aglomerante.

**Tabela 3 - Valores para  $n$ , para diferentes adições minerais**

Nomenclatura	Cimento + adição	$n$
CEM I	Cimento puro	0,190
	8-10% de sílica ativa	0,380
	20% de sílica ativa	0,430
CEM I com	10-20% de cinza volante	0,400
	35% de cinza volante	0,520
	20% de cinza volante + 4-5% de sílica ativa	0,460
	20% de cinza volante + 8-10% de sílica ativa	0,450

Fonte: Markeset e Skjølsvold (2010).

**Tabela 4 - Valores de  $n$  para diferentes misturas**

Nomenclatura	Cimento + adição	Relação a/c	$n$
TIPO I PC	13,6% de cinza volante + 6,40% de sílica ativa	0,40	0,310
	13,6% de cinza volante + 6,40% de sílica ativa	0,50	0,310
	Cimento puro	0,50	0,200
	13,6% de cinza volante + 6,50% de sílica ativa	0,60	0,310
	Cimento puro	0,60	0,200
	5,7% de sílica ativa	0,26	0,200
	7,5% de sílica ativa	0,34	0,200

Fonte: Moffatt e Thomas (2018).

Além das contribuições físicas e química do concreto sobre o fator de idade, as soluções aplicadas e as condições de contorno utilizadas também interferir no resultado de cálculo do fator de idade.

Para o cálculo do fator de idade  $n$ , quando aplicada uma solução semi-dependente do tempo (Equação 11), os concretos com presença de adição mineral apresentam um fator de idade maior, se comparado com resultados de cálculo com equação totalmente dependente do tempo (Equação 16) (GAAL, KOENDERS e POLDER, 2006).

Para uma abordagem semi-dependente do tempo, o fator  $n$ , para misturas sem adição, varia de 0,200 a 0,320 e para concretos com adições minerais, esse intervalo varia entre 0,200 e 0,699. Entretanto, para uma abordagem totalmente dependente do tempo, o valor do fator  $n$  obtido foi de 0,120, para concreto com cimento portland e 0,580, para concretos contendo cinza volante apenas. A mistura com escória granulada de alto forno fugiu da afirmação, com valor de 0,999 (Tabela 5).

**Tabela 5 - valores para  $n$  calculado a partir de uma abordagem totalmente dependente do tempo**

Nomenclatura	Cimento + adição	Relação a/c	$n$
CPO	Cimento puro	0,66	0,264
Concreto pfa	Com Cinza Volante	0,54	0,699
Concreto ggbs	Com Escória Granulada de Alto Forno	0,48	0,621

Fonte: Visser; Gaal e Rooij, (2002)

Dados sobre aplicação de ambas as abordagens, para as mesmas misturas, são escassos, o que limitam essa comparação entre elas. Apenas o estudo do Gaal, Koenders e Polder (2006) foi identificado. Eles aplicaram os dados obtidos por Bamforth (1998) com concreto contendo escória granulada de alto forno, para um cálculo totalmente dependente do tempo, e realizaram uma comparação com o

resultado encontrado por Bamforth (1998). O resultado para o fator de idade igual a 0,201, menor do que apresentado por Bamforth (1998), que foi de 0,661.

O fator de idade a partir de medidas de resistividade também apresentam divergências em seus valores obtidos, quando se muda o tipo de cimento, a adição empregada ou a relação água cimento, isto porque cada mistura tem um comportamento diferente quanto ao tempo e ao grau de hidratação, não devendo ser avaliada da mesma forma.

Andrade e D'Andrea (2010) apresentaram resultados para o fator de idade “ $q$ ”, para traços com cimento puro, uso de uma pozolana natural e cinza volante (Tabela 6). Não foi apresentada a relação a/mc empregada em cada mistura, o que trouxe a dúvida em primeiro instante se a relação a/mc não seria uma variável importante. Mas em um trabalho posterior Andrade (2014) apresentou valores para diferentes traços de concreto contendo adições minerais com a relações a/mc empregada (Tabela 7).

**Tabela 6 - Valores de  $q$ , para diferentes tipos de cimentos europeus**

Nomenclatura	Cimento + adição	$q$	Desvio
CEM I	Cimento puro	0,220	0,01
CEM II A-P	6 a 20 (%) de uma pozolana natural	0,370	0,06
CEM II A-V	6 a 20 (%) de cinza volante	0,570	0,08

Fonte: Andrade e D'Andrea (2010).

**Tabela 7 -Valores de  $q$ , para diferentes tipos de cimentos com adições minerais**

Nomenclatura	Tipo de cimento	Cimento + adição	Relação a/mc	$q$
SMC-A11	CEM II	15% de pozolana natural + 5% de sílica	0,29	0,492
SMC-P11	CEM II	15% de pozolana natural + 5% de sílica	0,34	0,584
SMC-A50	CEM II	12,5% de pozolana natural + 5,8% de sílica	0,34	0,349
SMC-P50	CEM II	12,5% de pozolana natural + 5,8% de sílica	0,34	0,609
SMC-A56	CEM II	13% de pozolana natural	0,34	0,629
SMC-P56	CEM II	13% de pozolana natural	0,34	0,718

Fonte: Andrade (2014).

Percebe-se que os traços SMC – A56 e SMC – P56 e o CEM II A-P são semelhantes, entretanto o fator de idade calculado para SMC – A56 foi 70% maior do que CEM II A-P e que para SMC – P56 foi 94% maior do que CEM II A-P. Não foi apresentado o fator água/cimento utilizado por Andrade e D'Andrea (2010), o que sugere que elas tenham trabalhado com fatores diferentes do que foi trazido por Andrade (2014), mas isso não é possível afirmar com precisão.



Em um contexto nacional, Gans Medeiros e Lima, (2017) trabalharam com concretos produzidos com CP V-ARI e CP III e calcularam o fator de idade para esses concretos com um fator  $a/c$  de 0,50, como apresentado na (Tabela 8).

**Tabela 8 - Fator de idade para diferentes tipos de cimentos nacionais**

Nomenclatura	Relação $a/c$	$q$
CP V	0,50	0,402
CP III RS		0,582

Fonte: Gans, Medeiros e lima, (2017).

Medeiros Junior (2014) calculou o fator  $q$  para as relações  $a/c$  de 0,40, 0,50 e 0,60, para cimentos dos tipos CP II F 32, CP III 40 RS, CP IV 32 e CP V ARI (Tabela 9). No ano seguinte, foram apresentados os resultados de Real (2015) para concretos com diferentes tipos de cimentos brasileiros, com traços utilizando cinza volante em uma faixa de variação de substituição do cimento pela adição mineral de 10 % e 30 % (Tabela 10) e dando continuidade na investigação de determinar um fator  $q$  para o concreto nacional. Posteriormente, Real; Medeiros e Rivarola, (2019) apresentaram valores de  $q$  para diferentes traços compostos com adição mineral de alta reatividade com substituição de 10% em massa do cimento (Tabela 11).

**Tabela 9 - Valores de  $q$  para diferentes relações água/cimento e tipos de cimentos brasileiros**

Nomenclatura	Relação $a/c$	$q$	Desvio
CP II F 32	0,4	0,415	0,031
CP II F 32	0,5	0,535	0,027
CP II F 32	0,6	0,602	0,054
CP III 40 RS	0,4	0,532	0,016
CP III 40 RS	0,5	0,594	0,035
CP III 40 RS	0,6	0,616	0,02
CP IV 32	0,4	0,738	0,007
CP IV 32	0,5	0,78	0,005
CP IV 32	0,6	0,785	0,03
CP V-ARI	0,4	0,297	0,012
CP V-ARI	0,5	0,384	0,052
CP V-ARI	0,6	0,547	0,029

Fonte: Medeiros Junior (2014).

**Tabela 10 - Valores de  $q$  para diferentes tipos de cimentos nacionais**

Tipo de cimento	Relação a/mc	$q$
CP V - ARI	0,45	0,23
CP II - Z	0,45	0,87
CP IV	0,45	0,96
CP V - ARI + 10% de substituição por cinza volante	0,45	0,42
CP V - ARI + 30% de substituição por cinza volante	0,45	0,97

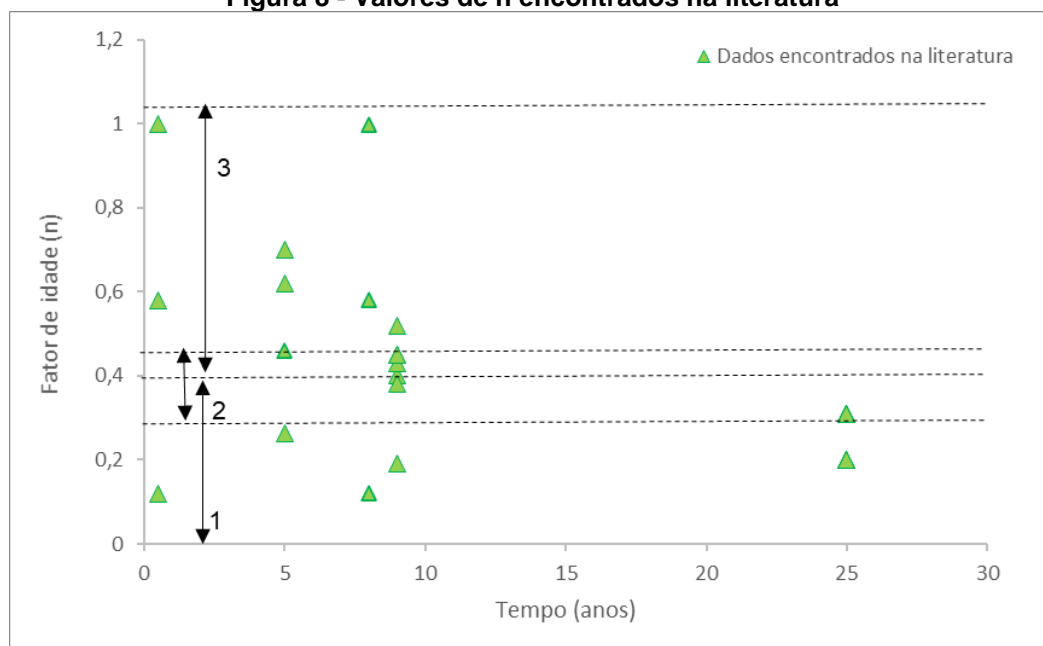
Fonte: Real (2015).

**Tabela 11 - Valores de  $q$  para cimento CP V -ARI e cimento com adição mineral de alta reatividade com substituição de 10%**

Nomenclatura	Cimento + adição	Relação a/c	$q$
TCPV	CP V - ARI	0,45	0,220
TSCA	CP V - ARI - 10% de cinza da casca de arroz	0,45	0,450
TM	CP V - ARI - 10% de metacaulim	0,45	0,260
TSA	CP V - ARI - 10% de sílica ativa	0,45	0,220

Fonte: Real, Medeiros e Rivarola, (2019).

É notável que há uma variação de valores para o fator de idade ( $n$ ,  $q$ ). Nas Figuras 8 e 9 foram plotados os valores encontrados na literatura para  $n$  e  $q$ , aqueles tabelados anteriormente no desenvolvimento do texto.

**Figura 8 - Valores de  $n$  encontrados na literatura**

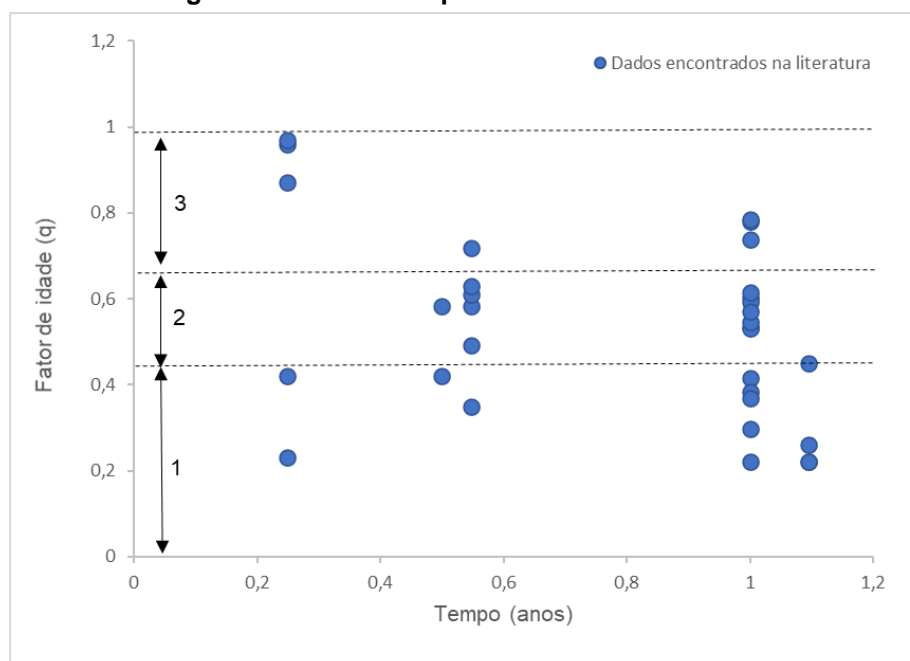
1 – Concreto sem adição; concreto com adição de sílica ativa

2 – Concreto com adição de sílica ativa + cinza volante

3 – Concreto com adição de escória granulada de auto forno; concreto com adição de cinza volante

Fonte: Compilados pela autora (2022).

**Figura 9 - Valores de q encontrados na literatura**



1 – Concreto sem adição; concreto com adição de sílica ativa; concreto com adição de metacaulim  
 2 – Concreto com adição de cinza da casca de arroz, concreto com cimento CP III, concreto com CP II F  
 3 – Concreto com adição de cinza volante, concreto com cimento CP IV; concreto com cimento CP II Z

Fonte: Compilados pela autora (2022).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os materiais utilizados e os métodos aplicados no desenvolvimento deste trabalho. Os procedimentos experimentais foram realizados com o intuito de caracterizar o concreto e determinar o fator de idade para as misturas trabalhadas em ambiente de laboratório.

Desse modo, a pesquisa foi dividida em quatro etapas:

- ✓ A primeira etapa foi composta pela obtenção e caracterização dos materiais (agregados, cimento, aditivo, sílica ativa, metacaulim e cinza volante) utilizados na composição das misturas de concreto estudadas.
- ✓ A segunda etapa compreendeu em definir o traço, realizar a moldagem e preparo das amostras para serem expostas aos seus devidos meios de exposição (solução de íons cloreto [2,8 M], ensaio de difusão e saturação para ensaio de resistividade elétrica superficial) e preparo das amostras para titulação potenciométrica.
- ✓ A terceira etapa foi composta pela realização dos ensaios: de resistência à compressão mecânica aos 28 e 90 dias; absorção total por imersão aos 90 dias após moldagem; de resistividade elétrica superficial, para

idades de 28, 90, 180, 220 e 260 dias após moldagem; de difusão de cloretos com 35, 90 e 180 dias de exposição ao ambiente agressivo de solução de NaCl.

- ✓ A quarta etapa consistiu em realizar as regressões não lineares, quando necessário, calcular o fator de idade e, por fim, analisar os dados obtidos.

A primeira e segunda etapas estão discriminadas com detalhes nos itens a seguir. Em relação a terceira e quarta etapas, são apresentados apenas os métodos aplicados para a realização dos ensaios e soluções empregadas para cálculos, com base no que foi apresentado no referencial teórico.

### **3.1. PRIMEIRA ETAPA: OBTENÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS E SUA CARACTERIZAÇÃO**

#### **3.1.1. Materiais utilizados e formas de obtenção**

– **Cimento:** foi utilizado o cimento CP V ARI MAX, adquirido no mercado local da cidade de João Pessoa – PB.

– **Cinza volante:** fornecida pela empresa Comércio de Cinzas Lima Ltda., localizada na cidade de Capivari de Baixo – SC, a amostra foi coletada por uma transportadora na sede da empresa, em um saco de 50 kg.

– **Sílica ativa:** a sílica ativa empregada foi da marca SILMIX, adquirida na empresa Tecnosil Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda, localizada no município de Itupeva – SP.

– **Metacaulim:** material da marca HP do Brasil, fabricado pela Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda., adquirido na empresa Casa do Impermeabilizante Ltda., em Recife-PE.

– **Agregado miúdo:** o agregado miúdo utilizado foi uma areia média de leito de rio, de natureza quartzosa, classificada como ótima, conforme as especificações da NBR 7211: 2009 (ABNT, 2009), disponível no comércio local da cidade de João Pessoa – PB.

– **Agregado graúdo:** o agregado graúdo usado foi a pedra britada, de origem granítica, com dimensão máxima característica de 19 mm. Trata-se de um agregado pertencente à zona granulométrica d/D de 9,5/25, classificada como brita 1, de acordo

com a NBR 7211: 2009 (ABNT, 2009), disponível no mercado local da cidade de João Pessoa – PB.

– **Aditivo:** o aditivo químico utilizado foi um superplastificante, à base de policarboxilato, livre de cloretos, ADVA™ CAST 525, produzido pela Grace, visando manter a trabalhabilidade do concreto.

– **Água:** água potável distribuída pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA).

### 3.1.2. Caracterização dos materiais

Nesse subitem são listados os ensaios aplicados para caracterização dos materiais usados na produção dos concretos. A Tabela 12 foi alimentada com os ensaios normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Além desses ensaios foram realizados os ensaios de: granulometria a laser, difração de raios-X (DRX), fluorescência de raios-X (FRX) e análise termogravimétrica (TGA). Brevemente será comentado a seguir sobre esses ensaios não normatizados.

**Tabela 12 - Ensaios normatizados de caracterização dos insumos e concretos**

Ensaio	Material	Norma
Distribuição da curva granulométrica	Agregado graúdo	NBR NM 248: 2003
	Agregado miúdo	
Dimensão máxima característica (mm)	Agregado graúdo	NBR 7211: 2009
	Agregado miúdo	
Massa específica (g/cm³)	Agregado graúdo	NBR NM 53: 2009
	Agregado miúdo	NBR NM 52: 2009
	CP V ARI MAX	
	Cinza volante	
	Sílica ativa	
	Metacaulim	
Massa unitária estado solto (g/cm³)	Agregado graúdo	NBR NM 45: 2006
	Agregado miúdo	
Módulo de finura	Agregado miúdo	NBR 7211: 2009
Absorção de água (%)	Agregado graúdo	NBR NM 53: 2009
Impurezas orgânicas (+/- clara)	Agregado miúdo	NBR NM 49: 2001
Material pulverulento (%)	Agregado miúdo	NBR NM 46: 2003
Torrões de argila (%)	Agregado miúdo	NBR 7218: 2009
IAP com cimento	CP V ARI MAX	NBR 5752: 2014
	Cinza volante	
IAP com cal	Metacaulim	NBR 5751: 2015
	Cinza volante	
	Sílica ativa	
Abatimento do tronco de cone	Concreto fresco	NBR 16889: 2020
Resistência a compressão	Concreto endurecido	NBR 5739: 2018
Absorção de água por imersão	Concreto endurecido	NBR 9778: 2009
Resistividade elétrica superficial do concreto	Concreto endurecido	ASTM G57-6: 2012
Difusão de cloretos	Concreto endurecido	NT BUILD 443: 1995

Fonte: Autora (2022).

#### 3.1.2.1. Granulometria a laser

A distribuição granulométrica dos aglomerantes foi obtida por meio da aplicação da técnica de difração a laser, utilizando o analisador de tamanho de partículas modelo CILAS 1090, pelo método seco. O ensaio foi realizado no laboratório de metalografia da Universidade Federal da Paraíba – UFPB. Vale salientar que o equipamento analisa uma faixa granulométrica entre 0,1  $\mu\text{m}$  a 500  $\mu\text{m}$ , e as distribuições correspondem aos diâmetros concentrados de 10%, 50% e 90%. Essa técnica foi aplicada para todos os finos trabalhados.

#### 3.1.2.2. Difração de raio-X (DRX)

A técnica de difração foi aplicada nas amostras de metacaulim, cinza volante e sílica ativa na condição de amostra pura e nas pastas das misturas propostas neste trabalho na idade de 90 dias. Esse método consiste em uma técnica semiquantitativa de identificação de minerais. Esse processo ocorre a partir da análise dos feixes de raios-X difratados, medidos por detectores de área em difratômetros. A análise baseia-se na leitura dos ângulos e intensidades registradas no difratômetro (BUENO, 2020). Na caracterização foi aplicada radiação de Cu com varredura entre 5° e 70°, passo de 0,02° e tempo de contagem de 5 s.

#### 3.1.2.3. Fluorescência de raios-X (FRX)

A análise por fluorescência de raios-X (FRX) é uma técnica quantitativa, largamente utilizada para identificação de elementos químicos ( $Z > 10$ ) presentes, além de estabelecer a concentração, por proporção, dos elementos presentes (BUENO, 2020). Esse ensaio foi aplicado para todos os finos.

A Fluorescência de Raio-X das amostras foi analisada em pó por dispersão de energia (FRX-DE) com o equipamento X-MET 5100 da Oxford Instruments. O método para quantificar os elementos na amostra foi o Soil\_LE\_FP. Esse método determina elementos leves usando parâmetros fundamentais.

#### 3.1.2.4. Análise termogravimétrica

O ensaio de termogravimetria (TG) é uma técnica termoanalítica que acompanha a variação de massa da amostra, em função da temperatura aplicada. Já

a DTG trata-se de um arranjo matemático, é a derivada primeira da TG. (DENARI E CAVALEIRO, 2012).

Segundo Filho *et al.*, (2017), a técnica de TG/DTG permite quantificar o teor de hidratos formados, a Portlandita consumida por atividade pozolânica e a carbonatação da amostra. Desse modo, optou-se por avaliar a hidratação da pasta na idade de 90 dias, considerando que as adições pozolânicas empregadas não teriam atingido um nível de reação elevado na idade de 28 dias.

Diante disso, foram produzidas pastas de igual proporção aos traços de concreto, mantendo-se a quantidade de cimento. Essas pastas foram mantidas em cura submersa para evitar a carbonatação até o momento de realizar o ensaio.

Para determinar o teor de água quimicamente combinada (AQC), hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e teor de carbonato de cálcio presente na amostra, aplicaram-se as equações utilizadas por Pilar *et al.*, (2016) Equação 20 e 21. AQC aqui está relacionada à formação de C-S-H e as fases aluminato hidratados foram obtidas pela perda de massa ocorrida entre  $\approx 25^\circ\text{C}$  e  $420^\circ\text{C}$ .

$$\text{Ca(OH)}_2 = \frac{M_{\text{Ca(OH)}_2}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} * \text{H}_2\text{O} = \frac{74}{18} 4,11 * \text{H}_2\text{O} \quad (20)$$

Onde:  $\text{Ca (OH)}_2$ : é a massa molecular do hidróxido de cálcio (74);  $\text{MH}_2\text{O}$  é a massa molecular da água (18);  $\text{H}_2\text{O}$ : é a perda de massa referente à decomposição do hidróxido de cálcio (%) ocorrida entre  $\approx 420^\circ\text{C}$  e  $480^\circ\text{C}$ .

$$\text{CaCO}_3 = \frac{M_{\text{CaCO}_3}}{M_{\text{CO}_2}} * \text{CO}_2 = \frac{100}{44} * \text{CO}_2 = 2,27 * \text{H}_2\text{O} \quad (21)$$

onde:  $\text{CaCO}_3$ : é o teor de carbonato de cálcio (%);  $M_{\text{CaCO}_3}$ : é a massa molecular do carbonato de cálcio (100);  $M_{\text{CO}_2}$  é a massa molecular do dióxido de carbono (44);  $\text{CO}_2$ : é a perda de massa referente à decomposição do dióxido de carbono (%) ocorrida entre  $480^\circ\text{C}$  e  $900^\circ\text{C}$ .

### **3.2. SEGUNDA ETAPA: DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS E MOLDAGEM; PREPARO DAS AMOSTRAS PARA EXPOSIÇÃO AOS SEUS DEVIDOS MEIOS DE EXPOSIÇÃO**

#### **3.2.1. Definição dos traços e moldagem dos concretos**

Foram moldados traços de concreto convencional. Todos os traços com exceção do traço referência, utilizaram cinza volante (CV); metacaulim (MK) ou sílica ativa (SA) em substituição parcial do cimento, em massa. A escolha por trabalhar com o CP V – ARI se deu pela ausência de adições em sua composição.

O traço foi escolhido a partir de traços já utilizados em trabalhos anteriores no Grupo de Pesquisa de Materiais e Resíduos da Construção do Instituto Federal da Paraíba – IFPB (GMAT).

Foram moldados traços de 1:4 e 1:5 (cimento:agregado) com relação água/aglomerante de 0,55 (misturas finalizadas em A) 0,45 (misturas terminadas em B), para cada um com: 0% de adição, 25% de CV, 10% de MK e 8% SA, os traços em massa para 1 m<sup>3</sup>, com consumo de 367 Kg para a mistura A e 474 kg para a mistura B, Ver Tabela 13.

**Tabela 13 - Características das misturas desenvolvidas no programa experimental**

Mistura	a/mc	Composição em massa (kg/m <sup>3</sup> )							Aditivo (%)	Teor de argamassa (%)	Slump (cm)
		CPV ARI	Sílica ativa	Metacaulim	Cinza volante	Areia	Brita	Água			
CP V ARI_A	0,55	367	-	-	-	837	977	202	-	55,2	7
CP V ARI_8%SA_A		338	29	-	-	837	977	202	0,3	55,2	8
CP V ARI_10%MK_A		330	-	37	-	837	977	202	0,3	55,2	8
CP V ARI_25%CV_A		275	-	-	92	837	977	202	-	55,2	8
CP V ARI_B	0,45	474	-	-	-	754	939	213	0,3	56,6	9
CP V ARI_8%SA_B		436	38	-	-	754	939	213	0,5	56,6	8
CP V ARI_10%MK_B		427	-	47	-	754	939	213	0,4	56,6	7
CP V ARI_25%CV_B		356	-	-	119	754	939	213	0,2	56,6	9

Fonte: Autora, 2022.

Os concretos foram produzidos no Laboratório de Ensaios de Materiais e Estrutura – LABEME, no Centro de Tecnologia, da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). A mistura foi realizada em uma betoneira com capacidade de mistura para 310 L. O processo de adensamento escolhido foi o manual segundo a NBR 5738:2015 (ABNT, 2015), e sempre realizado pela mesma pessoa em todas as misturas.

Para desenvolver essa pesquisa foi confeccionada uma quantidade de 200 corpo de prova (CP) cilíndricos com dimensão 100 x 200 mm; 25 amostras para cada traço. Desses, 40% foram empregadas no ensaio de difusão de cloretos, 12% destinados ao ensaio de resistividade elétrica superficial (RES) e os demais para ensaios de caracterização do concreto: resistência à compressão, nas idades de 28 e 90 dias, e absorção de água por imersão, aos 90 dias após moldagem.

Para a preparação das amostras, visto que os ensaios seriam feitos em dias variados considerando as distintas misturas, a metodologia seguiu do mesmo modo para todas as dosagens:



1. Umedeceu-se a betoneira.
2. Introduziu-se todo o agregado graúdo com 50% da água da mistura.
3. Colocou-se a betoneira em funcionamento permitindo que todo o material fosse umedecido uniformemente por 1 minuto.
4. Adicionou-se o material cimentício (cimento + pozolana). Foi realizada uma mistura prévia do cimento com a pozolana. Após a mistura, a betoneira foi ligada em rotação por 2 minutos.
5. Por último, colocou-se o agregado miúdo com o restante da quantidade de água da mistura. Foi retido em um recipiente 100 ml de água para dissolução do aditivo quando necessário. Após essa ação, a betoneira foi colocada em funcionamento por 3 minutos.
6. Quando necessário, introduzir-se o superplastificante diluído nos 100 ml de água e misturar-se por + 2 minutos.
7. Para avaliação da trabalhabilidade esperada, foi utilizado o ensaio do abatimento do tronco de cone (MEDEIROS *et al.*, 2015) NBR 16889:2020 (ABNT, 2020). À medida que não era obtido o Slump desejado uma quantidade a mais de aditivo era adicionada até obter o resultado de Slump pré-estabelecido. Em razão disso, pode-se observar que na Tabela 13 a quantidade de aditivo utilizada varia por traço.
8. Quando a amostra obteve o abatimento desejado de  $80 \pm 10$  mm, iniciou a moldagem dos corpos de prova (Figura 10).

O procedimento de moldagem e cura seguiu as especificações da NBR 5738: 2015 (ABNT, 2015). Após serem desenformadas, as amostras foram identificadas e armazenadas em uma para úmida (Figura 11).

**Figura 10 - Corpo de prova cilíndrico (100 X 200 mm) devidamente identificados.**



Fonte: Autora (2022).

**Figura 11 - Amostras de concreto ( CP cilíndrico 100 X 200 mm) armazenadas para cura**



Fonte: Autora (2022).

### 3.2.2. Preparo das amostras para os ensaios realizados.

- *Amostras para resistência à compressão axial*

As amostras permaneceram em câmara úmida até o dia de rompimento, 28 e 90 dias, sem sofrerem nenhum tipo de tratamento externo. Todavia, foram retificadas, com o propósito de minimizar a possibilidade de uma distribuição de carga não uniforme.

- *Amostras submetidas ao ensaio de difusão de cloretos*

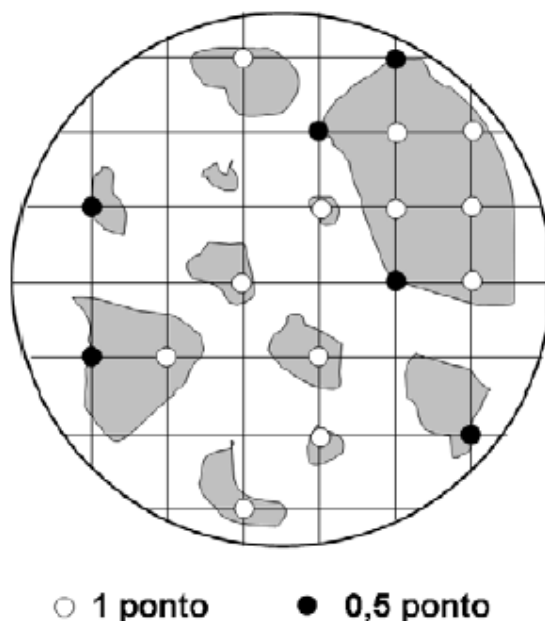
A Priori foi realizada uma seleção dos corpos de prova para o ensaio de difusão de cloretos. Essa escolha foi fundamentada no pressuposto que cada amostra é única. Por mais que se tenha seguido o mesmo procedimento, no final a disposição dos materiais e seu arranjo diferirá para cada amostra.

Há uma grande diferença na relação entre os teores de brita e de argamassa, dificultando comparação eficiente entre amostras irmãs. Segundo Ribeiro (2010) uma pré-seleção das amostras é um fator determinante para aumentar a reprodutividade dos ensaios.

Para escolha das amostras, Ribeiro (2010) propõe a adaptação da ASTM E 562/99 (Standard Test Methods for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count). Segundo essa norma, é possível estimar a porcentagem de uma fase de interesse (no caso, a brita). Sobrepondo uma grade sobre a amostra e contando os nós da rede que estiverem sobre a fase em questão contando como 1,0; os pontos localizados nas linhas de transição são contados como 0,5, em seguida, soma esses pontos e divide-se esse valor obtido pelo total de nós, estimando a porcentagem da fase (RIBEIRO; LABRINCHA; MORELLI, 2012). A Figura 12 mostra o esquema de seleção. Após a escolha das amostras, iniciou-se a preparação das amostras para o ensaio de difusão.

Foram utilizadas amostras cilíndricas, Ø 100 x 100 mm, conforme as especificações adotadas para essas amostras. Para tal, foram cortadas as amostras 100 x 200 mm ao meio. Na Figura 13 é visto o momento de marcação para o corte e na Figura 14 a amostra com dimensão pronta para início de preparação. As novas amostras Ø 100 x 100 mm passaram por um pré-condicionamento.

**Figura 12 - Esquema do procedimento de estimativa de fase proposto por Ribeiro (2010)**



Fonte: RIBEIRO (2010).

Primeiro, as amostras foram imersas numa solução saturada de  $\text{Ca(OH)}_2$  (3 g/l) até atingir consistência de massa, quando não apresentaram variação de massa de 0,1% por 24 horas. Alcançada a saturação, as amostras permaneceram em ambiente de laboratório cerca 3 horas, para secagem superficial, facilitando o processo de impermeabilização das faces através de um revestimento epóxi. Foi tomado o cuidado de proteger a face exposta à solução de cloretos (Figuras 15 e 16), enquanto as demais foram revestidas com uma camada de resina epóxi, permitindo que o processo de difusão ocorresse em apenas uma direção.

Essa fase durou 3 dias. No primeiro, foi realizado a pintura em todas as áreas determinadas. No segundo, foi aplicada uma segunda demão e, no terceiro, o preenchimento de alguns poros que insistiam em permanecer abertos. Após a secagem da pintura, as amostras retornaram à solução saturada de  $\text{Ca(OH)}_2$ , até que se alcançasse a constância de massa novamente.

**Figura 13 - Marcação de corte para obter amostra com dimensão de 100 x 100 mm**



Fonte: Autora (2022).

**Figura 14 - Amostra 100 x 100 mm**



Fonte: Autora (2022).

**Figura 15 - Amostras prontas para iniciar a impermeabilização com resina epóxi**



Fonte: Autora (2022).

**Figura 16 - Amostra pronta para início do ensaio de difusão**



Fonte: Autora (2022).

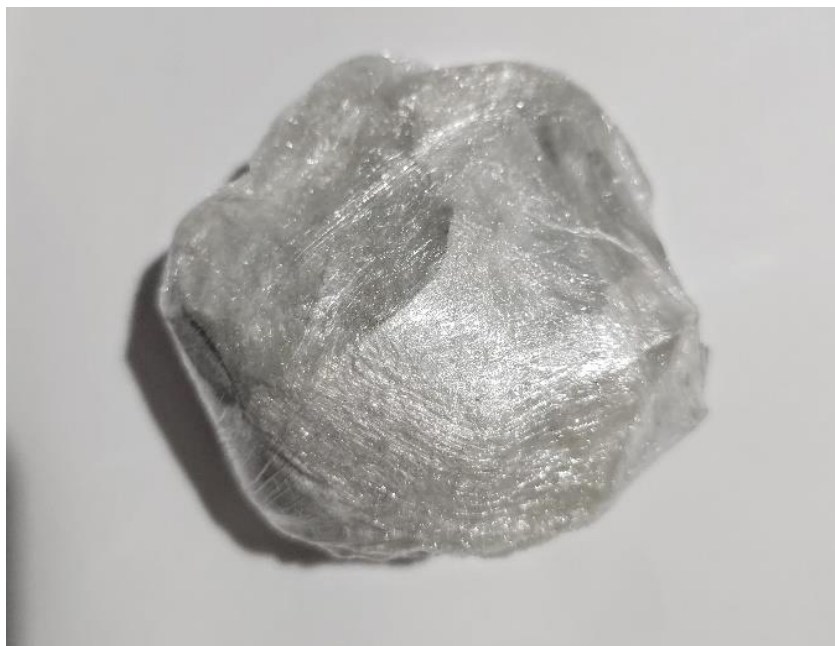
- *Amostras submetidas ao ensaio de termogravimetria (TG/DTG)*

As pastas foram moldadas na mesma proporção das relações a/mc do concreto. Foi realizada cura submersa por 90 dias. Ao final desse período, elas foram retiradas da cura, deixadas em ambiente de laboratório por 12 horas. Passado esse tempo, as amostras foram maceradas e passadas na peneira de malha 325  $\mu\text{m}$  e



armazenadas em sacos ziplock, protegidos com inúmeras camadas de plástico filme para impedir as reações de carbonatação (Figura 17).

**Figura 17 - Armazenamento das amostras de pasta para ensaios de DRX e TG/DTG**



Fonte: Autora (2022).

### **3.3. TERCEIRA ETAPA: REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO; ABSORÇÃO TOTAL POR IMERSÃO; RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL, DIFUSÃO DE CLORETOS**

#### **3.3.1. Resistência à compressão axial**

O ensaio de resistência à compressão axial seguiu as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018). Para cada traço foram rompidas três amostras cilíndricas com dimensão 100 x 200 mm nas idades de 28 e 90 dias. O resultado apresentado é uma média das três amostras.

#### **3.3.2. Absorção total de água por imersão**

O ensaio de absorção foi desenvolvido seguindo as determinações da NBR 9778 (ABNT, 2005). Para cada traço foram ensaiadas duas amostras cilíndricas de dimensão 100 x 200 mm. O ensaio foi realizado na idade de 90 dias.

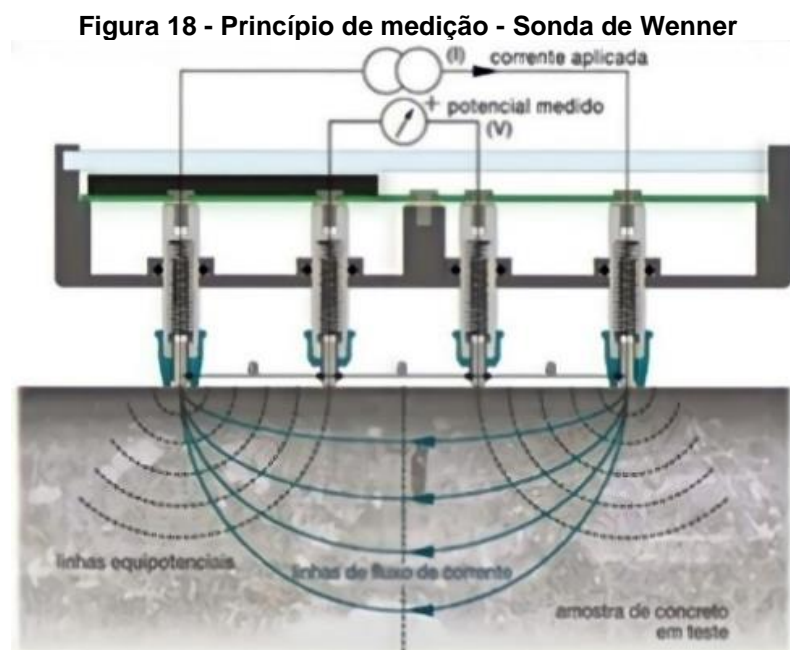
### 3.3.3. Resistividade elétrica superficial (RES)

Trata-se de um ensaio não destrutivo, de fácil e rápida aplicação. Vale ressaltar que esse ensaio não possui norma nacional para utilização em concreto. Em vista disso, essa pesquisa foi desenvolvida seguindo as recomendações do RILEM 154-EMC (2000).

A técnica é simples, quatro eletrodos são colocados sobre a superfície da amostra de concreto. Ao entrar em contato com a superfície os eletrodos externos aplicam uma corrente alternada, a uma frequência variando entre 100 e 1000 Hz, e nos eletrodos internos mede-se a diferença de potencial, calculada pela Equação 22 (MEIRA, 2017). Um esquema sobre o funcionamento do método pode ser visto na Figura 18.

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot \frac{E}{I} \quad (22)$$

Onde:  $\rho$  = resistividade elétrica do concreto (Ohm.cm);  $a$  = distância entre os eletrodos (cm);  $E$  = voltagem (volt);  $I$  = corrente (Amperes)



Fonte: VALDÉS *et al*, (2017).

Todas as amostras ensaiadas foram cilíndricas, com dimensão de 100 x 200 mm na condição saturada superfície seca, como recomendado por Chen, Chang e yeih, (2014). A RILEM 154 – EMC (RILEM, 2000) aponta que o espaçamento entre as



pontas de 3 a 5 cm seja o ideal para minimizar erros de medições, quando utilizados amostras cilíndricas. Nessa pesquisa, foi usado o espaçamento de 3 cm.

Um fator de forma quanto à geometria da amostra foi atribuído. Segundo a UNE 83988 – 2014 *apud* Araújo (2018), para essa geometria, o fator é de 0,384 .

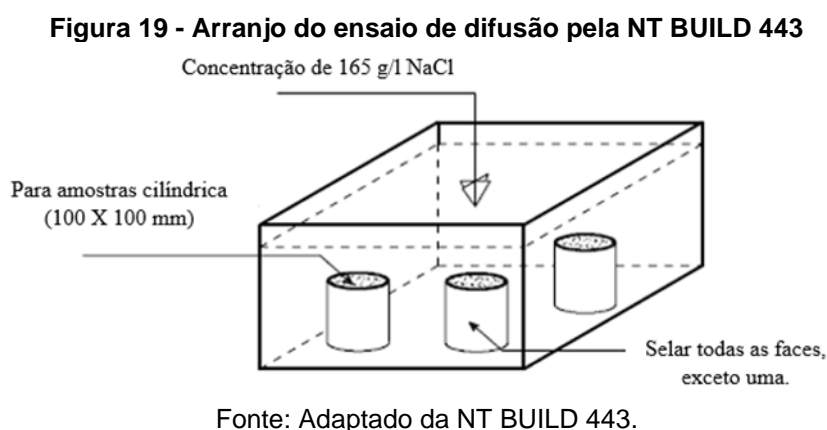
Foram realizadas seis medidas na superfície lateral de cada corpo de prova. Para cada mistura foram usadas 3 amostras, um total de dezoito medidas para cada mistura. Dessas medidas, foram obtidas a sua média e o desvio padrão. As amostras foram avaliadas periodicamente nas idades de 28, 90, 154, 180, 220 e 260 dias. Para o ensaio, foi usado o equipamento da MIKII da CNS Farnell.

#### 3.3.4. Difusão de cloretos

O método de teste escolhido para avaliar a resistência do concreto ao transporte íons de cloreto nas amostras de concreto foi o da NT BUILD 443: 1995.

Após o seu preparo, na idade de 35 dias, após moldagem, as amostras foram submetidas a uma solução com concentração de 2,8M de NaCl ( $165 \pm 1$  g/l), preparada com água destilada.

As amostras permaneceram submersas em depósitos preenchidos pela solução salina<sup>1</sup> até os dias de finalização do período de exposição: 35, 90 e 180 dias (Figuras 19 e 20). Para cada final de tempo de exposição foram retiradas três amostras para cada mistura.



<sup>1</sup> Para que a concentração permanecesse a mesma, a cada 35 dias a solução foi renovada e os depósitos lacrados, impedido o efeito de carbonatação.

**Figura 20 - Amostras em solução de NaCl [2,8 M], em ambiente de laboratório**



Fonte: Autora (2022).

Após o tempo de exposição determinado, as amostras foram preparadas para a determinação da concentração de cloretos presente na amostra, por cada profundidade especificada. O primeiro ciclo de amostragem aconteceu após 35 dias de exposição à solução de NaCl. Foram obtidas 24 amostras para cada mistura.

As profundidades de coleta foram de: 0-1 mm, 1-3 mm, 3-5 mm, 5-8 mm, 8-12 mm, 12-16 mm, 16-20 mm e 20-25 mm). O procedimento de coleta da amostra está ilustrado na Figura 21.

O ciclo de coleta ocorreu aos 90 dias, considerando os resultados do primeiro ciclo optou-se em ingressar um pouco mais e coletar mais uma camada, alcançando a profundidade de 30 mm e obtido 27 amostras em pó para cada traço. O terceiro ciclo de coleta ocorreu aos 180 dias de exposição das amostras. Considerando os resultados dos dois ciclos anteriores, na busca de encontrar um perfil bem definido, foi decidido adentrar um pouco mais, chegando a perfil de 50 mm, mantendo o espaçamento de 5 mm entre os pontos de coleta, totalizando 39 amostras em pó para cada mistura de concreto.

**Figura 21 - Marcação das camadas na amostra (a); pulverização das amostras do concreto (b, c); peneiramento (d); retirada de resíduos metálicos provenientes da lâmina de corte (e); armazenamento de amostra para análises posteriores**



Fonte: Autora (2022).

O preparo das amostras para determinação da concentração de íons cloreto presente seguiu as recomendações do RILEM TC178-TMC, (RILEM, 2002a, 2002b). Após o procedimento de preparo, a solução foi armazenada em recipiente fechado até o momento da titulação (Figura 22). A concentração dos íons cloreto foi obtido por titulação potenciométrica, pelo método manual, seguindo a norma ASTM C-114:2007.

**Figura 22 - Solução preparada para ensaio de titulação de acordo com as recomendações do RILEM TC 178:2012**



Fonte: Autora (2022).

### **3.4. QUARTA ETAPA: SOLUÇÕES EMPREGADAS PARA CÁLCULOS DO FATOR DE IDADE**

Regressão não linear foi aplicada aos perfis de cloretos para cálculo do coeficiente de difusão de cloretos, concentração superficial e fator de idade ( $n$ ) a partir dos dados obtidos com o ensaio de difusão.

Como apresentado no item 2.3, a solução empregada pode interferir no resultado do fator  $n$ . Diante disso, optou-se por empregar a solução semi dependente e totalmente dependente do tempo, aplicando a Equação 11, apresentada por Mangat e Molloy (1994), e a Equação 16, apresentada por Gaal, Koenders e Polder (2006). Para o  $q$ , o valor foi obtido graficamente como apresentado na Figura 9.

Para solução semi dependente do tempo, não foi considerado o tempo de cura. Com  $t$ = tempo de ensaio (35, 90 e 180 dias) e  $t_0$ = 28 dias.

Para a solução totalmente dependente do tempo, foi adicionado tempo de cura, resultando em três tempos: tempo inicial ( $t_0$ ) = 28 dias (s); tempo de exposição ( $t_s$ ), o tempo final ( $t$ ) = tempo de cura + tempo de exposição da amostra a solução de cloretos para cada um dos perfis, resultando em  $t_1$ = 66 dias (s),  $t_2$ = 121 dias (s) e  $t_3$ = 211 dias e  $t_0$ = 28 dias, todos em segundos.

Para obter o fator de idade por medidas de resistividade elétrica superficial, são consideradas:  $\rho_0$ = medida realizada aos 28 dias ( $k\Omega.cm$ ),  $\rho_t$ = resistividade medida na idade mais avançada, ( $t_0$ = 28 dias e  $t=90, 180, 220$  e  $260$  dias).

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são expostos e analisados os resultados, quanto às características físicas e químicas dos materiais utilizados no desenvolvimento do trabalho e quanto às amostras de concreto.

Embora o objetivo principal seja avaliar o fator de idade para as misturas de concreto estudadas, submetidas a ensaios de difusão de cloretos e resistividade elétrica superficial, analisa-se, também, neste estudo, a contribuição das adições minerais (sílica ativa, metacaulim e cinza volante), as diferentes relações água/aglomerante e a influência do tempo sobre a hidratação dos concretos estudados.

### 4.1. MATERIAIS EMPREGADOS

#### 4.1.1. Agregados

O agregado miúdo utilizado foi uma areia média de leito de rio, de natureza quartzosa, classificada como ótima, segundo as especificações da NBR 7211 (ABNT, 2009). O resultado da caracterização de propriedades físicas, impurezas e contaminações é apresentado no Quadro 1.

O agregado graúdo usado foi uma brita de origem granítica, classificada como brita 1, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009). Os resultados de caracterização física do agregado graúdo estão dispostos no Quadro 2.

**Quadro 1 - Característica do agregado miúdo**

Ensaio realizado	Areia média	Exigências da NBR 7211:2009
Dimensão máxima característica (mm)	4,75	N. E.
Impurezas orgânicas(+/- clara)	Coloração clara	A solução obtida no ensaio deve ser mais clara do que a solução-padrão
Massa específica ( $g/cm^3$ )	2,6	N. E.
Massa unitária estado solto ( $g/cm^3$ )	1,44	N. E.
Material pulverulento (%)	1,5	5%
Módulo de finura	2,76	N. E.
Torrões de argila (%)	0,99	3%

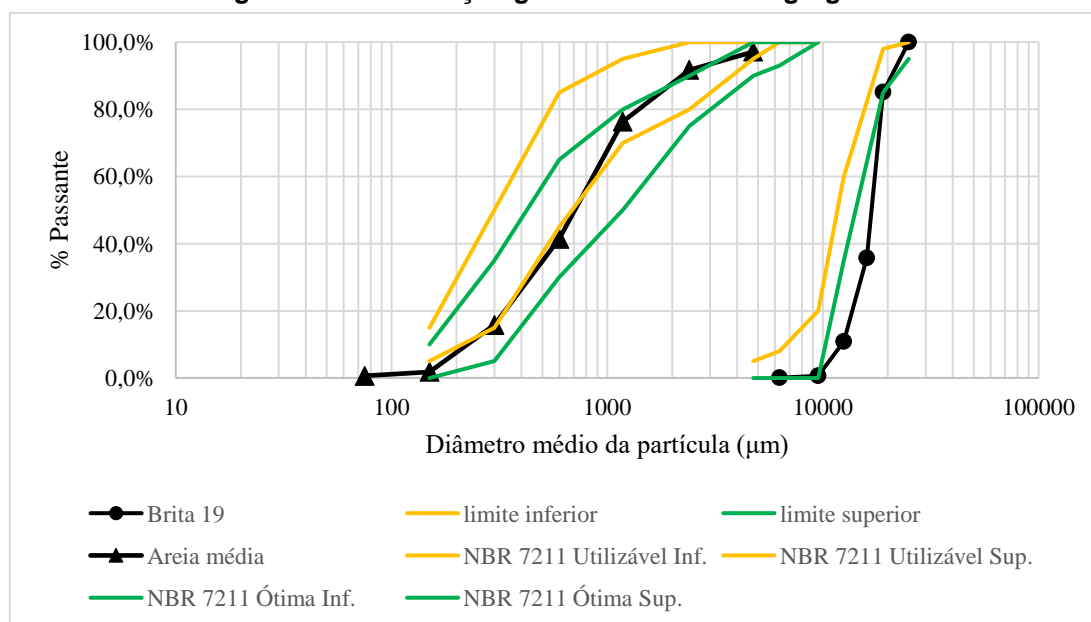
Fonte: Autora, 2022.

**Quadro 2 - Característica do agregado graúdo**

Ensaio realizado	Método		Brita 19 mm
Dimensão máxima característica (mm)	NBR 7211: 2009		19
Massa específica (g/cm³)	NBR NM 53: 2009	Saturada	2,77
		Aparente	2,6
Massa unitária estado solto (g/cm³)	NBR NM 45: 2006		1,52
Módulo de finura	NBR 7211: 2009		7,14
Absorção de água (%)	NBR NM 53:2009		0,31

Fonte: Autora (2022).

Para melhor visualização quanto à distribuição granulométrica e seu Posicionamento nas especificações da norma supracitada, a Figura 23 mostra a distribuição granulométrica graficamente.

**Figura 23 - Distribuição granulométrica dos agregados**

Fonte: Autora 2022.

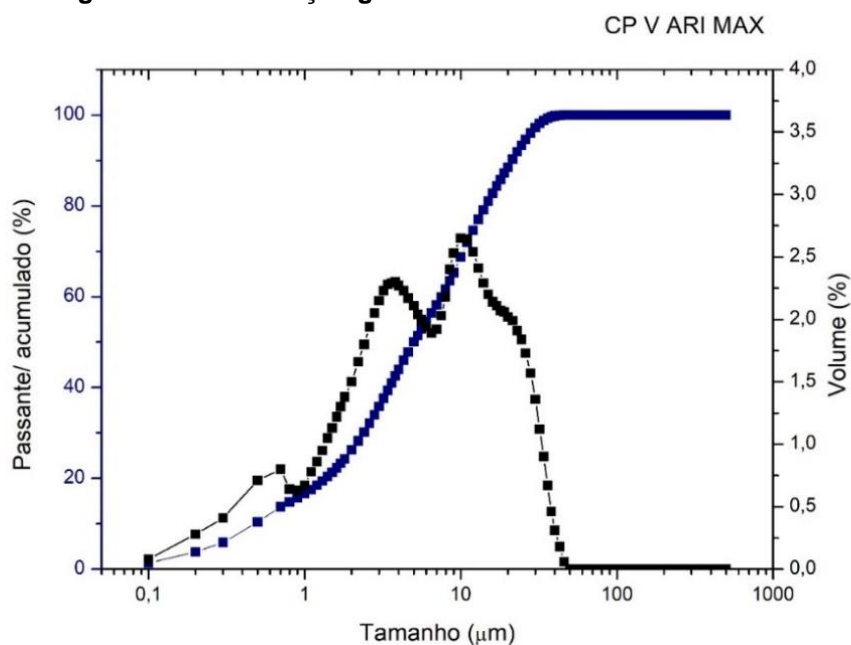
#### 4.1.2. Cimento

Para produzir os concretos, foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial - CP V ARI MAX, da marca Nacional. A distribuição granulométrica corresponde aos diâmetros concentrados de 10%, 50% e 90%. Esses valores obtidos correspondem a 0,48 µm/ 5 µm/ e 21,27 µm, respectivamente, apresentando um diâmetro médio de 8,27 µm.

A distribuição granulométrica foi plotada na Figura 24. Quanto à massa específica dos grãos, foi determinada pelo método do frasco de Le Chatelier (ABNT, 2017), sendo obtida uma média de 3,09 g/cm<sup>3</sup>.

O resultado da caracterização química realizada por Fluorescência de raio-X, está apresentado na Tabela 14. Demais características físicas e mecânicas estão descritas na Tabela 15.

**Figura 24 - Distribuição granulométrica do CP V ARI MAX**



Fonte: Autora (2022).

**Tabela 14 - Composição química do cimento CP V ARI MAX**

Elementos	Concentração (%)
CaO	75,44
SiO <sub>2</sub>	12,56
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,23
K <sub>2</sub> O	2,11
TiO <sub>2</sub>	0,28
SrO	0,15
ZnO	0,06
Zr <sub>2</sub> O	0,03
CuO	0,03
NiO	0,01
Rb <sub>2</sub> O	0,01

Fonte: Autora (2022).

**Tabela 15 - Caracterização física e química do CP V ARI MAX**

Ensaio		
Ensaio		
Ensaio	Resultados	Limites da NBR 16697:2018
Índice de finura - # 75µm (%)	0,04	≤ 6%
Resíduo na peneira # 325 (%)	2,16	-
Resíduo insolúvel (%)	0,77	≤ 3,5
Água de consistência normal (%)	28,6	-
Início de pega (min)	119	≥ 60
Fim de pega (min)	173	≤ 600
Expansibilidade à quente (mm)	0	≤ 5,0
Ensaio		
Ensaio Mecânicos		
Ensaio	Resultados (MPa)	Limites da NBR 5733/91
Resistência à Compressão – 1 Dia	29,1	≥ 14
Resistência à Compressão – 3 Dias	42,3	≥ 24
Resistência à Compressão – 7 Dias	47,2	≥ 34
Resistência à Compressão – 28 Dias	55	-

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante (2021).

#### 4.1.3. Adições minerais

##### ○ Análise física

As curvas granulométricas das adições foram plotadas em uma mesma área de plotagem adicionando a curva do CP V ARI MAX (Figura 25). Dessa forma, pode-se visualizar a diferença granulométrica entre o aglomerante e as adições minerais.

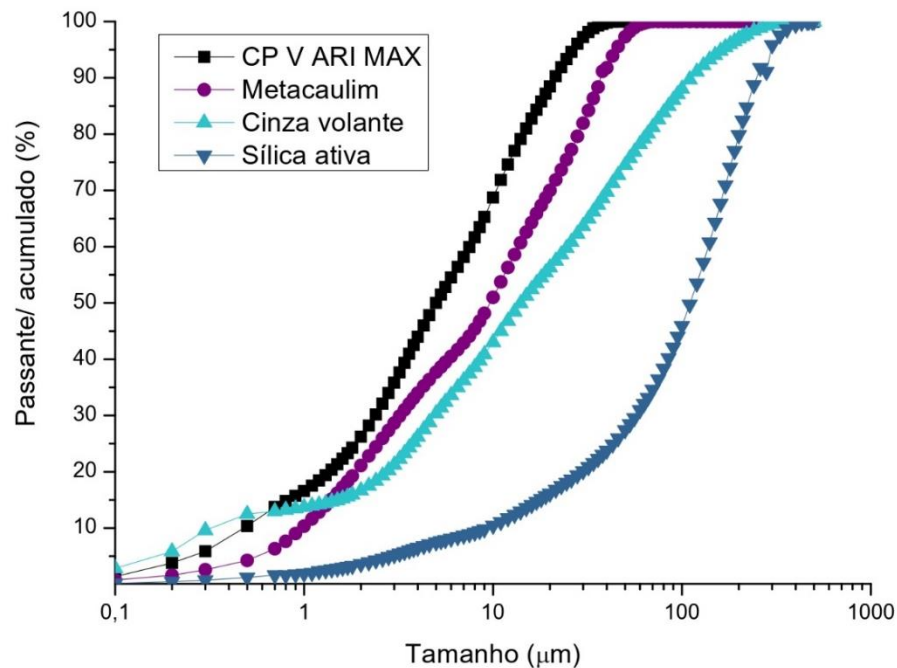
O diâmetro médio da cinza volante foi de 39,23 µm; (10% do material é menor que 0,32 µm; 50% menores que 14,06 µm e 90% são menores que 112,10 µm), resultando em uma massa específica de 2,04 g/cm³. A massa específica foi determinada segundo o método de Le Chatelier NBR 16605 (ABNT, 2017).

Para o metacaulim, 10% de suas partículas são menores que 0,97 µm, 50% menores que 9,64 µm e 90% menores que 37,81 µm, apresentando um diâmetro médio de 14,83 µm e uma massa específica de 2,60 g/cm³.

Quanto à sílica ativa, 10% do seu material apresentou-se menor que 9,27 µm, 50% menor que 110,72 µm, 90% menor que 248,24 µm, com um diâmetro médio de 122 µm. A sua massa específica encontrada foi de 2,11 g/cm³.



Figura 25 - Curva granulométrica dos finos



Fonte: Autora (2022).

De acordo com os estudos de distribuição de tamanho de partícula desenvolvido por Mehta e Monteiro (2006) as partículas de uma cinza volante típica variam de  $<1 \mu\text{m}$  a quase  $100 \mu\text{m}$  de diâmetro, com mais de 50% em massa inferior a  $20 \mu\text{m}$ .

Quanto à distribuição da sílica ativa, é esperado que ela apresente grãos com alto grau de finura, mas é permitido a comercialização na forma densificada, com diâmetro dos grãos na ordem de  $100 \mu\text{m}$  (Romano *et al.* 2006), assim como foi encontrado na sílica utilizada neste trabalho.

Segundo Fraga, Soares e Capuzzo (2021), a sílica não densificada é mais eficiente quando utilizada na produção de materiais cimentícios. Já o metacaulim, seguiu a distribuição encontrada em outros trabalhos, com curva granulométrica próxima a do cimento CP V ARI.

#### ○ Análise química

A caracterização química foi realizada por Fluorescência de raio X, método quantitativo, aplicando o mesmo procedimento realizado para o CP V ARI MAX (Tabela 16) e o método semiquantitativo de difração de raio-X. Os difratogramas estão apresentados nas Figuras 26, 27 e 28, e os principais minerais que compõem a

amostra estão nas Tabelas 17, 18 e 19. Para análise dos difratogramas foi utilizado o programa X'pert Plus 3.0.

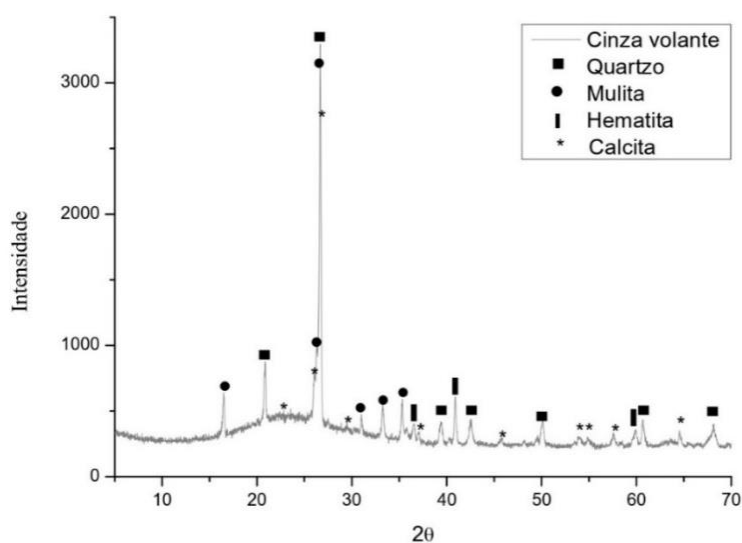
A soma dos óxidos de silício, alumínio e ferro foi de 89,41 % para cinza volante, 95,31% para o metacaulim e 75,19% para sílica ativa. Desse modo, todas as adições entraram na classificação de material pozolânico quanto a especificação química da NBR 12653 (ABNT, 2012) esta norma recomenda que o somatório dos óxidos de silício, alumínio e ferro seja  $\geq 70\%$ .

**Tabela 16 - Composição química das adições minerais**

Elementos	Cinza volante	Metacaulim	Sílica ativa	Limite da NBR 12653 (2014)
CaO (%)	3,08	0,82	12,77	-
SiO <sub>2</sub> (%)	52,57	49,74	66,09	SiO <sub>2</sub> (%) + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) $\geq 70\%$
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	9,1	6,79	9,1	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	27,74	38,78	-	
K <sub>2</sub> O (%)	5,54	1,27	8,72	-
TiO <sub>2</sub> (%)	1,55	2,15	0,19	-
SrO (%)	0,05	0,05	0,31	-
ZnO (%)	0,09	0,04	0,09	-
Zr <sub>2</sub> O (%)	0,22	0,26	0,22	-
Rb <sub>2</sub> O (%)	0,07	0,02	0,14	-

Fonte: Autora (2022).

**Figura 26 - Difratograma de raio X - Cinza volante**



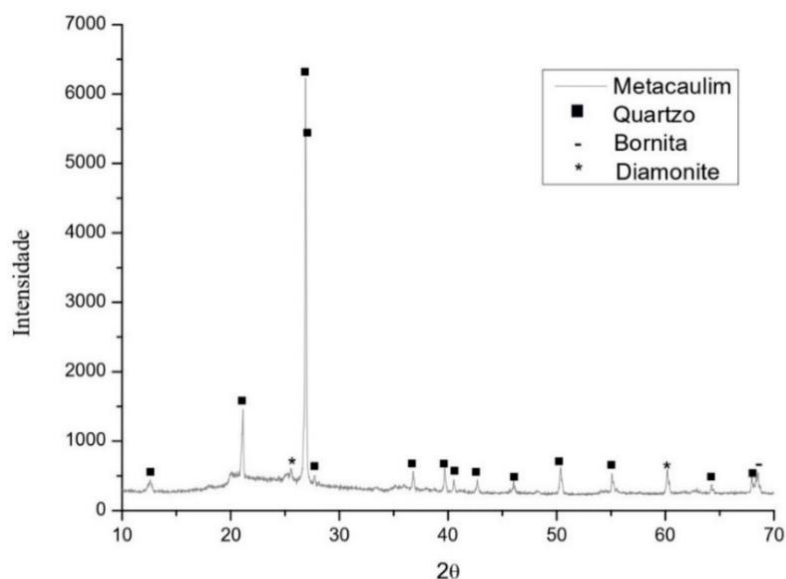
Fonte: Autora (2022).

**Tabela 17 - Minerais encontrados no difratograma da cinza volante**

Código de Referência	Nome do composto	Fórmula química	Mineral
33-1161	Dióxido de silício	SiO <sub>2</sub>	Quartzo
33-0664	Oxido de ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hematita
15-0776	Sílico aluminato	Al <sub>6</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>13</sub>	Mulita
05-0586	Carbonato de cálcio	CaCO <sub>3</sub>	Calcita

Fonte: Autora (2022).

**Figura 27 - Difratograma de raio X - Metacaulim**



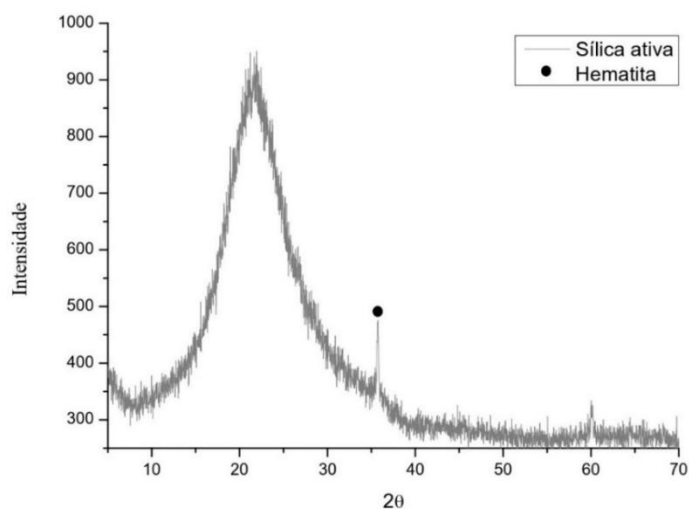
Fonte: Autora (2022).

**Tabela 18 - Minerais encontrados no difratograma do metacaulim HP**

Código de Referência	Nome do composto	Fórmula química	Mineral
33-1161	Dióxido de silício	SiO <sub>2</sub>	Quartzo
01-073-1667	Sulfeto de cobre e ferro	Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>	Bornita
10-0173	Oxido de alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Diamonite

Fonte: Autora (2022)

**Figura 28 - Difratograma de raio X - sílica ativa**



Fonte: Autora (2022)

**Tabela 19 - Minerais encontrados no difratograma da sílica ativa**

Código de Referência	Nome do composto	Fórmula química	Mineral
33-0664	Oxido de ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hematita

Fonte: Autora (2022)

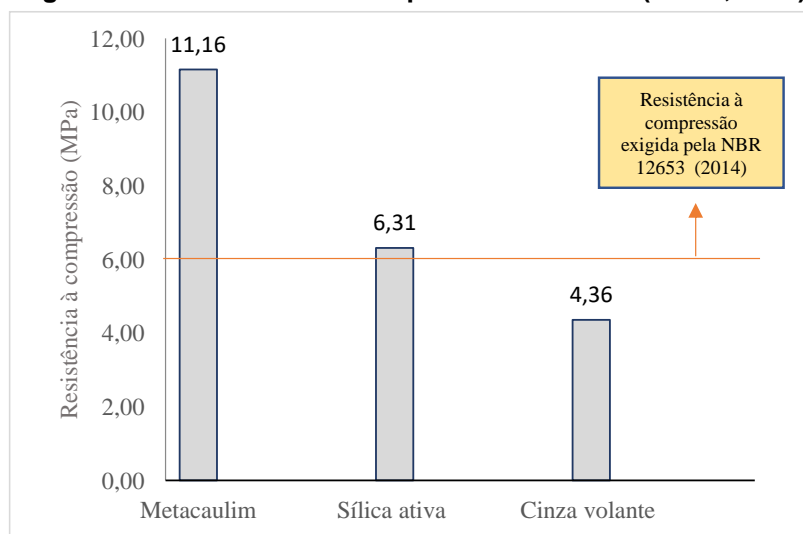
- Índice de atividade pozolânica

O índice de atividade pozolânica (IAP) de um material, ou seja, a capacidade desse material reagir com o hidróxido de cálcio na presença de água e formar compostos com propriedades cimentastes, pode ser determinada por diferentes metodologias, porém normatizada temos o IAP com CAL NBR 5751 (ABNT, 2015) e IAP com cimento Portland NBR 5752 (ABNT, 2014).

Neste trabalho, optou-se por empregar a NBR 5751 (ABNT, 2015) para todas as pozolanas, considerando que essa norma não traz nenhuma restrição quanto ao tipo de adição mineral. No entanto, a NBR 5752 (ABNT, 2014) declara não ser aplicável à sílica ativa e ao Metacaulim. Desse modo, optou-se por avaliar a pozzolanicidade da cinza volante também por esse método pois ela não atingiu a resistência desejada quando aplicada à norma 5751 (ABNT, 2015).

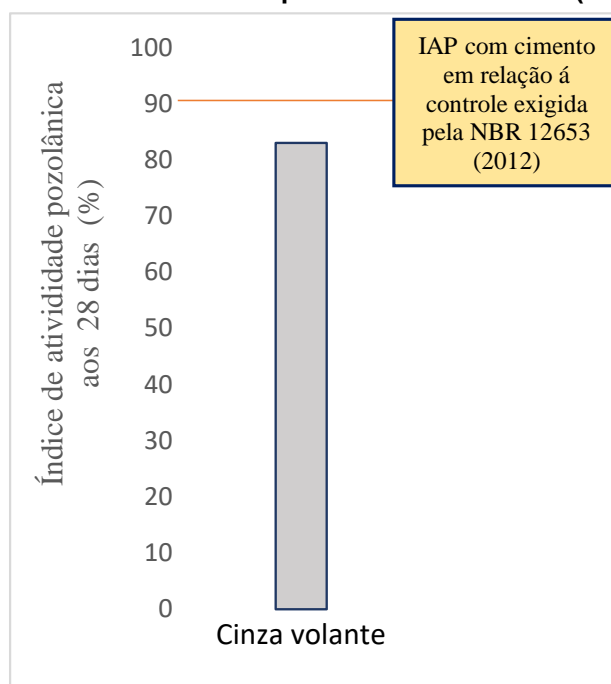
A Figura 29 exibe os resultados de resistência à compressão das argamassas contendo as adições minerais utilizadas. Verifica-se que a cinza volante não atingiu a resistência mínima como especificado na NBR 12653 (ABNT, 2014) de 6 MPa. Quando avaliada pela NBR 5752:2014 o índice de desempenho aos 28 dias não atingiu o esperado de 90% (Figura 30), exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2014), apenas 83%. Entretanto, optou-se por fazer o uso do material, considerando que ele apresentou índices de percentagem próximo aos requisitados em norma e foi classificado como material pozzolânico, de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2012).

**Figura 29 - Índice de atividade pozolânica – 5751 (ABNT, 2015)**



Fonte: Autora (2022).

**Figura 30 - Índice de atividade pozolânica - NBR 5752 (ABNT, 2014)**



Fonte: Autora (2022).

#### 4.1.4. Aditivo

O aditivo químico utilizado foi um superplastificante, a base de policarboxilato, livre de cloretos, ADVA™ CAST 525, produzido pela Grace, com o objetivo de manter a trabalhabilidade do concreto. Na Tabela 20 constam os dados técnicos desse aditivo.

**Tabela 20 - Dados técnicos do aditivo**

Características	Valor	Observação
Massa específica	1,06 kg/m³	Dados do fabricante
Dosagem recomendada	$\geq 0,15\% \leq 0,8\%$	Sobre o peso do cimento

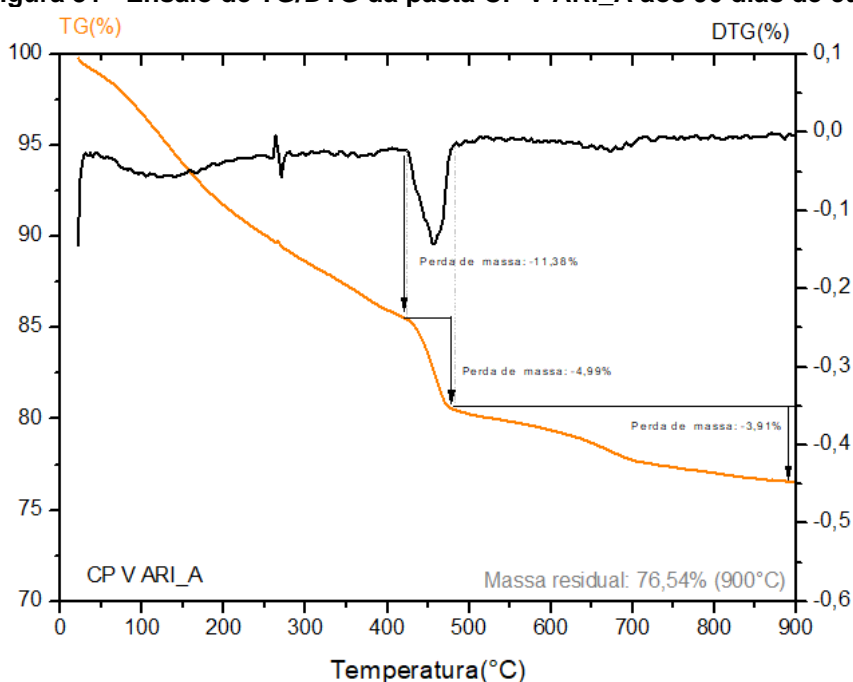
Fonte: Ficha técnica do fabricante.

## 4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS PASTAS NO ESTADO ENDURECIDO

O grau de hidratação das pastas foi avaliado através dos ensaios de TG/DTG. De acordo com Taylor (1997), os principais pontos de hidratação do cimento podem ser determinados por TG/DTG.

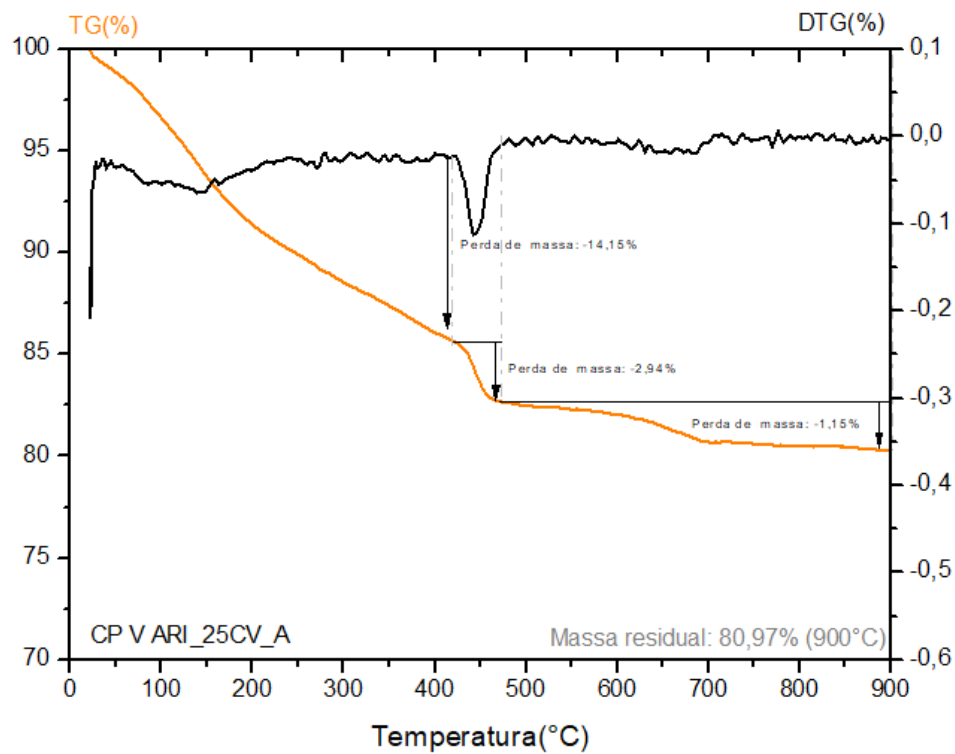
Nas Figuras 31 a 38 estão plotadas as curvas obtidas no ensaio de TG/DTG. A partir dos gráficos foram identificados os limites das perdas referente a desidratação do carbonato de cálcio -  $\text{CaCO}_3$  e hidróxido de cálcio -  $\text{Ca(OH)}_2$ . A Tabela 21 foi construída com os resultados do teor de hidróxido de cálcio, carbonato de cálcio e AQC para as amostras avaliadas, aplicando as equações propostas por Pilar (2016).

**Figura 31 - Ensaio de TG/DTG da pasta CP V ARI\_A aos 90 dias de cura**



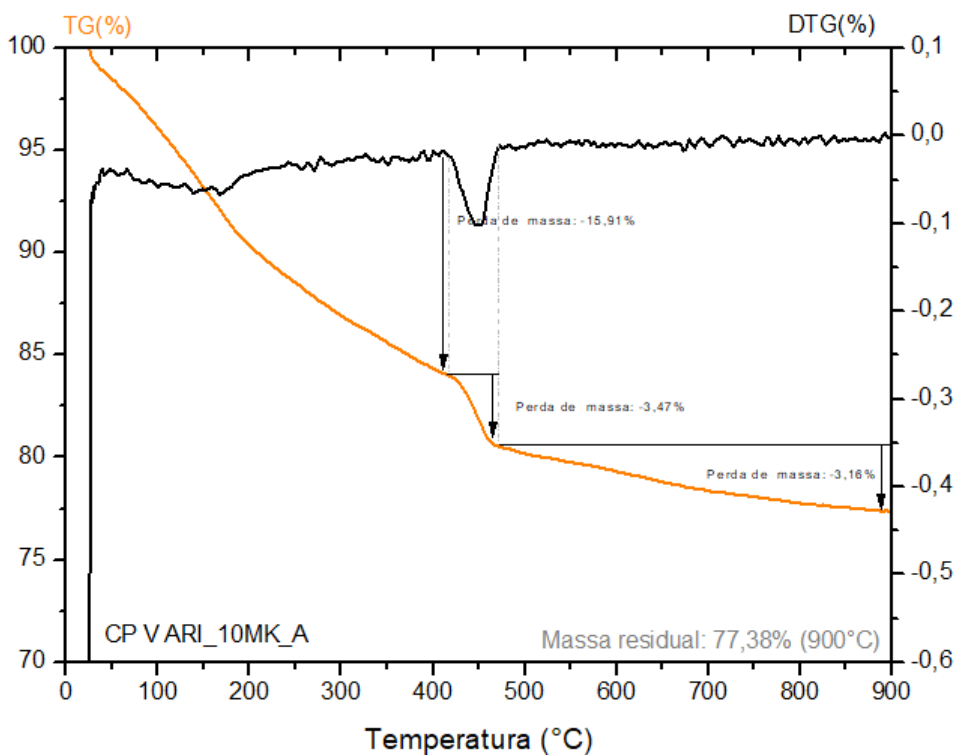
Fonte: Autora (2022).

**Figura 32 - Ensaio de TG/DTG da pasta CP V ARI\_25 CV\_A, aos 90 dias de cura.**



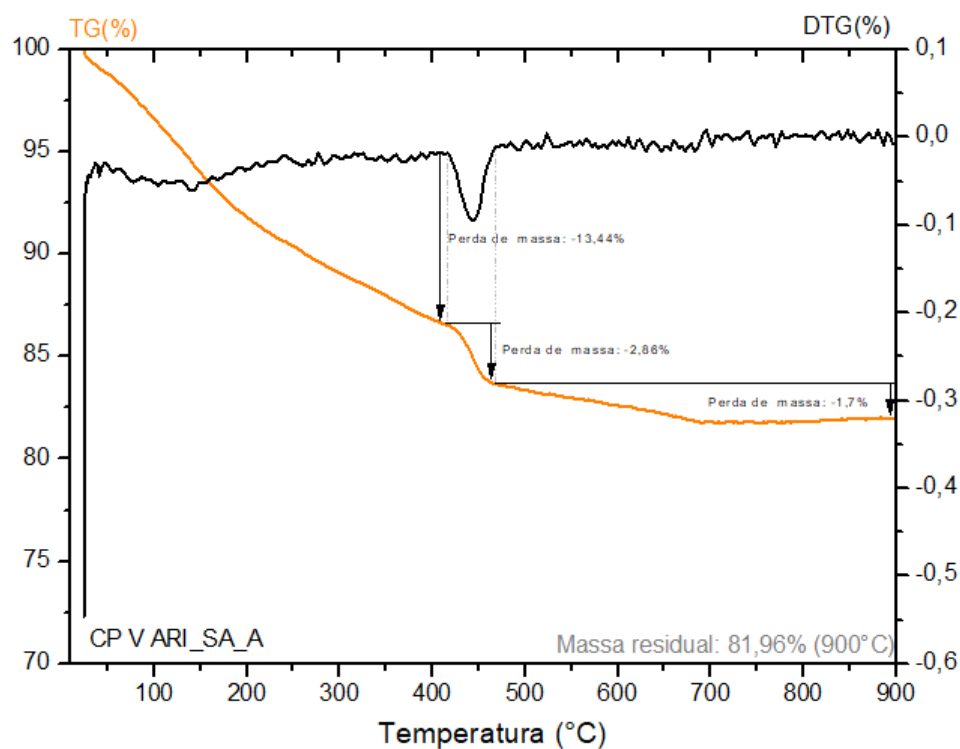
Fonte: Autora (2022).

**Figura 33 - Ensaio de TG/DTG da pasta CP V ARI\_10MK\_A, aos 90 dias de cura.**



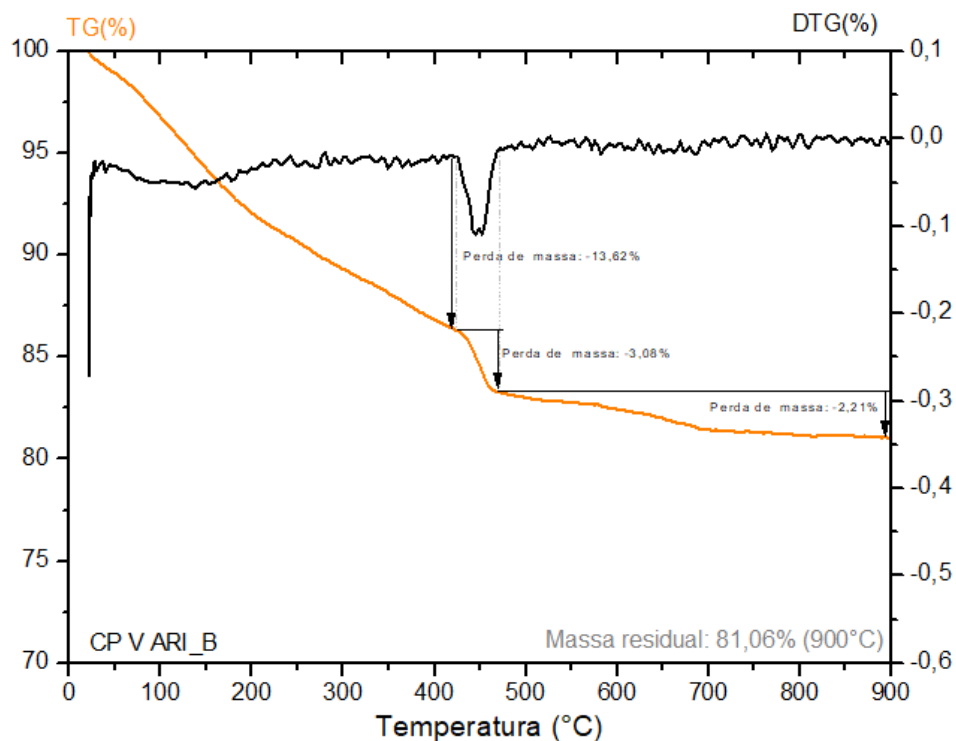
Fonte: Autora (2022).

**Figura 34 - Ensaio de TG/DTG da CP V ARI\_SA\_A, aos 90 dias de cura.**



Fonte: Autora (2022).

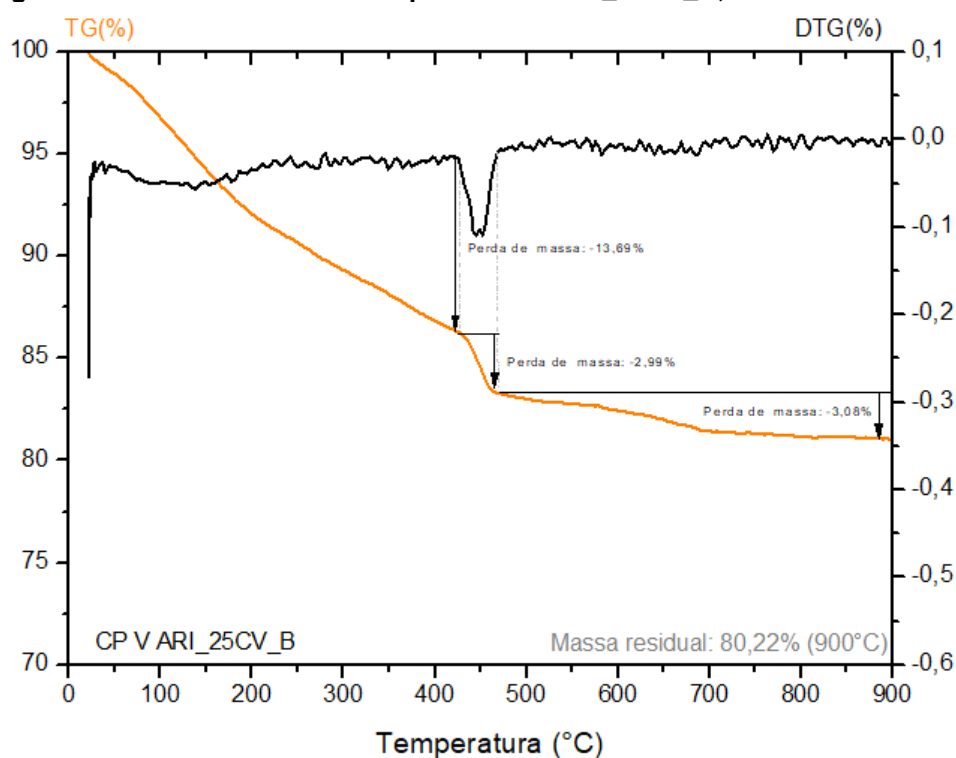
**Figura 35 - Ensaio de TG/DTG da pasta CP V ARI\_B, aos 90 dias de cura**



Fonte: Autora (2022).

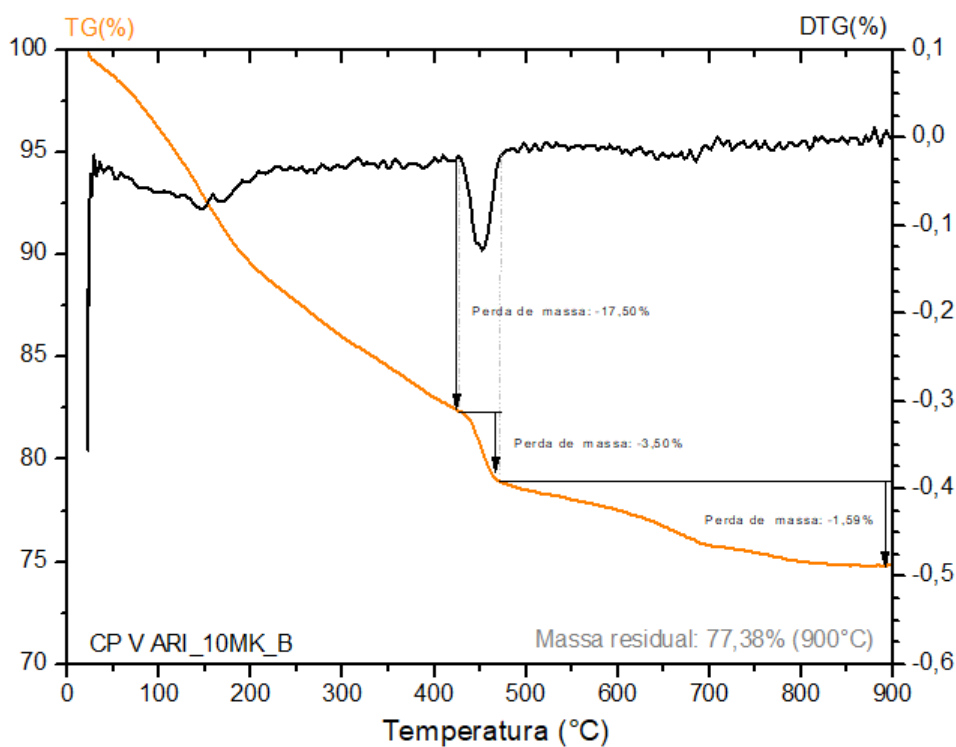


**Figura 36 - Ensaio de TG/DTG da pasta CP V ARI\_25CV\_B, aos 90 dias de cura**



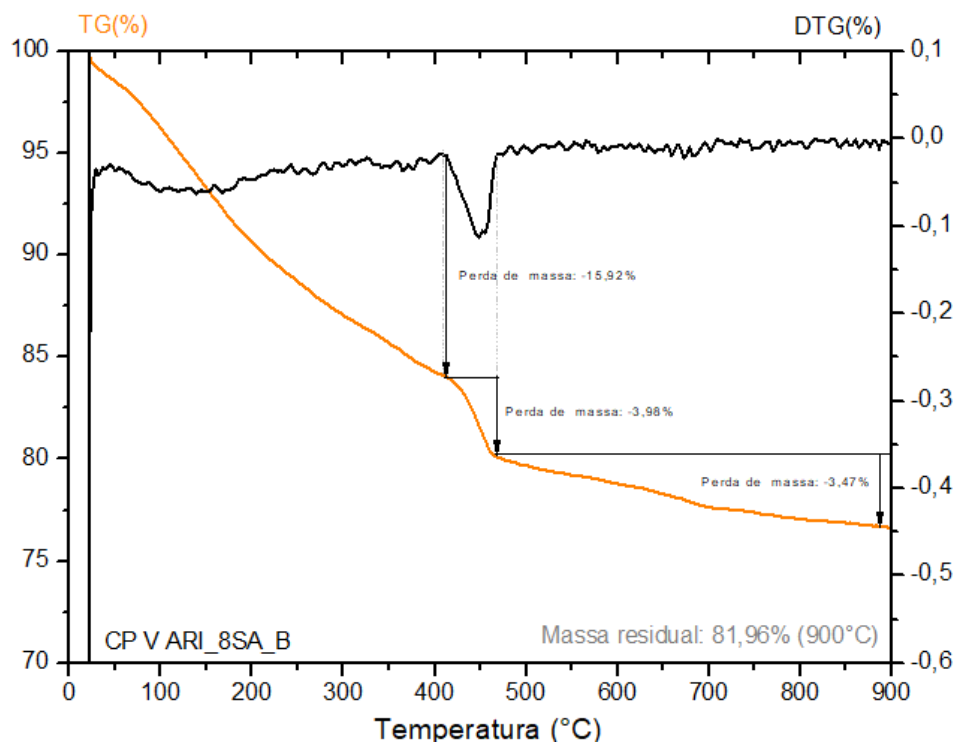
Fonte: Autor (2022).

**Figura 37 - Ensaio de TG/DTG da pasta CP V ARI\_10MK\_B, aos 90 dias de cura**



Fonte: Autora (2022).

**Figura 38 - Ensaio de TG/DTG da pasta CP V ARI\_8SA\_B, aos 90 dias de cura.**



Fonte: Autora (2022).

**Tabela 21 – Teores obtidos a partir das curvas de TG/DTG**

Pasta	Água combinada (%)	Hidróxido de cálcio (%)		Carbonato de cálcio (%)		Massa residual (%)
		H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	
Referência_0,55	11,38	4,99	20,51	3,91	8,88	76,54
25% Cinza Volante _0,55	14,21	2,94	12,08	1,75	3,97	80,97
10% metacaulim _0,55	15,91	3,47	14,26	3,16	7,17	77,98
8% Sílica ativa_0,55	13,44	2,86	11,75	1,70	3,86	81,96
Referência_0,45	13,62	3,08	12,66	2,21	5,02	81,06
25% Cinza Volante _0,45	13,69	2,99	12,29	3,08	6,99	80,22
10% metacaulim _0,45	17,50	3,50	14,39	1,59	3,61	77,38
8% Sílica ativa_0,45	15,92	3,98	16,36	3,47	7,88	76,63

Fonte; autor (2022)

### 4.3. CONCRETO ENDURECIDO

#### 4.3.1. Absorção de água por imersão e índice de vazios

Na Tabela 22 são apresentados os resultados de absorção de água por imersão e índice de vazios obtidos para todas as misturas na idade de 90 dias após a moldagem, acompanhados de seu desvio padrão e coeficiente de variação.

**Tabela 22 - Resultados de absorção de água por imersão e índice de vazios obtido para todas as misturas na idade de 90 dias após a moldagem**

Mistura	Consumo de cimento (kg/m³)	a/mc	Absorção (%)	Desvio P.	Coef. de variação (%)	Índice de vazios (%)	Desvio P.	Coef. de variação (%)
90 dias de cura								
CP VARI_A	367	0,55	4,71	0,63	13%	11,01	1,24	11%
CP VARI_25%CV_A	275		7,07	0,16	2%	15,66	0,23	1%
CP VARI_10%MK_A	330		5,82	0,06	1%	13,24	0,15	1%
CP VARI_8%SA_A	338	0,45	6,70	0,70	10%	14,83	1,23	8%
CP VARI_B	474		4,56	0,29	6%	10,63	0,65	6%
CP VARI_25%CV_B	356		5,56	0,02	0%	12,64	0,10	1%
CP VARI_10%MK_B	427		5,76	0,06	1%	13,15	0,11	1%
CP VARI_8%SA_B	436		4,62	0,12	3%	10,62	0,26	2%

Fonte: Autora (2022).

O resultado permitiu avaliar a porosidade aberta e, consequentemente, a capacidade de absorção das misturas. Conforme se pode verificar, a capacidade de absorção e a porosidade aberta aumentaram quando utilizadas adições minerais, e quando houve um acréscimo da relação a/mc, de 0,45 para 0,55.

Os resultados não mostram grande dispersão entre misturas de mesmo fator a/mc, provavelmente porque o traço aplicado foi o mesmo para todas as misturas em sua relação água/material cimentício (a/mc), variando apenas a adição mineral.

Sabe-se que o uso de adições minerais na mistura altera a estrutura dos poros e a porosidade da mistura. Malheiro *et al.*, (2014) e Mangat, Khatib e Molloy (1994) também obtiveram maior porosidade aberta quando adicionadas adições minerais nas misturas de concreto e argamassa.

Vale ressaltar que a porosidade total não é um fator determinante para o mecanismo de degradação da matriz, mas sim a distribuição do diâmetro dos poros. Em geral, espera-se que, com as adições minerais, haja o refinamento dos poros e, consequentemente a redução da porosidade. No entanto, a redução da porosidade não foi observada para as misturas com adições minerais. Provavelmente porque as adições empregadas necessitariam de mais tempo para atingir um grau de reação maior e, consequentemente, alcançar a redução da porosidade total.

Quanto à relação a/mc, Castro e Pandolfelli (2009) concluíram que concretos de maior durabilidade são caracterizados por misturas de baixa relação a/mc, o que reflete em um concreto menos poroso. De acordo com Meira (2017), a porosidade tem relação direta com a velocidade de transporte do agente agressivo, do meio externo para o interior do concreto.

#### 4.3.2. Resistência à compressão axial

Estão exibidos na Tabela 23 os valores médios de resistência à compressão axial, seu desvio padrão e coeficiente de variação, para todas as misturas de concretos estudadas nas idades de 28 e 90 dias após moldagem.

**Tabela 23 - Valores médios de resistência a compressão axial**

Mistura	Consumo de cimento (kg/m³)	a/mc	Resistência à compressão (Mpa)	Desvio P.	Coef. de variação (%)	Resistência à compressão (Mpa)	Desvio P.	Coef. de variação (%)
			28 dias de cura			90 dias de cura		
CP VARI_A	367	0,55	25,12	0,596	2,37%	42,18	2,571	6,09%
CP VARI_25CV_A	275		29,48	1,104	3,75%	33,41	0,456	1,36%
CP VARI_10MK_A	330		23,44	0,126	0,54%	36,32	0,302	0,83%
CP VARI_8SA_A	338		32,61	2,354	7,22%	37,98	0,261	0,69%
CP VARI_B	474	0,45	39,34	1,397	3,55%	48,96	0,419	0,86%
CP VARI_25CV_B	356		32,01	0,406	1,27%	39,47	2,743	6,95%
CP VARI_10MK_B	427		41,59	0,601	1,45%	45,47	0,532	1,17%
CP VARI_8SA_B	436		43,11	1,289	2,99%	50,45	0,724	1,44%

Fonte: Autora (2022).

Observe-se que para as misturas de CP VARI\_A e CP VARI\_10MK\_A, com relação a/mc de 0,55 houve um ganho significativo de resistência à compressão, de 68% e 55%, respectivamente, entre os 28 e 90 dias. As misturas de CP VARI\_25CV\_A e CP VARI\_8SA\_A mostraram crescimento inferior, na ordem de 13% a 16% respectivamente. Já para as misturas com relação a/mc de 0,45, esse ganho de resistência foi menor, 24% para a mistura de referência, 23% para o CP VARI\_25CV\_B, 9% para o CP VARI\_10MK\_B e 17% para o CP VARI\_8SA\_B.

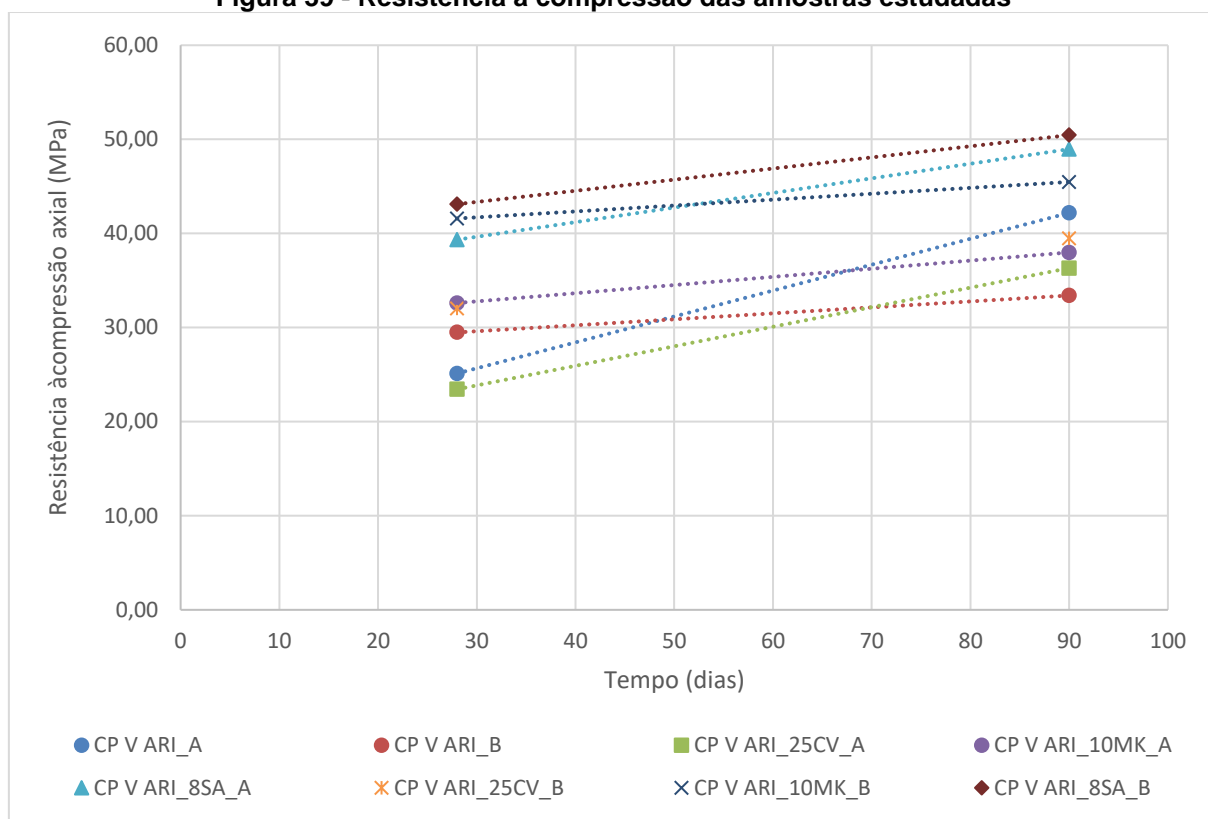
Contudo, mesmo com baixo ganho de resistência, todos os concretos ganharam resistência com o passar do tempo. Isso foi resultado da hidratação da matriz e da atividade pozolânica ocorrida.

Percebe-se que as amostras apresentam resistência à compressão axial maior para a relação a/mc de 0,45 em comparação às amostras de relação a/mc de 0,55. Esse comportamento já era esperado, sabendo-se que a ação de aumentar a disponibilidade de água na mistura resultará no enfraquecimento da matriz devido a uma maior porosidade (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

A Figura 39 evidencia essa tendência de acréscimo da resistência à compressão em função do tempo. Traços com presença de adições minerais têm as reações de hidratação mais lentas, enquanto o traço composto apenas com cimento

Portland de alta resistência inicial (CP V ARI) desenvolve as suas reações de hidratação nas primeiras idades de forma mais rápida.

**Figura 39 - Resistência à compressão das amostras estudadas**



Fonte: Autora (2022).

Em concordância com os resultados obtidos, Liu *et al.*, (2014) trabalharam com amostras de concreto contendo 30% de cinza volante em substituição ao cimento. Seus resultados apresentam uma redução de 23% para concretos com a cinza volante, quando comparado com concreto sem adição mineral, para uma relação a/mc de 0,47.

Cheng *et al.* (2017) também encontraram resultados à compressão menores para concreto contendo 15% de cinza volante. Entretanto, quando aplicado 5% de metacaulim houve um ganho de 11% para a relação a/mc = 0,47, quando comparado com concreto composto apenas com o CPV ARI, para mesma relação a/mc.

Por outro lado, Figueiredo, *et al.*, (2014) não obtiveram um ganho na resistência à compressão ao utilizar 10% de metacaulim, em substituição ao cimento. Em suas amostras, houve uma redução de 17% para os concretos com 10% de metacaulim, em comparação com o traço sem adição, apenas com o CP V ARI, para uma relação a/mc de 0,60. No caso de Figueiredo *et al.*, (2014) essa redução da resistência à

compressão pode ser reflexo de uma maior relação a/mc, se comparado a Liu (2014) e Cheng *et al.* (2017).

Sadati, Khanzadeh moradillo e Shekarchi (2017) trabalharam com sílica ativa com substituição de cimento de 12,5%. Eles obtiveram um ganho de 34% em amostras com relação a/mc de 0,40 e 31% quando aumentaram a relação a/mc para 0,50, em comparação com o concreto composto apenas com o cimento Portland.

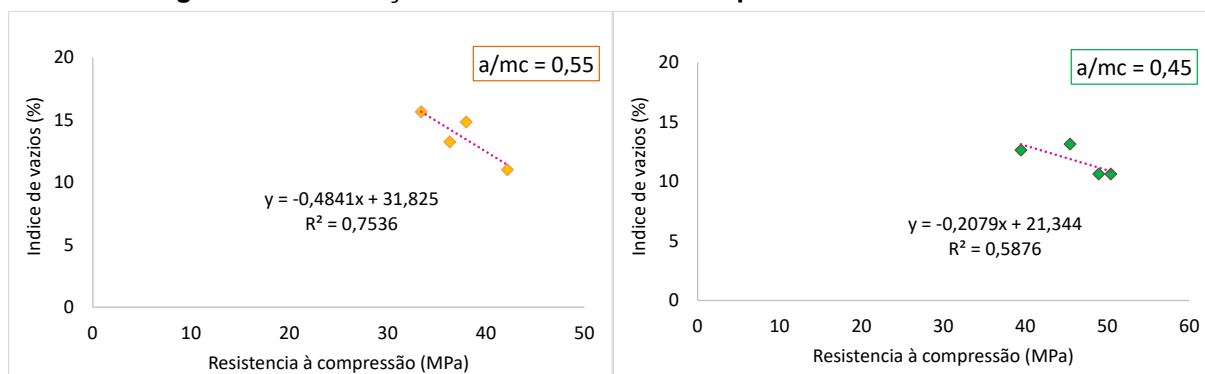
Langan, Weng e Ward (2002) estudaram o efeito da sílica ativa e da cinza volante na hidratação do cimento Portland aplicando ensaios calorimétrico. Os seus achados concluem que a sílica ativa acelera as reações de hidratação do cimento para a/mc maiores e retarda para a/mc menores, e quando aplicada a cinza volante acontece o efeito contrário.

A participação da relação água/materiais cimentícios é evidente para todas as considerações supracitadas. Por outro lado, o impacto da adição na resistência e na porosidade dependerá da idade e do grau de reatividade de cada adição.

Ao correlacionar o índice de vazios com a resistência à compressão, considerando os dois grupos de relações a/mc, foi obtida correlação linear  $R^2$  igual a 0,75 para amostras de relação a/mc e de 0,55 e 0,58 para as amostras de relação a/mc de 0,45, indicando uma boa correlação entre os resultados, conforme mostra a Figura 40. Essa relação vem mostrar que à resistência a compressão aumentou conforme o índice de vazios reduziu, principalmente para os concretos da família 0,55.

Com relação à cada traço especificamente, todas as misturas apresentam um ganho de resistência entre 28 e 90 dias após moldagem. O concreto que apresentou maior ganho de resistência foi o CPV ARI\_A, com 63% de 28 dias para 90 dias, acompanhado pelo CPV ARI\_10MK\_A com 55%, CPV ARI\_B com 24%, CPV ARI\_25CV\_B com 23%, CPV ARI\_8SA\_B com 17%, CPV ARI\_8SA\_A com 16%, CPV ARI\_25CV\_A com 13% e CPV ARI\_10MK\_B com ganho de 9%.

**Figura 40 - Correlação entre resistência à compressão e índice de vazios**



Fonte: Autora (2022).

#### 4.3.3. Resistividade elétrica superficial

Na Tabela 24 estão apresentados os resultados do ensaio de RES para todas as misturas de concreto trabalhadas nas idades de 28, 90, 154 e 220 e 260 dias.

Aos 28 dias de cura os concretos seguiram a seguinte ordem crescente de resistividade elétrica superficial (RES): CPV ARI\_A, CPV ARI\_10MK\_A, CPV ARI\_B, CPV ARI\_25CV\_A, CPV ARI\_10MK\_B, CPV ARI\_25CV\_B, CPV ARI\_8SA\_B e CPV ARI\_8SA\_A.

Comparando as misturas com adição e sem adição para cada relação a/mc obteve-se um aumento da RES de 40%, 17% e 185% em relação ao concreto referência, para relação a/mc de 0,55, para as misturas e CPV ARI\_25CV\_A, CPV ARI\_10MK\_A e CPV ARI\_8SA\_A, respectivamente. Para a relação a/mc de 0,45, esse percentual de acréscimo foi de 108% para CPV ARI\_25CV\_B, 70% para CPV ARI\_10MK\_B e 116% para CPV ARI\_8SA\_B.

**Tabela 24 - Resultado da RES para todas as misturas estudadas nas idades de 28, 90, 154, 220 e 260 dias**

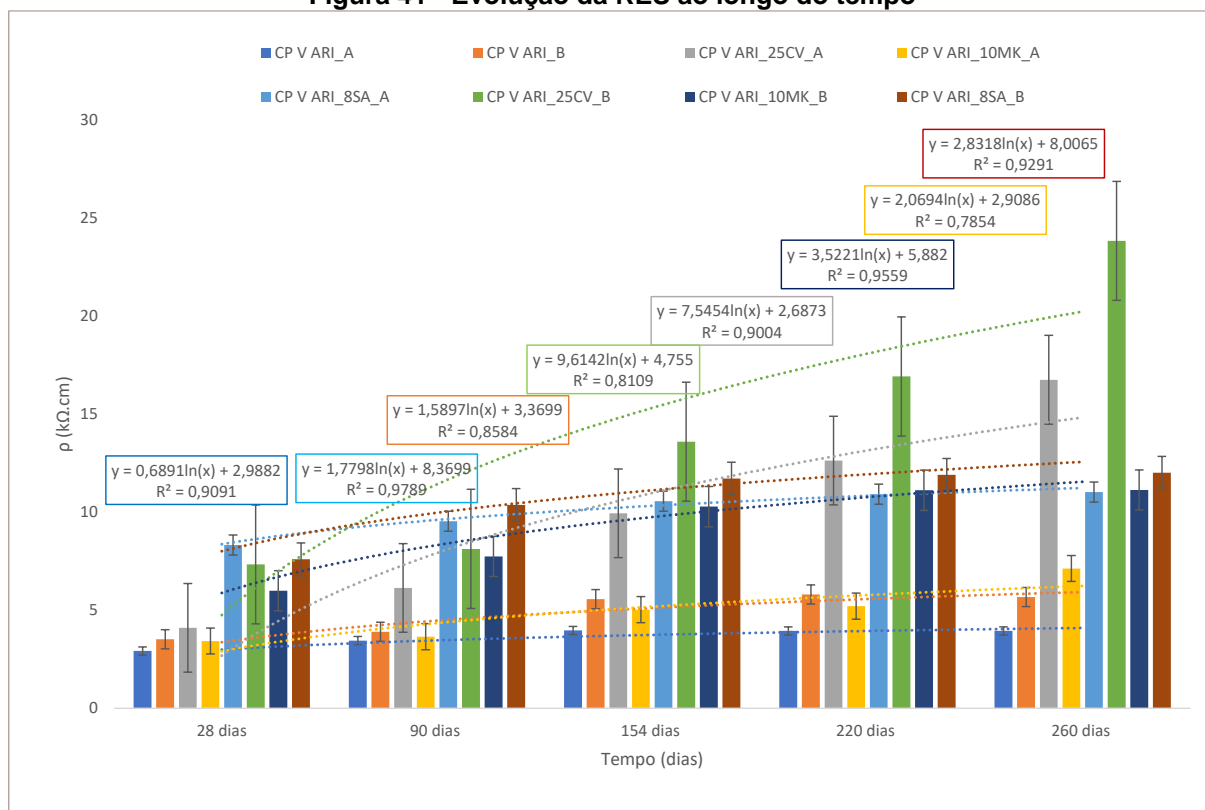
Misturas	28 dias		
	RES (kΩ.cm)	D. Padrão	C. Variação (%)
CP V ARI_A	2,92	0,40	14%
CP V ARI_25CV_A	4,09	0,26	6,36
CP V ARI_10MK_A	3,43	0,27	7,88
CP V ARI_8SA_A	8,32	0,44	5,25
CP V ARI_B	3,52	0,42	11,98
CP V ARI_25CV_B	7,34	0,79	10,75
CP V ARI_10MK_B	5,99	0,46	7,66
CP V ARI_8SA_B	7,59	0,68	8,94
Misturas	90 dias		
	RES (kΩ.cm)	D. Padrão	C. Variação (%)
CP V ARI_A	3,33	0,38	11,29
CP V ARI_25CV_A	6,14	0,43	6,96
CP V ARI_10MK_A	3,58	0,27	7,48
CP V ARI_8SA_A	9,54	0,74	7,72
CP V ARI_B	3,84	0,35	9,07
CP V ARI_25CV_B	8,13	0,64	7,81
CP V ARI_10MK_B	7,74	0,35	4,57
CP V ARI_8SA_B	10,37	0,58	5,57
Misturas	154 dias		
	RES (kΩ.cm)	D. Padrão	C. Variação (%)
CP V ARI_A	3,97	0,44	11%
CP V ARI_25CV_A	9,94	0,84	8%
CP V ARI_10MK_A	5,03	0,35	7%
CP V ARI_8SA_A	10,56	1,22	12%
CP V ARI_B	5,57	0,40	7%
CP V ARI_25CV_B	13,59	0,94	7%
CP V ARI_10MK_B	10,28	0,99	10%
CP V ARI_8SA_B	11,71	0,91	8%
Misturas	220 dias		
	RES (kΩ.cm)	D. Padrão	C. Variação (%)
CP V ARI_A	3,95	0,32	8%
CP V ARI_25CV_A	12,63	1,03	8%
CP V ARI_10MK_A	5,21	0,56	11%
CP V ARI_8SA_A	10,92	1,10	10%
CP V ARI_B	5,80	0,43	7%
CP V ARI_25CV_B	16,92	0,83	5%
CP V ARI_10MK_B	11,11	0,69	6%
CP V ARI_8SA_B	11,90	0,65	5%
Misturas	260 dias		
	RES (kΩ.cm)	D. Padrão	C. Variação (%)
CP V ARI_A	3,95	0,26	7%
CP V ARI_25CV_A	16,75	0,51	3%
CP V ARI_10MK_A	7,13	0,56	8%
CP V ARI_8SA_A	11,03	0,45	4%
CP V ARI_B	5,67	0,25	4%
CP V ARI_25CV_B	23,83	1,79	8%
CP V ARI_10MK_B	11,14	0,37	3%
CP V ARI_8SA_B	12,01	0,98	8%

Fonte: Autora (2022).



A Figura 41 traz a representação gráfica dos resultados de RES ao longo do tempo.

**Figura 41 - Evolução da RES ao longo do tempo**



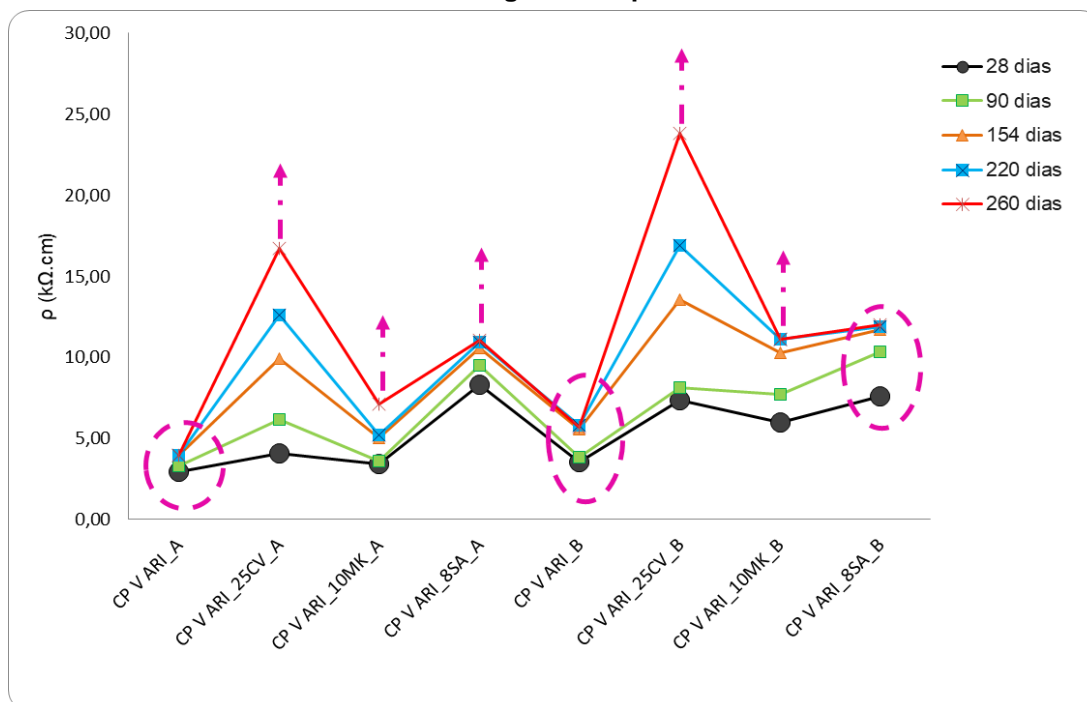
Fonte: Autora (2022).

Com relação ao efeito isolado do tipo de adição mineral, amostras com cinza volante foram as que mostraram maior capacidade de ganho de resistividade ao longo tempo, seguida pela sílica ativa e metacaulim. O traço de referência foi a mistura com menor ganho de RES, com tendências de estabilização após os 90 dias.

Todos os traços com presença de adição mineral apresentam uma tendência de aumento da resistividade elétrica superficial do concreto. Observa-se que todas as linhas de tendência de crescimento logarítmico mostram um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) maior que 0,78. As barras de erro representam o desvio de uma população de 18 dados.

Aos 154 dias, o traço CPV ARI\_A apresentou sinais de estabilização e aos 220 dias iniciou a sua estabilização, não mais demonstrando crescimento até a idade de 260 dias de acompanhamento. Quanto às misturas CPV ARI\_B e CPV ARI\_8SA\_B, o sinal de estabilização veio aos 220 dias e aos 260 apresentou estabilização, enquanto, as demais misturas continuam aumentando a RES (Figura 42).

**Figura 42 - Identificação de misturas que estabilizaram, e aquelas que ainda apresentam aumento da RES ao longo do tempo de monitoramento**



Fonte: Autora (2022).

Todas as misturas, quando comparado o seu crescimento com o traço referência, evidencia um crescimento contínuo para as idades de 90, 154, 220 e 260 dias. Aos 260 dias, idade da última coleta, a ordem de crescimento dos traços foi CPV ARI\_25CV\_A  $\approx$  CPV ARI\_25CV\_B com 324% e 320%, respectivamente; CPV ARI\_8SA\_B com 96%; CPV ARI\_8SA\_A com 81%; CPV ARI\_10MK\_B com 96%; e CPV ARI\_10MK\_A com 81%.

Entretanto, os concretos com cinza volante foram os que apresentaram maior índice de vazios, menor resistência aos 90 dias, mas foram os de maior resistividade aos 260 dias, evidenciando o papel da maturação da amostra em idades avançadas. A sílica ativa demonstrou alta resistividade nas amostras desde os 28 dias e continuou em crescimento, atingindo a segunda adição mineral apresentar alta resistividade. O metacaulim apresentou uma alta reatividade no ensaio de IAP, mas a resistividade não apresentou um crescimento de grandes porcentagens. Essa adição apresentou comportamento próximo aos concretos com cimento Portland.

No todo, a relação a/mc não apresentou influência significativamente visível para os concretos trabalhados. Talvez com uma análise estatística, a quantificação da sua influência sobre essa característica do concreto fique mais clara, fato que será considerado em trabalhos futuros. Outrossim, o tempo de maturação foi uma variável

importante, permitiu acompanhar o desenvolvimento da hidratação do concreto, acompanhando a sua resistividade e, por fim, as adições minerais foram, sem dúvida, as maiores responsáveis pelo ganho de resistividade nas amostras aqui apresentadas.

#### 4.3.4. Perfis de cloretos

Os perfis foram traçados a partir das concentrações obtidas das camadas pulverizadas do corpo de prova. As camadas foram pré-estabelecidas e apresentadas no item 3.2.2. Os perfis estão expostos nas Figuras 42 a 49, para cloretos totais, e nas Figuras 50 a 57, para cloretos livres.

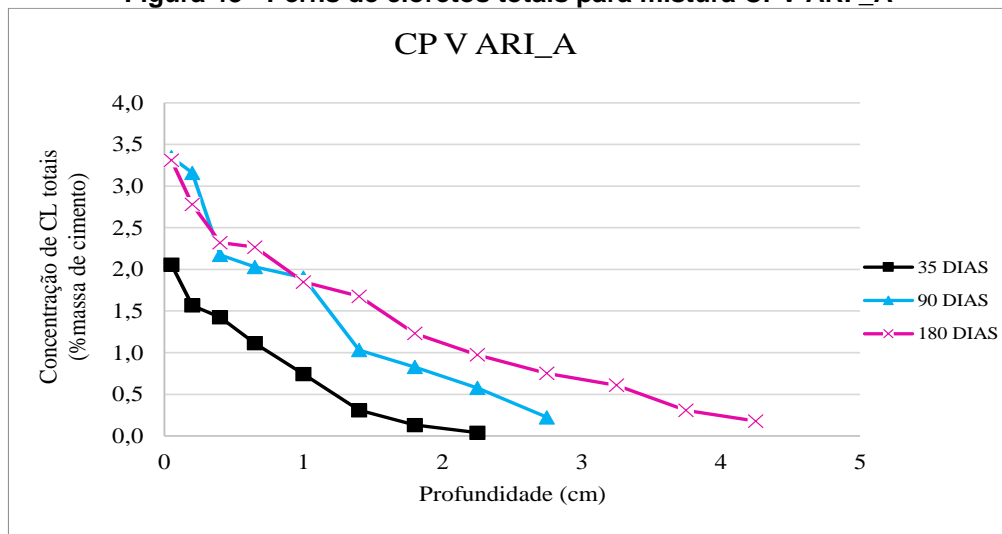
Como esperado, percebe-se uma redução da concentração de cloretos em relação à massa de cimento, com o aumento da profundidade. Esse comportamento esperado, pois está se trabalhando com ensaios de difusão, quando o transporte acontece naturalmente do ambiente mais concentrado (externo) para o meio menos concentrado (interior da amostra) e com o passar do tempo de exposição das amostras, à solução de cloretos, é visto um ganho de concentração para todas as profundidades.

Ao comparar os perfis de cloretos totais com os livres, observa-se que há uma diferença de concentração para uma mesma profundidade, sendo a quantidade da concentração de cloretos totais superiores aos cloretos livres. Esse resultado é explicado pela capacidade de ligação de íons cloreto à matriz cimentícia.

Com relação ao uso de adições minerais em substituição ao cimento em massa no concreto, percebe-se que as misturas com cinza volante e metacaulim apresentaram maior capacidade de ligação de cloretos, tanto para as amostras com relação a/mc de 0,45 quanto para as amostras com relação a/mc de 0,55. Esse comportamento se explica em função de sua composição química, com alto teor de alumina, se comparado ao cimento Portland CP V ARI e sílica ativa.

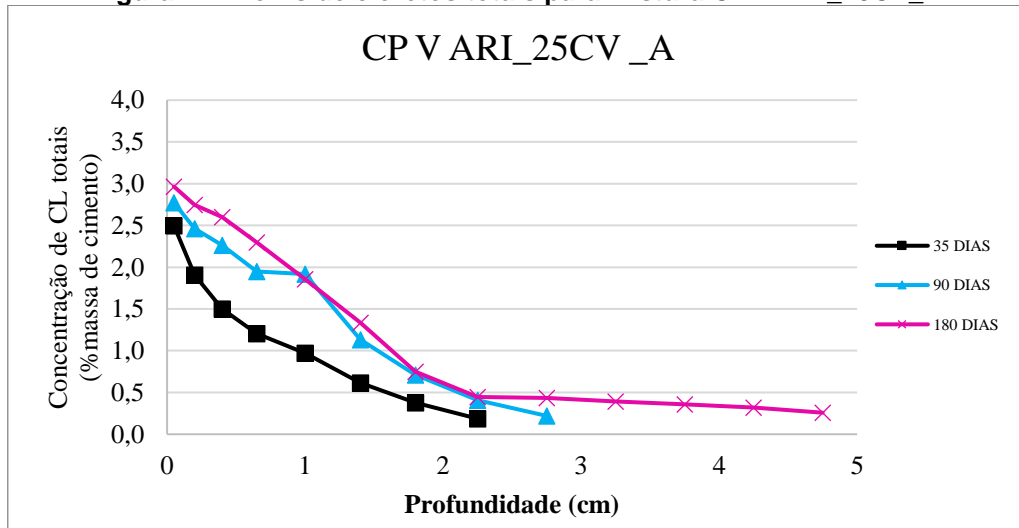
- *Perfis de cloretos totais para as misturas estudadas*

**Figura 43 - Perfis de cloretos totais para mistura CPV ARI\_A**



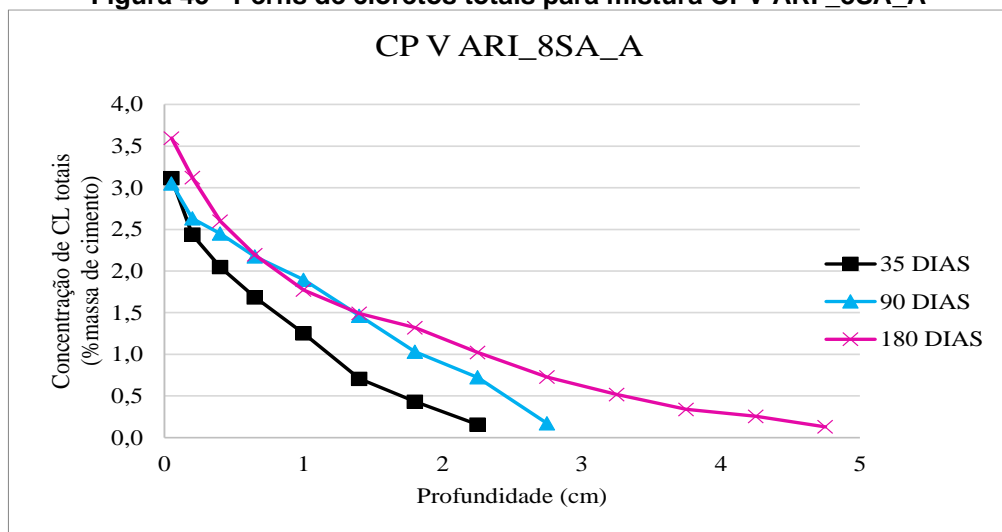
Fonte: Autora (2022).

**Figura 44 - Perfis de cloretos totais para mistura CPV ARI\_25CV\_A**



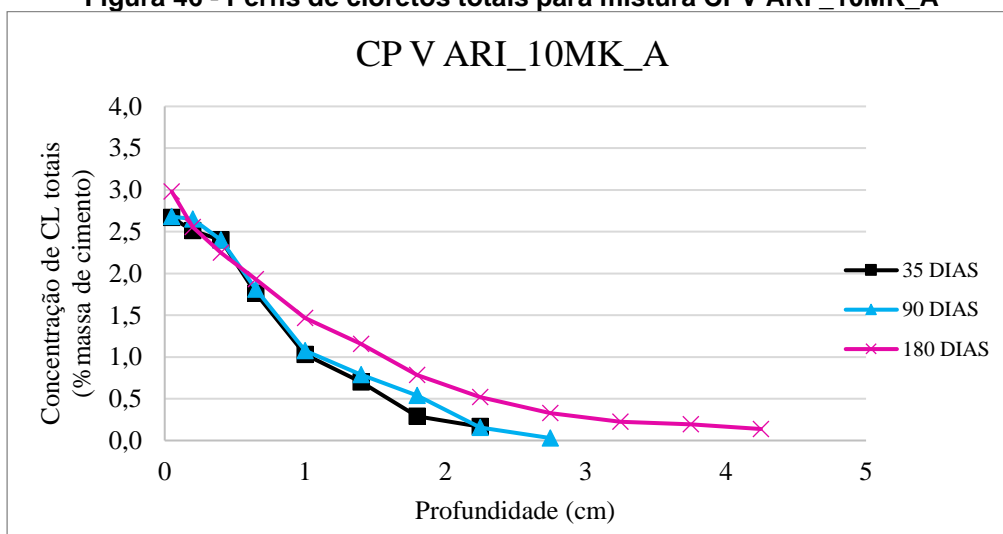
Fonte: Autora (2022).

**Figura 45 - Perfis de cloretos totais para mistura CPV ARI\_8SA\_A**



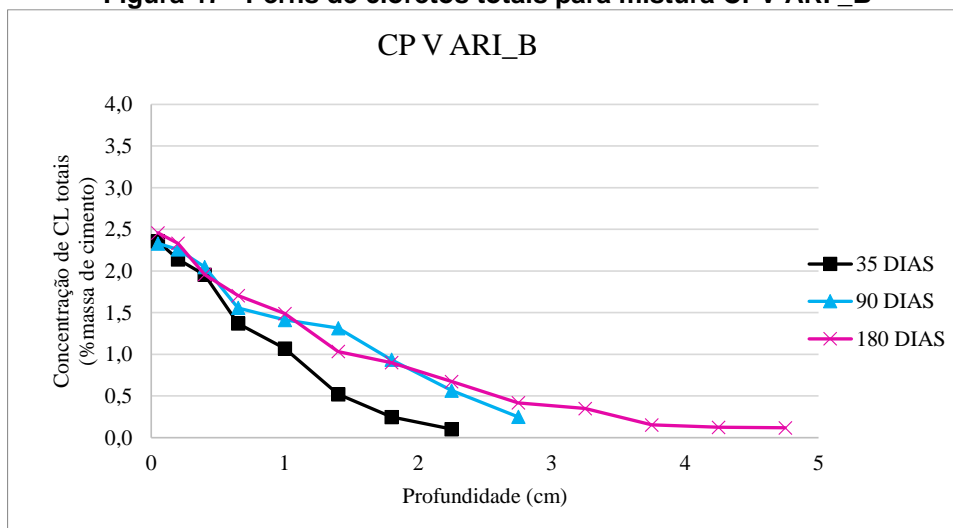
Fonte: Autora (2022).

**Figura 46 - Perfis de cloretos totais para mistura CPV ARI\_10MK\_A**



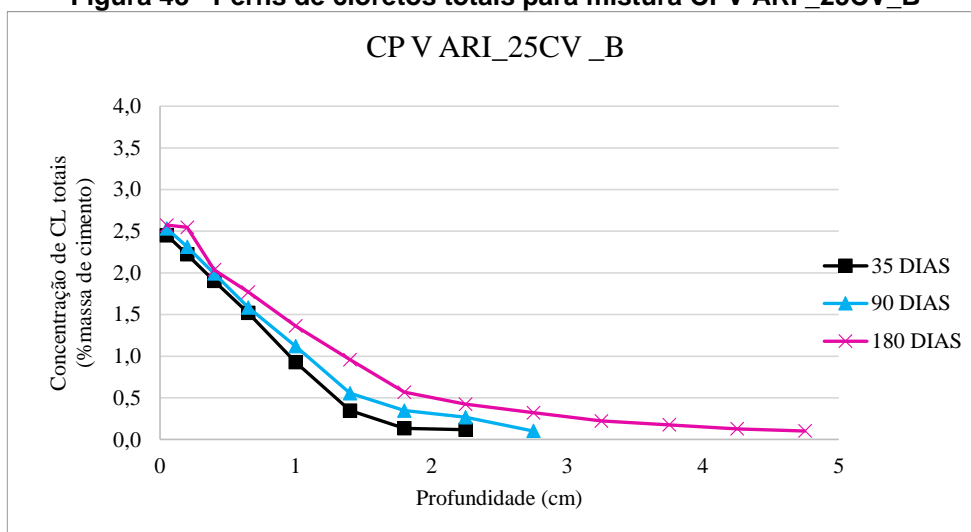
Fonte: Autora (2022).

**Figura 47 - Perfis de cloretos totais para mistura CPV ARI\_B**



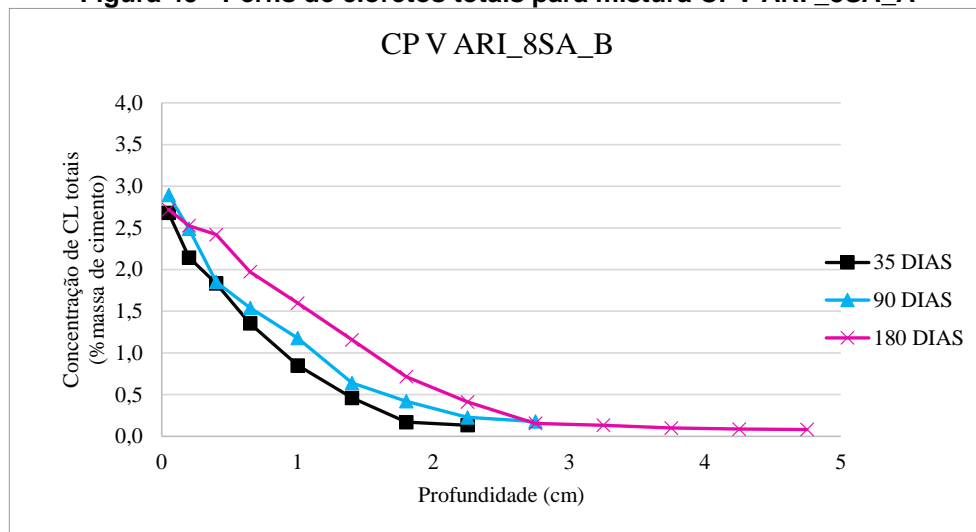
Fonte: Autora (2022).

**Figura 48 - Perfis de cloretos totais para mistura CPV ARI\_25CV\_B**



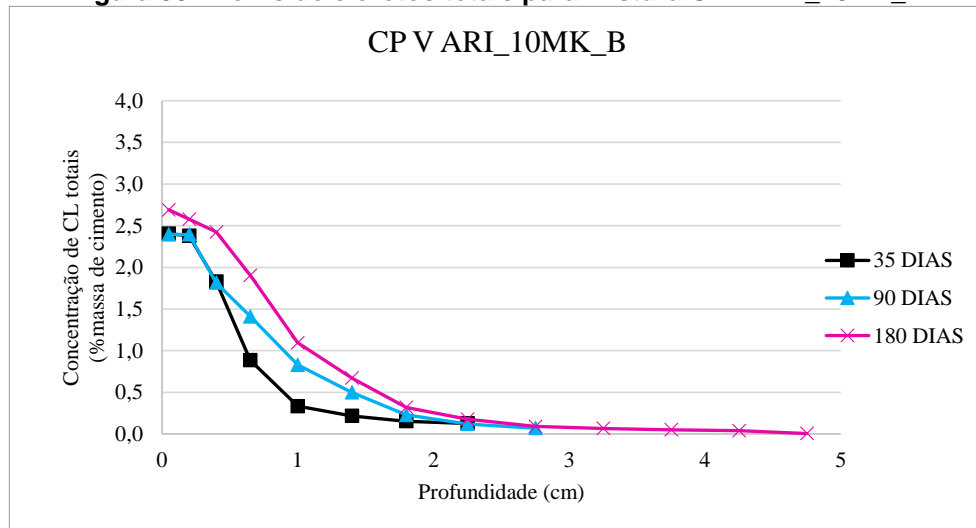
Fonte: Autora (2022).

**Figura 49 - Perfis de cloretos totais para mistura CPV ARI\_8SA\_A**



Fonte: Autora (2022).

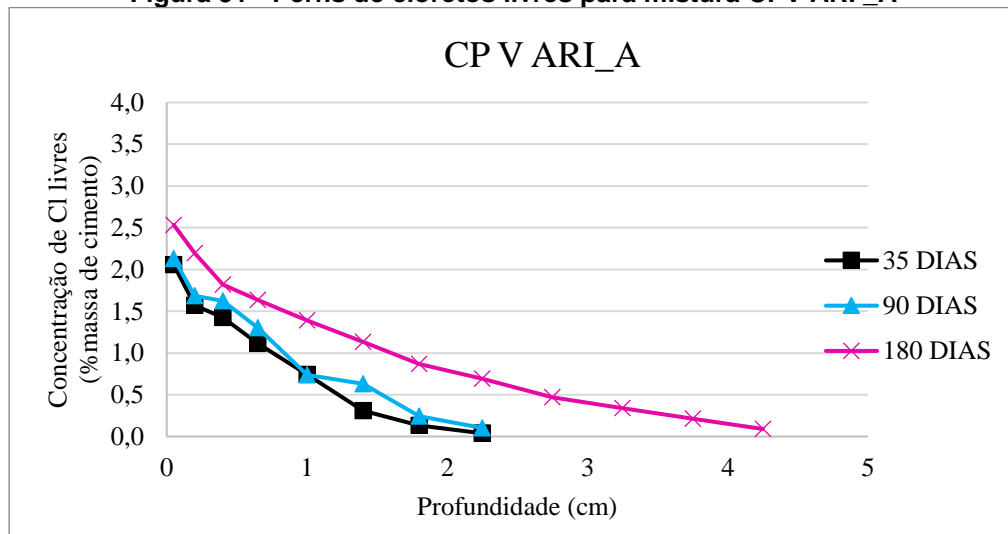
**Figura 50 - Perfis de cloretos totais para mistura CPV ARI\_10MK\_B**



Fonte: Autora (2022).

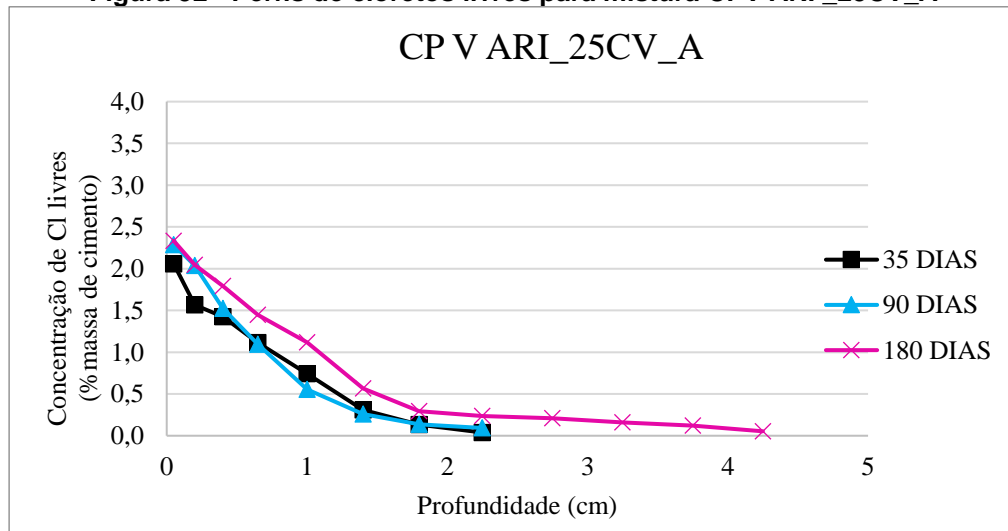
- Perfis de cloretos livres para as misturas estudadas

**Figura 51 - Perfis de cloretos livres para mistura CPV ARI\_A**



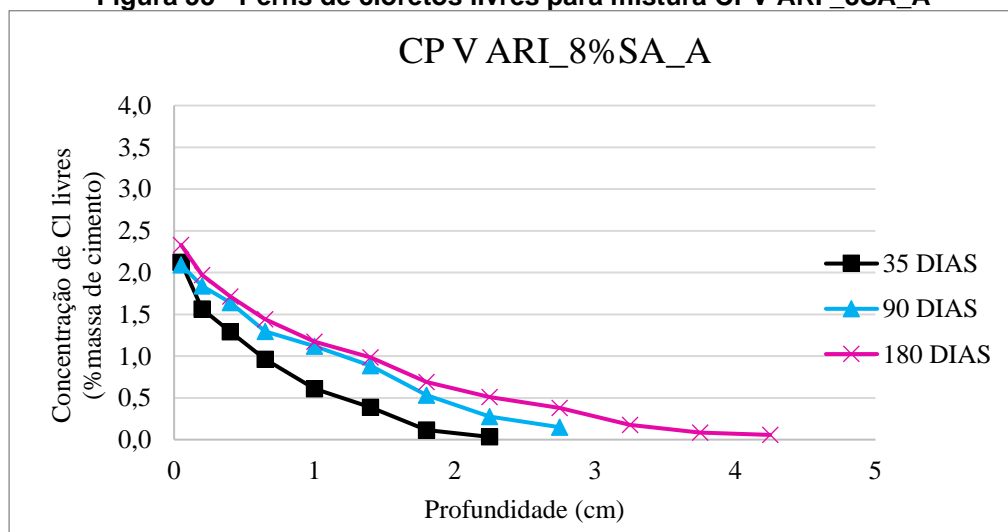
Fonte: Autora (2022).

**Figura 52 - Perfis de cloretos livres para mistura CPV ARI\_25CV\_A**



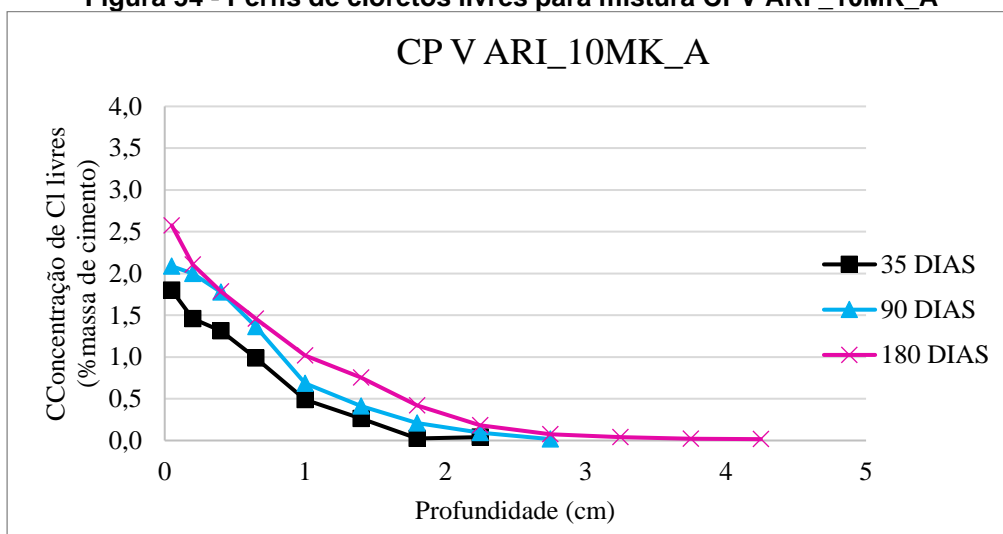
Fonte: Autora (2022).

**Figura 53 - Perfis de cloretos livres para mistura CPV ARI\_8%SA\_A**



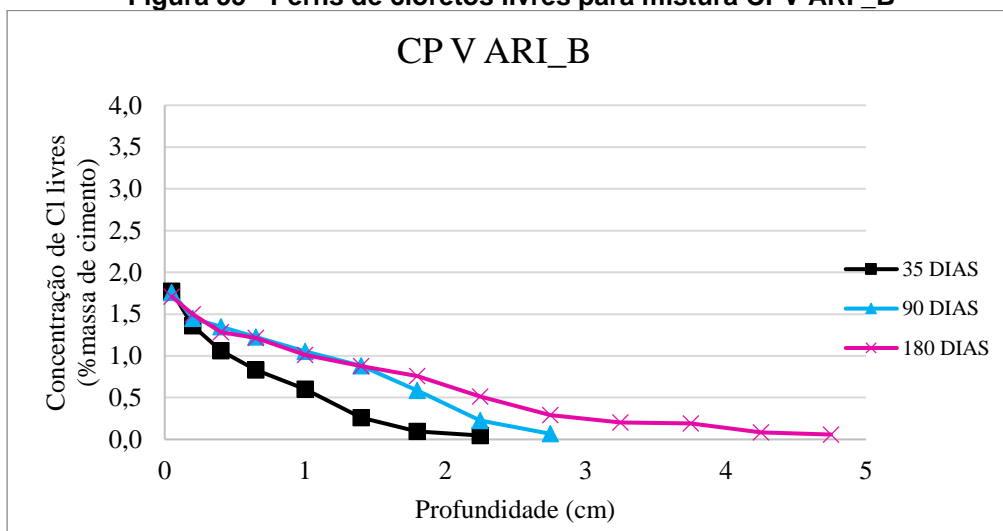
Fonte: Autora (2022).

**Figura 54 - Perfis de cloretos livres para mistura CPV ARI\_10MK\_A**



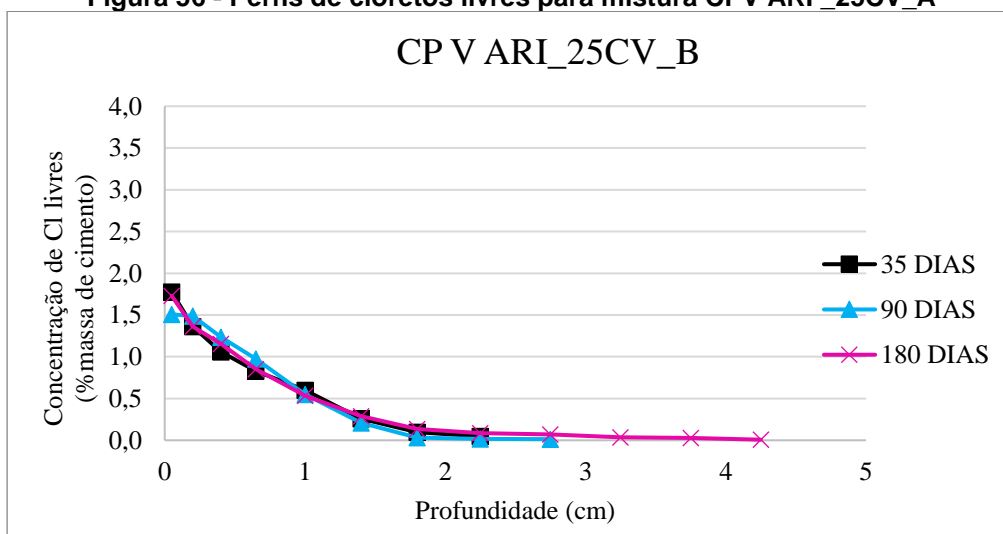
Fonte: Autora (2022).

**Figura 55 - Perfis de cloretos livres para mistura CPV ARI\_B**



Fonte: Autora (2022).

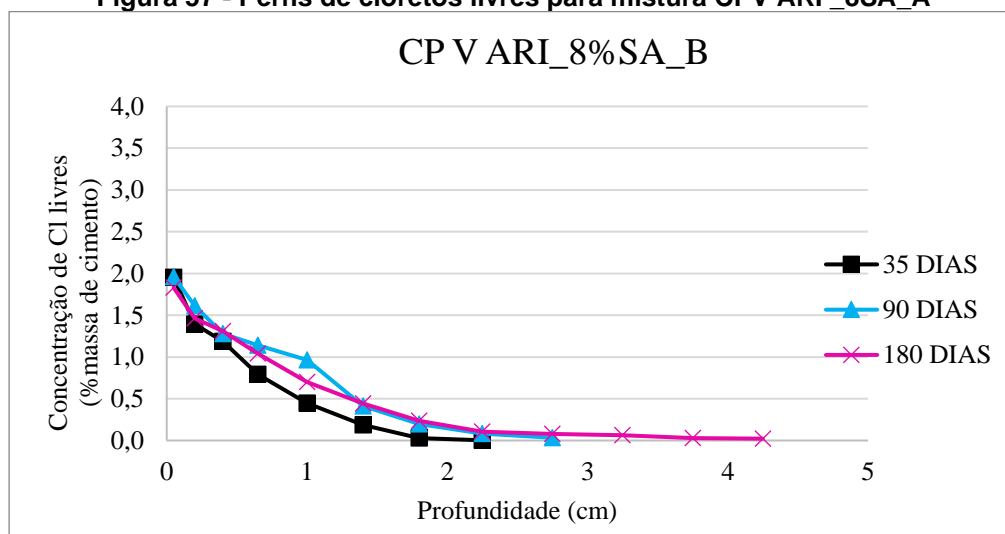
**Figura 56 - Perfis de cloretos livres para mistura CPV ARI\_25CV\_A**



Fonte: Autora (2022).

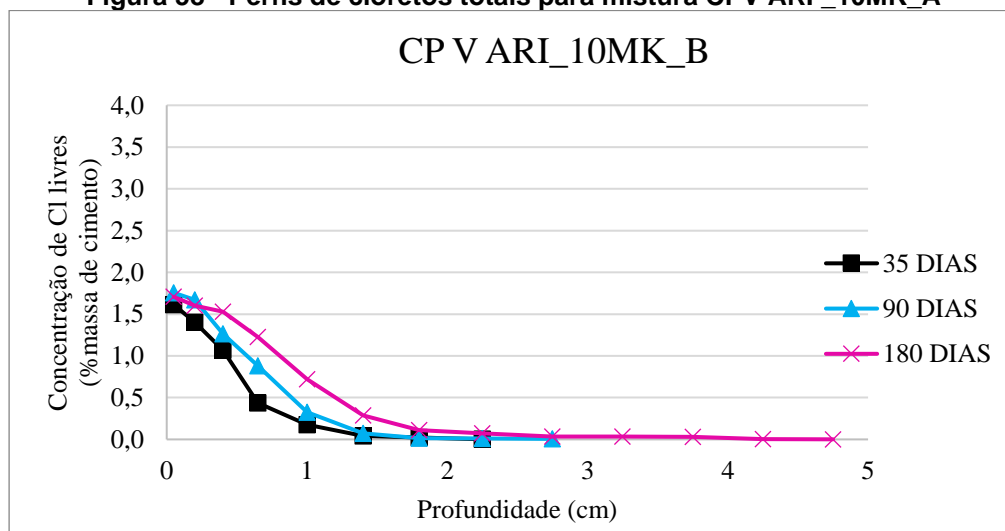


**Figura 57 - Perfis de cloretos livres para mistura CPV ARI\_8SA\_A**



Fonte: Autora (2022).

**Figura 58 - Perfis de cloretos totais para mistura CPV ARI\_10MK\_A**



Fonte: Autora (2022).

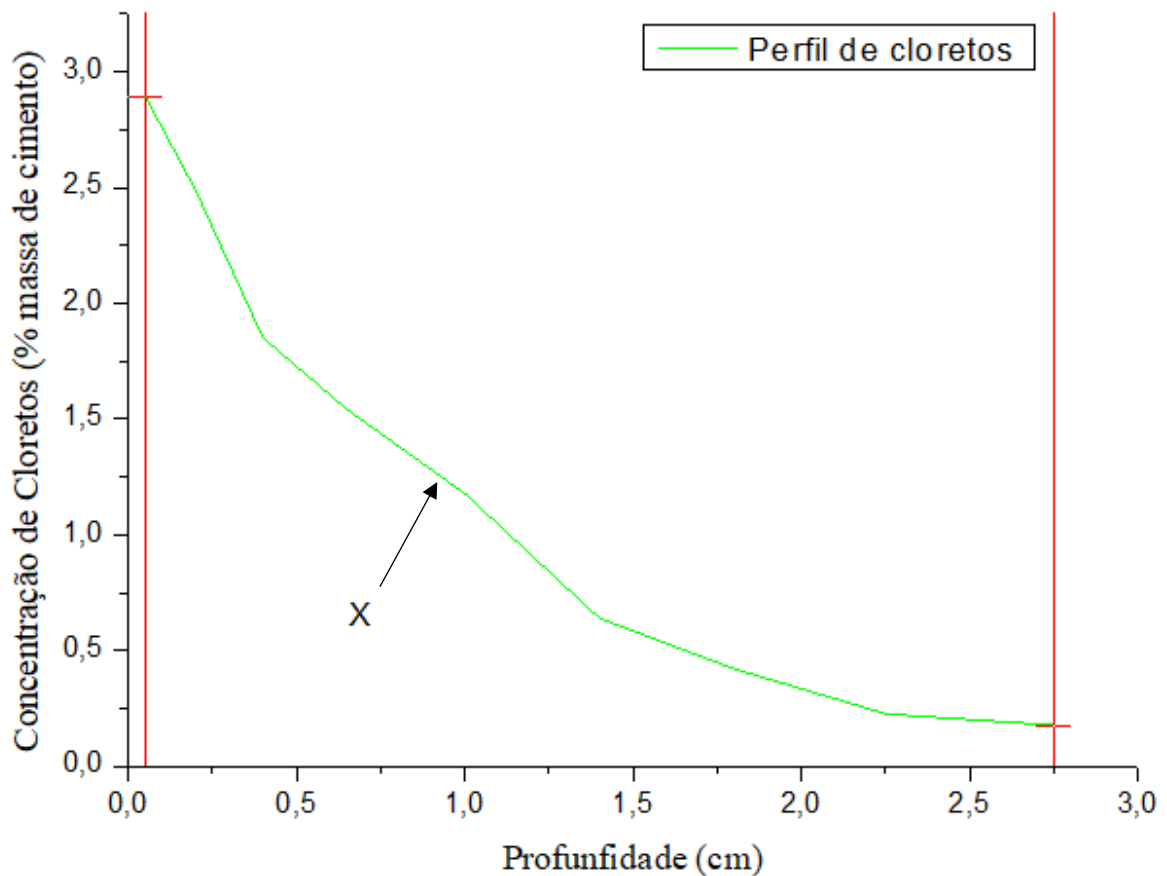
#### 4.3.5. Concentração de íons cloreto acumulados, por mistura

A partir das concentrações obtidas em cada camada, por titulação potenciométrica, foi verificada a capacidade de transporte dos íons cloretos por meio da concentração total transportada por cada amostra.

Para extrair esse resultado dos perfis, foi calculada a integral da área sob o perfil traçado (livres e totais), chamada de "x" (Figura 59), utilizando o software Origin 8.0. A Tabela 25 traz esses resultados para todas as misturas trabalhadas em todas as idades de coleta.

**Figura 59 - Representação esquemática dos intervalos considerados para o cálculo da integral da concentração do perfil, obtido para cloretos livres e totais**

Fonte: Autora (2022).



Fonte: autor (2022)

As amostras com presença de 10% de metacaulim foram as que tiveram menor quantidade de íons cloreto transportados. Seguida pelos concretos com 25% de cinza volante, 8% de sílica ativa e amostras referência para as duas relações a/mc trabalhada.

Se realizado a diferença das concentrações transportadas, entre cloretos totais e cloretos livres, no perfil estudado, para a mistura de relação a/mc 0,55, a amostra referência foi a que apresentou maior diferença, caracterizando como aquele que capturou maior quantidade de íons cloretos, seguido pelo traço CP V\_8SA\_A, CP V\_10MK\_A e CP V\_25CV\_A. Para as misturas com relação a/mc de 0,45, o concreto com cinza volante, foi a que resultou em maior capacidade de fixação, seguido pelo concreto CP V\_8SA\_B, CP V\_10MK\_B e CP V ARI\_B.

**Tabela 25 - Integral de  $\text{Cl}^-$  por perfil de cloretos livres e totais para concretos com relação a/mc de 0,55 e 0,45 após 35, 90 e 180 dias de exposição na solução de NaCl, com concentração de 2,8 M**

Concentração total de cloretos por perfil			
Misturas	Tempo de exposição	% de massa em relação a massa de cimento	(% de massa em relação a massa de cimento)
	Dias	$[\text{Cl}^- \text{ livres}]$	$[\text{Cl}^- \text{ totais}]$
CP VARI_A	35	1,57	2,68
	90	2,59	3,71
	180	3,70	5,25
CP VARI_25 CV_A	35	1,26	2,14
	90	2,31	3,29
	180	3,32	4,41
CP VARI_10 MK_A	35	1,49	2,54
	90	1,87	2,78
	180	2,42	3,79
CP VARI_8SA_A	35	1,49	2,67
	90	2,41	4,01
	180	3,74	5,32
CP VARI_B	35	1,19	2,08
	90	2,31	3,28
	180	2,75	3,77
CP VARI_25CV_B	35	1,26	2,03
	90	1,24	2,46
	180	1,91	3,42
CP VARI_10MK_B	35	0,83	1,63
	90	1,30	2,11
	180	1,67	2,79
CP VARI_8SA_B	35	1,12	1,96
	90	1,69	2,56
	180	2,27	3,60

Fonte: Autora (2022).

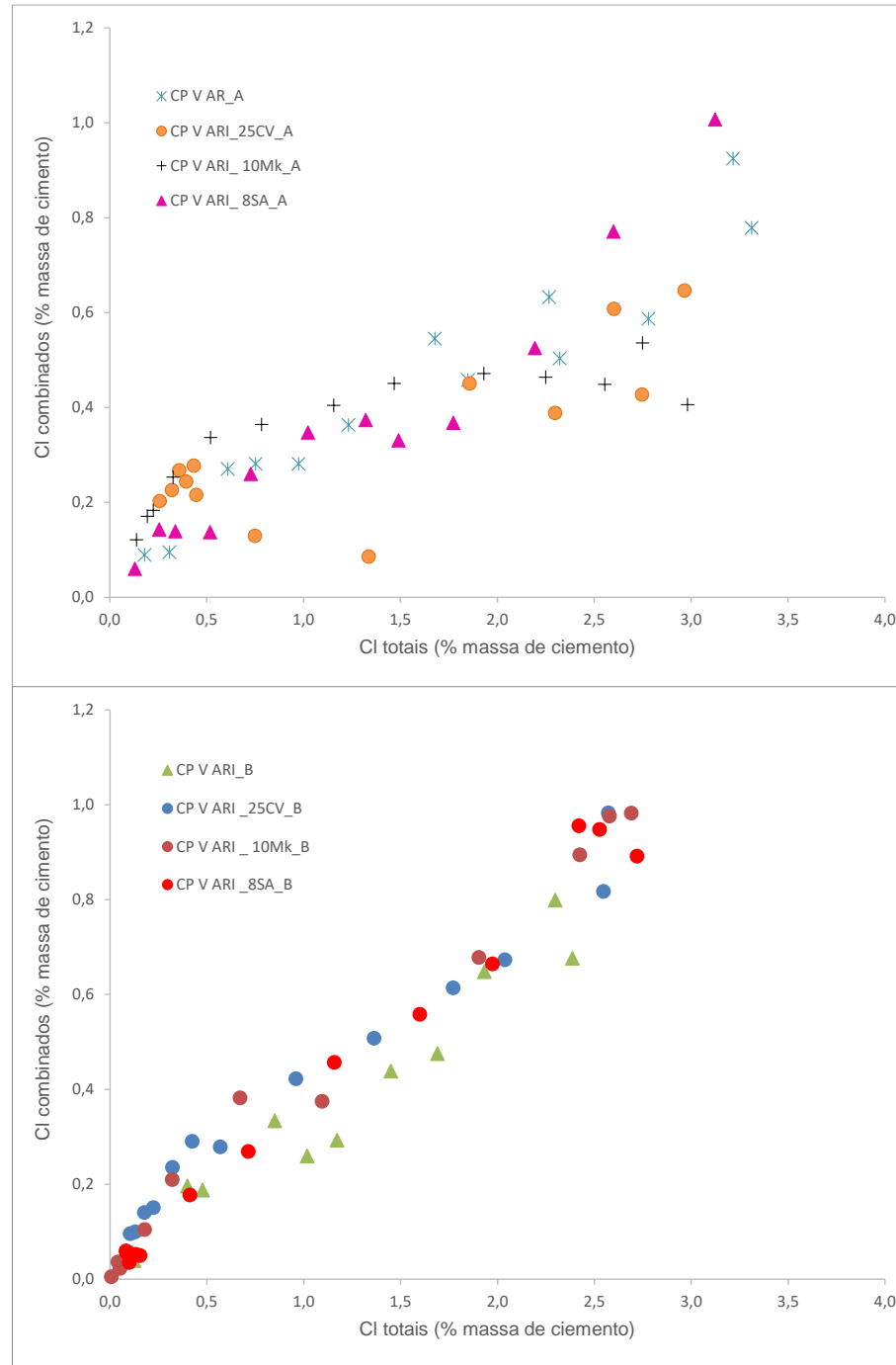
#### 4.3.6. Capacidade de ligação de cloretos

As propriedades de ligação de íons cloreto à matriz cimentícia são geralmente definidas na forma de uma isoterma de ligação, com a quantidade de cloretos combinados expressa em função da concentração de cloretos totais (MARTÍN-PÉREZ, 1999). As principais isotermas são: Freundlich e Langmuir, porém uma relação linear também pode ser aplicada.

Na Figura 60, é apresentada a relação entre cloretos combinados e cloretos totais, representando essa capacidade de ligação de cloretos. Para melhor

entendimento do que foi plotado, os cloretos combinados são a diferença entre a concentração de cloretos totais e cloretos livres.

**Figura 60 - Cloretos combinados x cloretos totais (% massa de cimento)**



Fonte: Autora (2022).

#### 4.3.7. Coeficiente de difusão de cloretos

Após obter os perfis de cloretos para cada amostra, realizou-se uma média de três perfis para cada mistura. Em seguida, realizaram-se ajustes a esses perfis médios

foram ajustados para as três abordagens discutidas no item 2.3.1 referente ao cálculo do coeficiente de difusão ( $D$ ); a concentração superficial ( $C_s$ ) e o fator de idade ( $n$ ), aplicando os ajustes das equações 10, 11 e 16.

Nas Tabela 26 e 27, são apresentados os valores de  $D_{ns}$  e  $C_s$  para os perfis de cloretos livres e totais para todas as misturas de concreto nas idades de 35, 90 e 180 dias de exposição a solução de íons cloreto, a partir dos ajustes da equação 10 aos perfis experimentais. Os resultados dos ajustes da equação 11 são apresentados na Tabela 28. Por fim, a tabela 29 traz os resultados dos ajustes da Equação 16 aos perfis experimentais.

**Tabela 26 - Coeficiente de difusão ( $D_{ns}$ ) e concentração superficial ( $C_s$ ) para as misturas de concreto após ajuste à segunda lei de Fick (Equação 10) – Cloretos livres**

Concreto	Após 35 dias de exposição		Após 90 dias de exposição		Após 180 dias de exposição	
	$C_s$ (%)	$D_{ns}$ (cm <sup>2</sup> /s)	$C_s$ (%)	$D_{ns}$ (cm <sup>2</sup> /s)	$C_s$ (%)	$D_{ns}$ (cm <sup>2</sup> /s)
CP V ARI_A	2,05	$1,93 \times 10E-07$	2,17	$1,81 \times 10E-07$	2,46	$1,45 \times 10E-07$
CP V ARI_25CV_A	1,58	$1,09 \times 10E-07$	2,26	$8,95 \times 10E-08$	2,52	$8,06 \times 10E-08$
CP V ARI_10MK_A	1,85	$1,62 \times 10E-07$	2,30	$7,75 \times 10E-08$	2,38	$6,81 \times 10E-08$
CP V ARI_8SA_A	2,09	$1,33 \times 10E-07$	2,06	$1,01 \times 10E-07$	2,20	$7,11 \times 10E-08$
CP V ARI_B	1,59	$1,38 \times 10E-07$	1,95	$1,15 \times 10E-07$	1,47	$8,98 \times 10E-08$
CP V ARI_25CV_B	1,78	$1,71 \times 10E-07$	1,66	$7,32 \times 10E-08$	1,79	$5,78 \times 10E-08$
CP V ARI_10MK_B	1,80	$6,61 \times 10E-07$	2,41	$3,52 \times 10E-08$	2,02	$4,04 \times 10E-08$
CP V ARI_8SA_B	1,86	$1,07 \times 10E-07$	1,92	$1,07 \times 10E-07$	1,83	$8,27 \times 10E-08$

Fonte: Autora (2022).

**Tabela 27 - Coeficiente de difusão ( $D_{ns}$ ) e concentração superficial ( $C_s$ ) para as misturas de concreto após ajuste à segunda lei de Fick (Equação 10) – Cloretos totais**

Concreto	Após 35 dias de exposição		Após 90 dias de exposição		Após 180 dias de exposição	
	$C_s$ (%)	$D_{ns}$ (cm <sup>2</sup> /s)	$C_s$ (%)	$D_{ns}$ (cm <sup>2</sup> /s)	$C_s$ (%)	$D_{ns}$ (cm <sup>2</sup> /s)
CP V ARI_A	2,98	$2,61 \times 10E-07$	3,28	$1,47 \times 10E-07$	3,25	$1,55 \times 10E-07$
CP V ARI_25CV_A	2,39	$2,30 \times 10E-07$	2,79	$1,80 \times 10E-07$	3,27	$6,32 \times 10E-08$
CP V ARI_10MK_A	2,92	$2,31 \times 10E-07$	2,94	$1,00 \times 10E-07$	2,89	$9,43 \times 10E-08$
CP V ARI_8SA_A	2,48	$2,25 \times 10E-07$	3,03	$2,21 \times 10E-07$	3,35	$1,03 \times 10E-07$
CP V ARI_B	2,50	$2,23 \times 10E-07$	2,60	$1,77 \times 10E-07$	2,78	$6,11 \times 10E-08$
CP V ARI_25CV_B	2,62	$1,81 \times 10E-07$	2,66	$7,58 \times 10E-08$	2,70	$7,58 \times 10E-08$
CP V ARI_10MK_B	2,77	$7,18 \times 10E-07$	2,78	$6,65 \times 10E-08$	2,98	$4,51 \times 10E-08$
CP V ARI_8SA_B	2,68	$1,63 \times 10E-07$	2,84	$8,75 \times 10E-08$	2,87	$6,05 \times 10E-08$

Fonte: Autora (2022).

**Tabela 28 - Coeficiente de difusão inicial (D0) para as misturas de concreto após ajuste à segunda lei de Fick (Equação 11) – t0= 28 dias e t= 180 dias**

Concreto	Cloretos totais		Cloretos livres	
	D0 (cm²/s)	R²	D0 (cm²/s)	R²
CP V ARI_A	3,00 x 10E-07	0,97	2,00 x 10E-07	0,77
CP V ARI_25CV_A	3,00 x 10E-07	0,95	1,00 x 10E-07	0,99
CP V ARI_10MK_A	2,00 x 10E-07	0,97	2,00 x 10E-07	0,94
CP V ARI_8SA_A	3,00 x 10E-07	0,97	1,00 x 10E-07	0,97
CP V ARI_B	3,00 x 10E-07	0,98	1,00 x 10E-07	0,97
CP V ARI_25CV_B	2,00 x 10E-07	0,99	2,00 x 10E-07	0,98
CP V ARI_10MK_B	8,80 x 10E-08	0,98	6,00 x 10E-08	0,75
CP V ARI_8SA_B	2,00 x 10E-07	0,99	1,00 x 10E-08	0,84

Fonte: Autora (2022).

**Tabela 29 - Coeficiente de difusão inicial (D0) e Cs (%) para as misturas de concreto após ajuste à segunda lei de Fick (Equação 16) – t0 = 28; ts = 28; t = texp + ts**

Concreto	Cloretos totais			Cloretos livres		
	Cs (%)	D0 (cm²/s)	R²	Cs (%)	D0 x 10E-07(cm²/s)	R²
CP V ARI_A	3,17	1,81 x 10E-07	0,97	2,29	9,61 x 10E-08	0,97
CP V ARI_25CV_A	2,95	1,04 x 10E-07	0,95	2,31	6,86 x 10E-08	0,95
CP V ARI_10MK_A	2,94	2,18 x 10E-07	0,97	2,28	4,13 x 10E-08	0,93
CP V ARI_8SA_A	3,13	2,32 x 10E-07	0,97	2,11	1,21 x 10E-07	0,99
CP V ARI_B	2,39	3,84 x 10E-07	0,98	1,68	1,98 x 10E-07	0,97
CP V ARI_25CV_B	2,69	2,61 x 10E-07	0,99	1,77	2,54 x 10E-07	0,97
CP V ARI_10MK_B	2,81	1,05 x 10E-07	0,98	1,91	6,65 x 10E-08	0,98
CP V ARI_8SA_B	2,87	1,51 x 10E-07	0,99	1,89	1,35 x 10E-07	0,98

Fonte: Autora (2022).

#### 4.3.8. Capacidade de transporte de cloretos

Os íons cloreto capazes de ser transportados no interior das amostras são os cloretos livres. A velocidade de transporte ou tipo de transporte vai variar de acordo com as condições ambientais e da sua interação com a estrutura, bem como das características física e químicas do concreto.

Considerando o coeficiente de difusão, observa-se que a capacidade de transporte foi reduzida com o passar do tempo. Associado a isso, a capacidade de ligação de cloretos é um fator importante para a velocidade de transporte dos íons cloreto (ANDRADE, 2001). Nesse sentido a Figura 60 mostrou essa relação dos cloretos combinados em relação à concentração de cloretos totais para todas as misturas trabalhadas ao longo do perfil estudado.

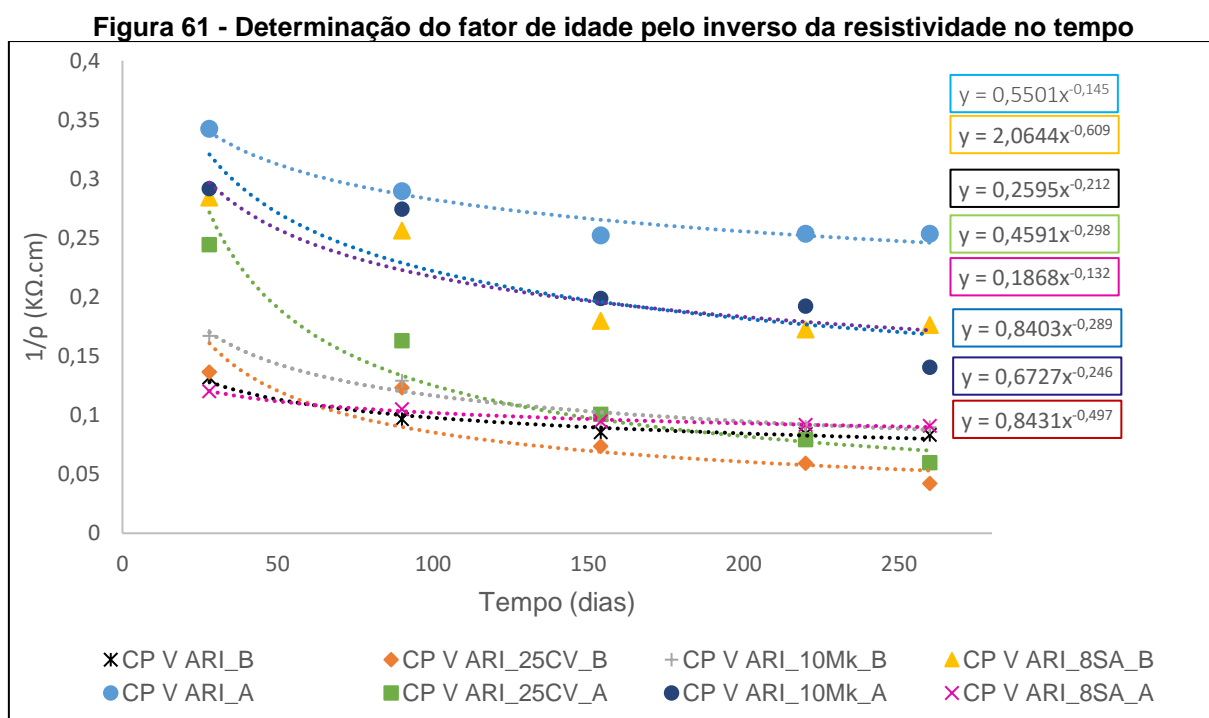
Os resultados mostraram que os concretos com cinza volante, com metacaulim, com sílica ativa e concreto referência, nessa ordem decrescente, apresentaram maior

capacidade de fixação de íons cloreto à matriz cimentícia. Assim, concretos com adições minerais, para esse programa experimental, resultou em misturas com menor capacidade de transporte desse agente agressivo,  $\text{Cl}^-$ , o que pode ser atribuído à maior quantidade de alumina nessas adições empregadas (Tabela 16) ajustada a quantidade de material empregada (% em massa de cimento).

#### 4.4. FATOR DE IDADE

##### 4.4.1. Fator de idade do concreto ( $q$ ) considerando as medidas de resistividade

Para o desenvolvimento dessa etapa foi realizaram-se a aplicação dos dados de resistividade obtidos ao longo de 260 dias, com coleta em 28, 90, 154, 220 e 260 dias e, por determinação gráfica, obtiveram-se os valores do fator de idade ( $q$ ), como apresentado na Figura 9. Os resultados são exibidos na Figura 61, com as curvas exponenciais obtidas, na Tabela 30 são dispostos os valores numéricos para o fator  $q$ .



Fonte: Autora (2022).

**Tabela 30 - Valores do fator de idade ( $-q$ ) para amostras de concreto referência e com adições minerais com relação a/mc de 0,55 e 0,45 após 260 dias de medição**

Concreto	$q$
CP V ARI_A	0,145
CP V ARI_25CV_A	0,609
CP V ARI_10MK_A	0,289
CP V ARI_8SA_A	0,132
CP V ARI_B	0,212
CP V ARI_25CV_B	0,497
CP V ARI_10MK_B	0,298
CP V ARI_8SA_B	0,246

Fonte: Autora (2022).

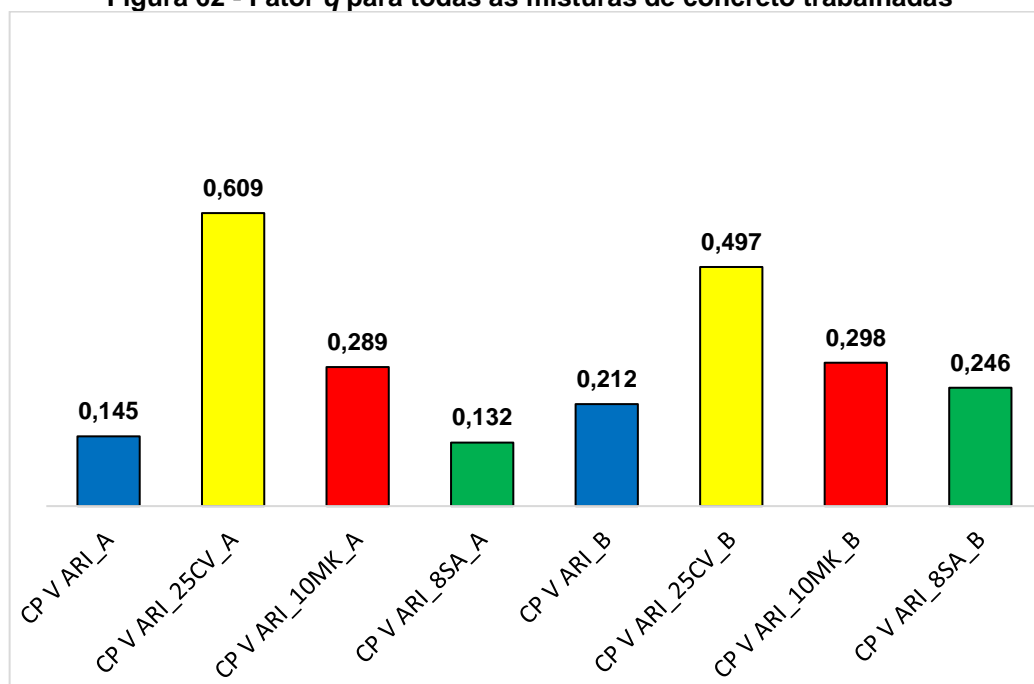
De acordo com os resultados, é perceptível que a mudança de relação a/mc de 0,55 para 0,45 e o tipo de adição influenciam no fator de idade. Enquanto o concreto sem adição mineral e o concreto contendo 8% de sílica (substituição de cimento em massa) apresentaram valores baixos para esse parâmetro, os concretos contendo metacaulim não apresentaram diferença significativa e o concreto contendo cinza volante resultou em valores altos.

Esse resultado é espelho do que foi obtido nos ensaios de caracterização dos materiais. Como o CPV ARI é um cimento com baixo teor de adição mineral e alto percentual de clínquer, tem-se como resultado concretos com alta resistência inicial, proveniente da reação de hidratação acelerada nas primeiras idades, e  $q$  menor. A sílica ativa e o metacaulim foram adições que apresentaram uma reatividade maior, resultando em fatores de idade intermediários. Como a cinza volante apresentou uma menor reatividade, o fator de idade foi maior.

A Figura 62 mostra os resultados obtidos para cada traço, mostrado na Tabela 30. Pela imagem, fica fácil visualizar que o concreto contendo metacaulim praticamente manteve o fator de idade " $q$ ". Esse concreto apresentou apenas uma diferença de 0,009 entre as misturas A e B.



**Figura 62 - Fator  $q$  para todas as misturas de concreto trabalhadas**



Fonte: Autora (2022).

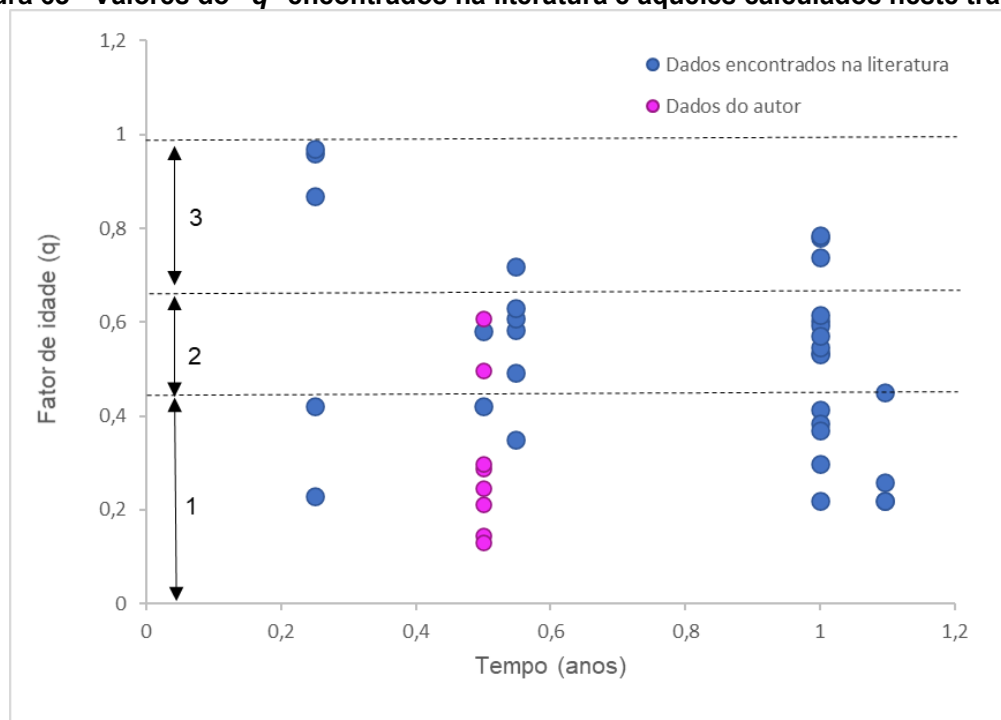
Com relação aos traços CP V ARI\_25CV tanto do grupo A, quanto do grupo B obteve-se um fator de idade superior às demais adições em ambas as relações a/mc (0,55 e 0,45). Tal fato pode ser justificado pela adição reagir de forma mais lenta, além de ter sido aplicado um teor de adição superior às demais adições, de 25% em substituição em massa do CP V ARI.

A influência das adições minerais e a relação a/mc, são variáveis que vêm sendo estudada ao longo do tempo por outros autores como: Real, Medeiros e Rivarola (2019), que trabalharam com adições de metacaulim, cinza da casca de arroz, sílica ativa para mesma relação a/mc, 0,45 obteve diferentes valores para o fator de idade; Medeiros Junior (2014), que utilizou o mesmo traço contendo CP V ARI para as relações a/mc de 0,40, 0,50 e 0,60 e obteve diferentes valores para o fator “ $q$ ” para o mesmo traço, variando apenas a relação a/mc. Outros pesquisadores também relatam essa contribuição da relação a/mc e das adições ao fator de idade (ANDRADE *et al.*, 2014; ANDRADE e D’ANDREA, 2010; GANS, MEDEIROS e LIMA, 2017; REAL, 2015; REAL, MEDEIROS e RIVAROLA, 2019).

Por fim, analisando os valores do fator de idade determinado por medidas de resistividade, verificou-se que os concretos referência, com adição de sílica ativa e metacaulim têm reações de hidratação mais rápida do que o concreto contendo cinza volante, resultando em fator de idade menores.

Considerando os dados coletados na literatura, mostrados graficamente na Figura 9, os dados calculados foram adicionados na mesma plotagem (Figura 63). Como consequência, observa-se que os concretos com cinza volante se encaixaram na faixa 2, onde estão inseridos os concretos com cimento CP II F e CP III, e os concretos com adição de cinza da casca de arroz, confirmando que a cinza volante utilizada nas misturas do programa experimental não demonstrou boa reatividade como aquelas já documentadas. Quanto às demais misturas, elas se localizam na faixa 1, onde são encontrados valores para concreto sem adição, concreto com adição de sílica ativa e concreto com adição de metacaulim, porém com valores menores do que aqueles documentados. Reforça-se que as adições pozolânicas (sílica ativa e metacaulim) empregadas nesta pesquisa apresentaram rápida reação de hidratação, resultando em um “ $q$ ” menor do que aqueles encontrados na literatura para o mesmo tipo de adição pozolânica.

**Figura 63 - Valores do “ $q$ ” encontrados na literatura e aqueles calculados neste trabalho**



- 1 – Concreto sem adição; concreto com adição de sílica ativa; concreto com adição de metacaulim  
 2 – Concreto com adição de cinza da casca de arroz, concreto com cimento CP III, concreto com CP II F  
 3 – Concreto com adição de cinza volante, concreto com cimento CP IV; concreto com cimento CP II Z

Fonte: Autora (2022).

#### 4.4.2. Fator de idade do concreto ( $n$ ) com dados de difusão natural de íons cloreto

Os resultados obtidos para o fator de envelhecimento em função do coeficiente de difusão aparente ( $D_{ns}$ ), mediante as duas abordagens citadas no referencial teórico (semi dependente e totalmente dependente do tempo), são apresentados na Tabela 31.

Para análise dos resultados,  $n$  foi calculado a partir das concentrações de cloretos livres determinadas para cada amostra. Isso porque os cloretos livres são aqueles capazes de se deslocarem no interior do concreto. Além disso, não está sendo considerada neste estudo a capacidade dos íons cloreto se desligarem da matriz cimentícia, e sim o efeito do tempo sobre o concreto, representado por um parâmetro matemático, o fator de idade.

**Tabela 31 - Valores obtidos do fator de idade  $n$  para todas as misturas de concreto ao longo do período de 180 dias**

Concreto	Totalmente dependente do tempo	Semi-dependente do tempo
	$n$	$n$
CP V ARI_A	0,410	0,167
CP V ARI_25CV_A	0,570	0,186
CP V ARI_10MK_A	0,720	0,540
CP V ARI_8SA_A	0,270	0,378
CP V ARI_B	0,169	0,257
CP V ARI_25CV_B	0,991	0,677
CP V ARI_10MK_B	0,412	0,321
CP V ARI_8SA_B	0,451	0,151

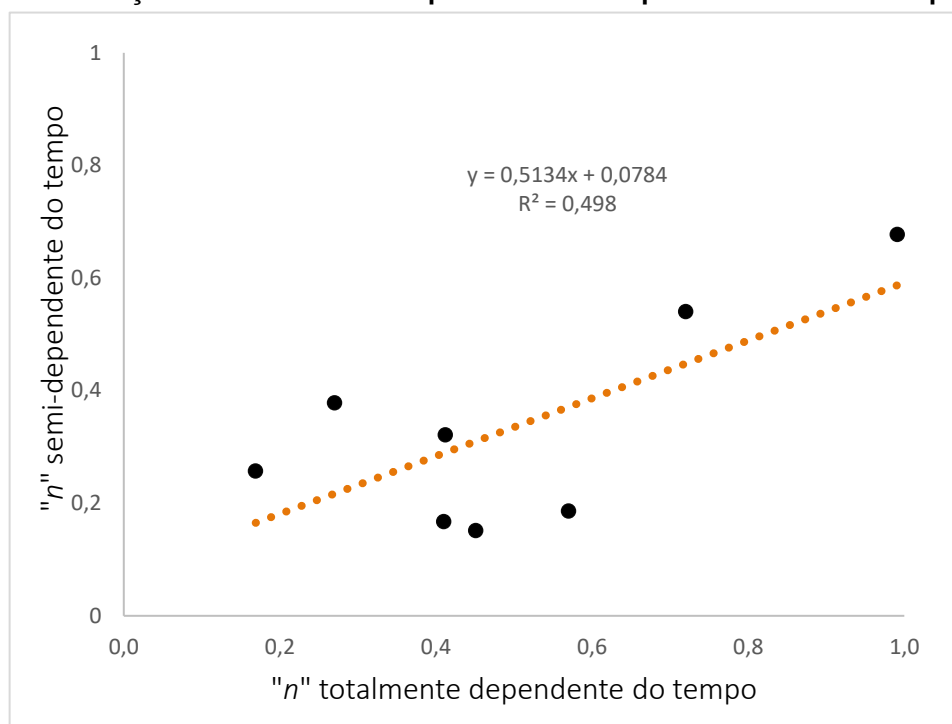
Fonte: Autora (2022).

Em função das equações matemáticas empregadas para calcular do fator de idade ( $n$ ), semi dependente ou totalmente dependente do tempo, obtiveram-se resultados de  $n$  completamente diferentes.

Deve-se observar que, quando utilizada a Equação 16 (" $n$ " totalmente dependente do tempo) os valores são superiores aos obtidos pela Equação 11 (" $n$ " semi dependente do tempo). Nem todas as misturas seguiram os achados de Gaal, Koenders e Polder (2006), apenas a misturas CP V ARI\_10MK\_A e CP V ARI\_B resultaram em um fator  $n$  semi dependente do tempo menor do que o valor obtido para totalmente dependente do tempo.

A Figura 64 traz essa representação gráfica entre os valores obtidos pelas Equação 11 e 16. O resultado do coeficiente de determinação foi baixo ( $\approx 0,50$ ), no entanto, considerando a heterogeneidade das misturas, pode ser considerado representativo.

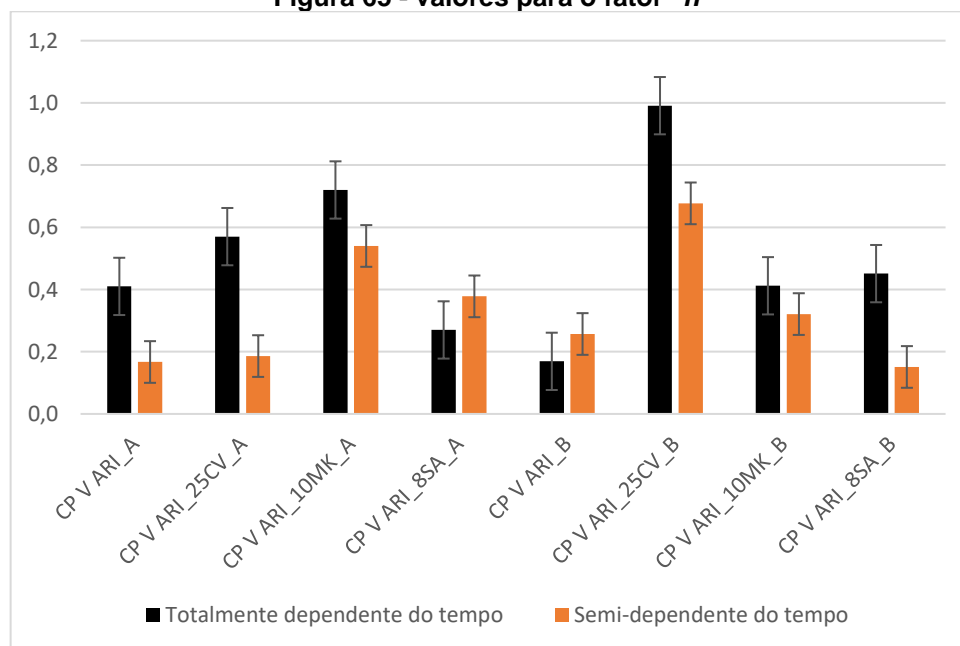
**Figura 64 - Relação entre o "n" semi dependente do tempo X "n" totalmente dependente**



Fonte: Autora (2022)

Essa diferença obtida nos resultados de  $n$ , está exibida na Figura 65. Esses resultados serão apresentados e avaliados em momentos diferentes. Primeiramente será discutido sobre a abordagem semi dependente do tempo e, depois, considerando uma abordagem totalmente dependente do tempo.

**Figura 65 - valores para o fator "n"**



Fonte: Autora (2022).

Os resultados permitem observar que o tipo de adição tem influência nos valores de  $n$ . Amostras com cimento Portland e concreto com substituição do cimento por 8% de sílica ativa foram as que apresentaram menor valor para  $n$  variando de 0,167 a 0,257, para CPV ARI, e de 0,151 e 0,378, para CPV ARI\_8SA, dependendo da relação água cimento empregada.

Isso acontece porque as reações de hidratação do cimento puro e com adição de sílica ativa reagem mais rápido do que nas misturas com adições minerais menos reativos.

O metacaulim, apresenta-se como uma mistura pozzolânica de boa reatividade, tendo como decorrência disso foram fatores de idade médios de 0,540 e 0,321, para relação a/mc de 0,55 e 0,45, respectivamente. Já a cinza volante, resultou em concretos com fator de idade elevado, se comparado entre as misturas trabalhadas, 0,187<sup>2</sup> a 0,667.

Quanto maior o valor do fator de idade  $n$ , mais rápida é a diminuição do coeficiente de difusão no tempo, ou seja, mais resistente é o concreto frente ao transporte de íons cloreto.

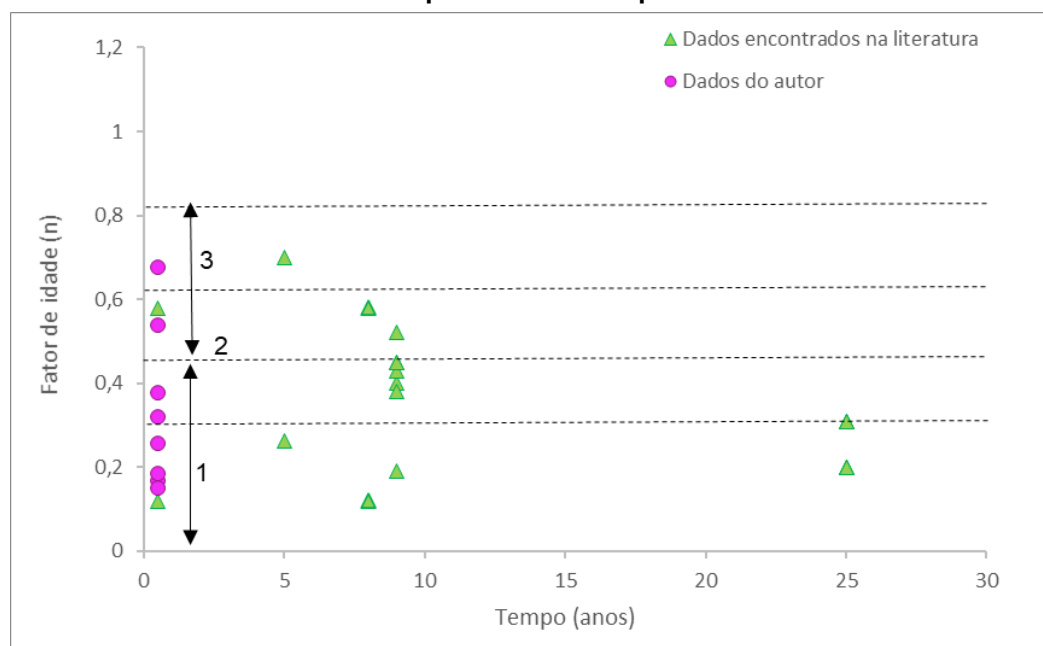
Na Figura 66 foram plotados os dados calculados em conjunto com aqueles encontrados na literatura. Houve uma boa distribuição entre aqueles dados já publicados e os dados calculados. Em relação ao fator de idade de concretos contendo metacaulim, esses se encaixaram na faixa 2, onde são inseridos os concretos com mistura de duas pozzolanas (cinza volante + sílica ativa).

Quanto aos valores determinados de  $n$  aplicando uma solução totalmente dependente do tempo, entende que os resultados representem maior fidelidade a matriz estudada por ter associado de forma instantânea todas as variáveis em um único ajuste.

---

<sup>2</sup> Valor muito inferior a todos os referenciais encontrados. Cabe aqui uma nova titulação para esta mistura.

**Figura 66 - Fatores de idade  $n$  calculados e encontrados da literatura para abordagem semi dependente do tempo**

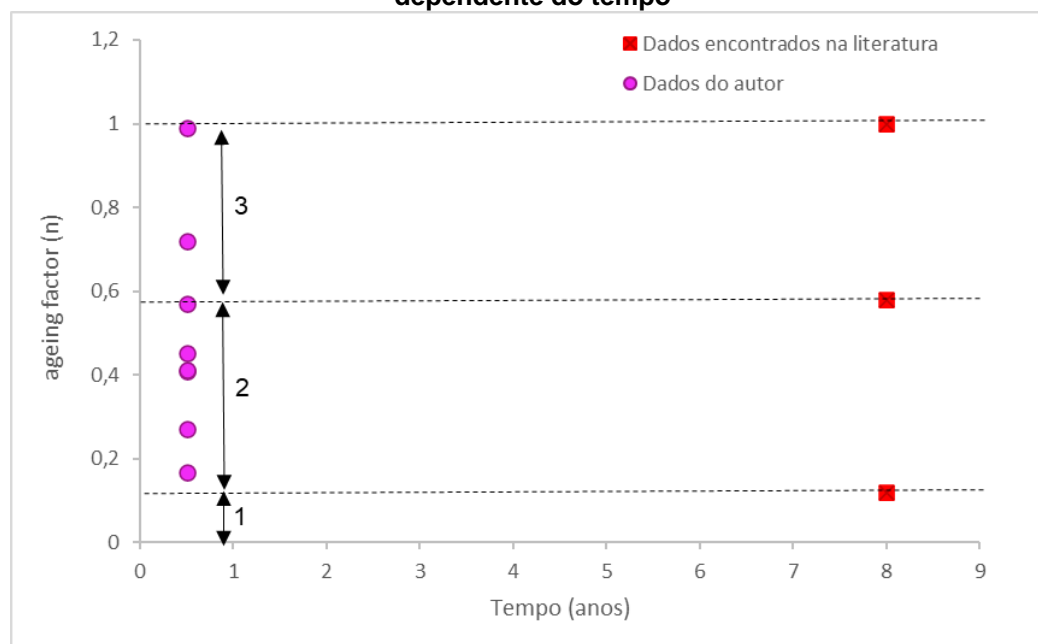


- 1 – Concreto sem adição; concreto com adição de sílica ativa  
 2 – Concreto com adição de sílica ativa + cinza volante  
 3 – Concreto com adição de escória granulada de auto forno; concreto com adição de cinza volante

Fonte: Autora (2022).

Quanto aos valores determinados de “ $n$ ”, aplicando uma solução totalmente dependente do tempo, entende-se que os resultados representam maior fidelidade à matriz estudada por ter associado, de forma instantânea, todas as variáveis em um único ajuste. Nesse sentido, o trabalho de Gaal, Koenders e Polde (2006) é a única referência identificada que realizou o cálculo de “ $n$ ” para os dois métodos de cálculo. O trabalho do Visser, Gaal e Rooij (2002), determinou o fator  $n$  apenas para a abordagem totalmente dependente do tempo. Na Figura 67 foram inseridos os resultados de Visser, Gaal e Rooij (2002) juntamente com os resultados do programa experimental.

**Figura 67 - Fator de idade  $n$ , calculados e os já publicados para abordagem totalmente dependente do tempo**



- 1 – Concreto sem adição;  
 2 – Concreto com adição de cinza volante  
 3 – Concreto com adição de escória granulada de auto forno;

Fonte: Autora (2022).

Os dados disponíveis na literatura são mínimos para que possa se fazer uma boa relação entre os intervalos já publicados e os aqui calculados. Apesar disso, pode-se dizer que os valores apresentados estão entre os intervalos publicados na literatura, tanto para métodos semi dependente do tempo, quanto para abordagens totalmente dependentes do tempo.

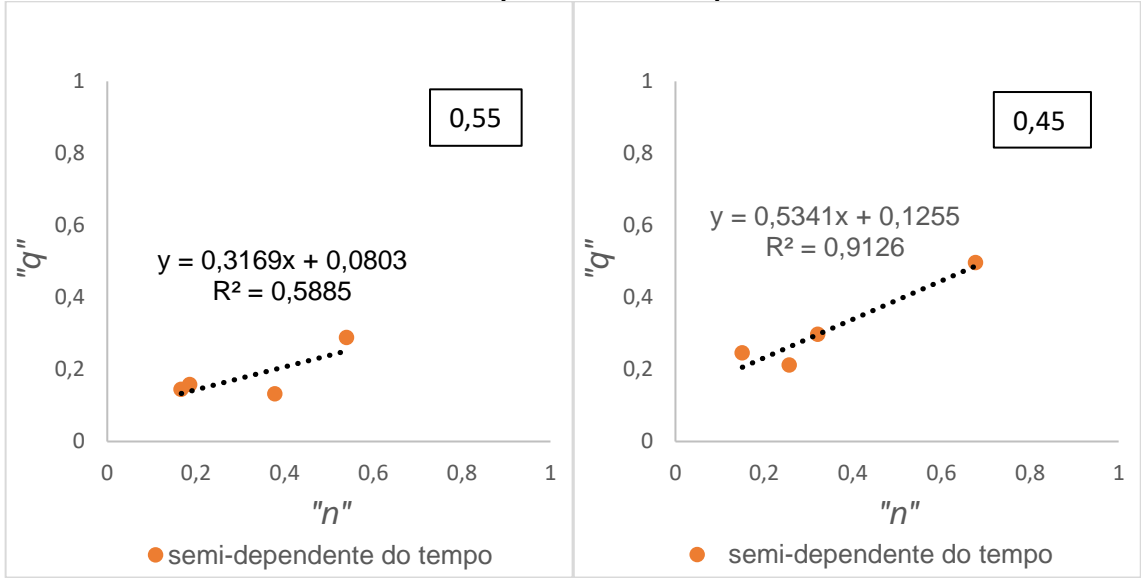
#### 4.4.3. Relação entre “ $n$ ” e “ $q$ ”

Tanto “ $n$ ” quanto “ $q$ ” representam o fator de envelhecimento do concreto. Para este trabalho, foram avaliados, para o mesmo tipo de mistura de concreto, a diferença e a forma de obter esse resultado. “ $n$ ” obtido com dados de coeficiente de difusão aparente, por ensaio destrutivo, e “ $q$ ” obtido por ensaio não destrutivo de resistividade elétrica superficial.

Considerando que a finalidade é a mesma para ambos, correlações entre  $n$  e  $q$  foram obtidas (Figura 68 e 69). Andrade, Castellote e D’Andrea (2011) também obtiveram correlação entre o fator “ $n$ ” e o fator “ $q$ ”, obtiveram que:  $q = 0,798 n - 0,0072 \approx 0,8n$ , deduzindo que o “ $q$ ” é um pouco menor do que o “ $n$ ” ( $n = q/0,8$ ) para misturas com relação a/mc variando de 0,45 a 0,28 para as misturas investigadas. A mesma

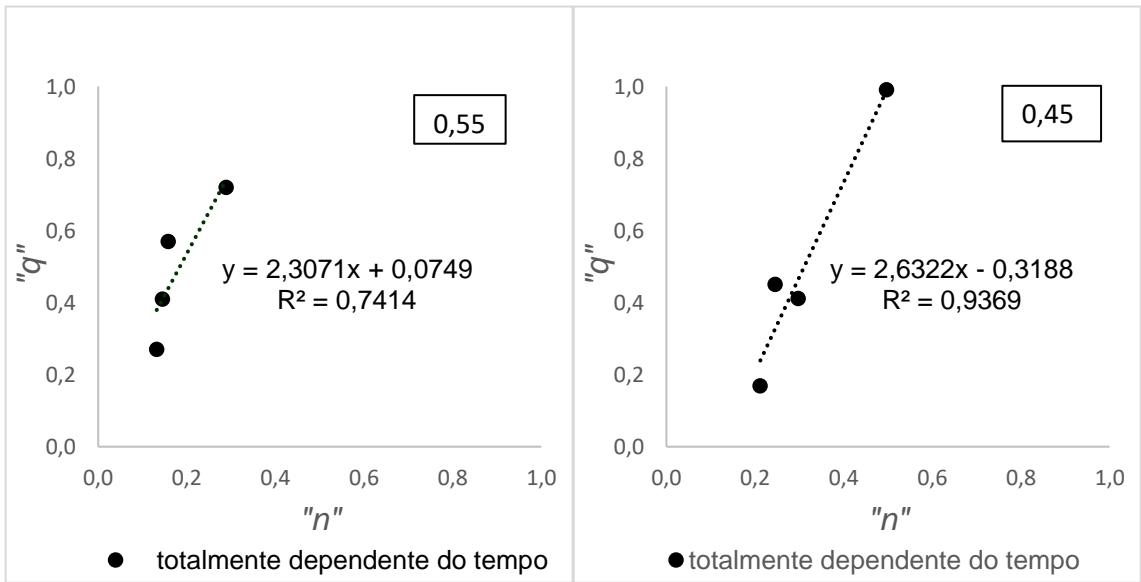
dedução foi obtida para este trabalho. Para as correlações dos dados semi dependente do tempo o resultado foi de  $q = 0,5n$  para relação a/mc de 0,45 e  $q = 0,3n$  para relação a/mc de 0,55, já para as correlações totalmente dependente do tempo, o resultado foi de  $q = 2,5n$  para relação a/mc de 0,45 e  $q = 2,3n$  para relação a/mc de 0,55.

**Figura 68 - Relação entre o fator de idade "n" e o fator de idade "q" para misturas com "n" semi dependente do tempo**



Fonte: Autora (2022).

**Figura 69 - Relação entre o fator de idade "n" e o fator de idade "q" para misturas com "n" totalmente dependente do tempo**



Fonte: Autora (2022).



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como resultado das investigações realizadas neste trabalho, podem ser apresentadas as seguintes considerações:

- I. Para o fator  $n$ , foram obtidos os valores de 0,167, 0,186, 0,540, 0,378 por abordagem semi-dependente do tempo para a misturas A (0,55) e para a mistura B (0,45), na mesma sequência, o resultado foi de 0,257, 0,677, 0,321 e 0,151. Em ambos os casos, seguindo a ordem das misturas: concreto referência, com 25% de cinza volante, 10% de metacaulim e 8% de sílica ativa, respectivamente. Para abordagem totalmente dependente do tempo, os valores de “ $n$ ” para a mistura A foram de 0,410, 0,570, 0,720 e 0,270, e na mistura B foi de 0,169, 0,991, 0,412 e 0,451, seguindo a mesma ordem das misturas.
- II. A reatividade da adição mineral tem influência direta para determinação do fator de idade, assim como a mudança de relação água cimento. Concretos com adições menos reativas, neste trabalho a CV e o MK, resultam em fatores de idade “ $n$ ” e “ $q$ ” maiores do que os que são obtidos para o concreto sem adição mineral ou com SA. Isso conduz a menores coeficientes de difusão e por conseguinte, a maior capacidade de resistir ao ingresso de cloretos ao longo do tempo, devido ao efeito de refinamento dos poros proporcionado pelas adições.
- III. Considerando a correlação entre os valores de “ $n$ ” obtido a partir do método semi-dependente e totalmente dependente do tempo, pode-se afirmar que o valor de “ $n$ ” obtido a partir do método semi dependente é metade do valor de “ $n$ ” obtido a partir do método totalmente dependente do tempo.
- IV. Considerando a relação entre os fatores de idade “ $n$ ” e “ $q$ ”, observa-se que os valores de “ $n$ ” são superiores aos valores de “ $q$ ”. Nesse sentido, “ $q$ ” assume valores de aproximadamente 2,5 vezes menores que “ $n$ ” para mistura obtidas valor de “ $n$ ” pelo método totalmente dependente do tempo e, aproximadamente 0,5 para “ $n$ ” obtido pele método semi dependente do tempo.

### **5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Obter valores do fator de idade para concretos exposto à ambiente agressivo com ação combinada da carbonatação e íons cloreto.
- Obter correlações entre a resistividade elétrica superficial e volumétrica do concreto e os valores do fator de idade.
- Aplicar a mesma metodologia adotada neste trabalho aumentando o tempo de exposição das amostras ao agente agressivo, a fim de aumentar a confiabilidade dos dados.
- Aprofundar a relação entre “ $n$ ” e “ $q$ ”, considerando outros arranjos como: maior tempo de cura, variação na concentração de cloretos na solução externa, variação de teores de adição e maior tempo de exposição das amostras ao agente agressivo.
- Parametrizar o fator de idade para cimentos trabalhados no Brasil.

## REFERÊNCIAS

AL-SODANI, K. A. A. *et al.* Chloride diffusion models for Type I and fly ash cement concrete exposed to field and laboratory conditions. **Marine Structures**, v. 76, n. September 2019, p. 102900, 2021.

ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 23, p. 724–742, 1993.

ANDRADE, C. *et al.* Evaluación de mezclas de hormigón para el nuevo canal de Panamá mediante la medida de la resistividad y de la resistencia a la difusión de cloruros. **Revista ALCONPAT**, v. 4, n. Maio-Agosto, p. 100–115, 2014a.

ANDRADE, C. *et al.* Evaluación de mezclas de hormigón para el nuevo canal de Panamá mediante la medida de la resistividad y de la resistencia a la difusión de cloruros. **Revista ALCONPAT**, v. 4, n. 2, p. 96–112, 30 maio 2014b.

ANDRADE, C. Design and evaluation of service life through concrete electrical resistivity. **Revista ALCONPAT**, v. 3, n. 3, p. 264–279, 2018.

ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; D'ANDREA, R. Measurement of ageing effect on chloride diffusion coefficients in cementitious matrices. **Journal of Nuclear Materials**, v. 412, n. 1, p. 209–216, 2011.

ANDRADE, C.; D'ANDREA, R. Electrical resistivity as microstructural parameter for the modelling of service life of reinforced concrete structures. **2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure**, October, p. 379–388, 2010.

ANDRADE, J. J. de O. Contribuição à previsão de vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos. **Tese de doutorado (Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS)**, 2001.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN (2014). UNE 83988-2: Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner. 2014. *apud* ARAÚJO, C. C. Estudo de correlações entre propriedades do concreto. **Dissertação (Mestrado) Universidade Federal da Paraíba**, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação. **Rio de janeiro**, p. 9, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. **Rio de janeiro**, p. 5–7, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. **Rio de janeiro**, p. 8, 2015a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: Materiais Pozolânicos - Requisitos. **Rio de Janeiro**, 2015b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da massa específica. **Rio de Janeiro**, p. 7, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaio de Compressão de Corpo de Prova Cilíndricos. **Rio de Janeiro**, p. 13, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16889: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. **Rio de Janeiro**, p. 1–9, 2020.

AUDENAERT, K.; YUAN, Q.; DE SCHUTTER, G. On the time dependency of the chloride migration coefficient in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 3, p. 396–402, 2010.

BAMFORTH, P. Spreadsheet model for reinforcement corrosion in structures exposed to chlorides. **Concrete Under Severe Conditions 2: Environment and Loading**, v. 1, n. 9, p. 64–75, 1998.

CASTRO, A. *et al.* Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação. **Escola de Engenharia Civil**, v. Mestrado e, p. 215 p., 2003.

CASTRO, A. L. DE; PANDOLFELLI, V. C.; CARLOS, S. Revisão : Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. v. 55, p. 18–32, 2009.

CHEN, C.; CHANG, J.; YEIH, W. The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 35–43, 2014.

CHENG, S. *et al.* Effects of fly ash, blast furnace slag and metakaolin on mechanical properties and durability of coral sand concrete. **Applied Clay Science**, v. 141, p. 111–117, 2017.

COSTA, A.; APPLETON, J. Análise da Penetração de Cloretos em Estruturas de Betão Armado Exposta em Ambiente Marítimo. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**, v. 46, p. 3–13, 2007a.

CRANK, J. The mathematics of diffusion. **Journal of the American Chemical Society**, p. 421, 1 mar. 1975.

CYR, M.; LAWRENCE, P.; RINGOT, E. Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 2, p. 264–277, 2006.

DOMINICINI, W. K.; CALMON, J. L. Computational modeling for predicting corrosion

initiation in reinforced concrete structures. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 6, p. 1205–1244, nov. 2017.

FERREIRA, P. R. R. Análise da indução da corrosão por cloretos em concretos armados com adição de resíduo de tijolo moído a partir de ensaios acelerados. **Universidade Federal do Pernambuco**, p. 229, 2015.

FIGUEIREDO, C. P. et al. O papel do metacaulim na proteção dos concretos contra a ação deletéria de cloretos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 7, n. 4, p. 685–708, 2014.

FRAGA, Y. S. B.; SOARES, L. M. G.; CAPUZZO, V. M. S. Influência da densificação da sílica ativa nas propriedades de materiais cimentícios. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 3, p. 229–242, 2021.

GAAL, G. C. M. **Prediction of Deterioration of Concrete Bridges**. 2004.

GAAL, G. C. M.; KOENDERS, E. A. B.; POLDER, R. B. Ageing effect of chloride diffusion coefficient. **International RILEM-JCI seminar on concrete durability and service life planning concretelife-06**, n. 1, p. 41–50, 2006.

GAAL, G. C. M.; VAN DER VEEN, C.; WALRAVEN, J. C. Prediction of deterioration: start application of deicing agent taken into account. In: **9th International Bridge Management Conference**. 2002. p. 407–417.

GANS, P. S.; MEDEIROS, R. A.; LIMA, M. G. **Efeito da escória de alto forno na resistividade elétrica superficial do concreto**. 2017. Disponível em: <<http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/2SPPC.2017.002>>

HALL, C. Water sorptivity of mortars and concretes : a review. **Magazine of concrete research**, v. 41, n. 147, p. 51-61, 1989.

HELENE, P. R. L. Contribuição ao estudo da corrosão em armadura de concreto armado. **Tese de doutorado, Universidade de São Paulo**, 1993a.

HELENE, P. R. L. Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado. **Tese (doutorado), Universidade de São paulo**, p. 248, 1993b.

HOFFMANN, A. T. Influência da Adição de Sílica Ativa, Relação água/Aglomerante, temperatura e tempo de cura no Coeficiente de Difusão de de Cloretos em Concretos. **Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, p. 145, 2001.

HOPPE FILHO, J. et al. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte II): Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP), difração de raios-X (DRX) e termogravimetria (TG/DtG). **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, n. 3, 10 ago. 2017.

IRASSAR, E. F. et al. Hydration and properties of ternary cement with calcareous filler and slag. **Alconpat Journal**, v. 5, n. April, p. 1–16, 2015.

JUNIOR, F. K. S. et al. Estudo de Caso: Previsão da vida útil de uma estrutura de concreto armado em ambiente marinho por meio da análise de Monte Carlo. **RETEC - Revista de tecnologias**, v. 12, n. 1, p. 95–106, 2019.

JUSTNES, H. *et al.* Methodology of calculating required chloride diffusion coefficient for intended service life as function of concrete cover in reinforced marine structures. **Cement and Concrete Composites**, v. 73, p. 316–323, 2016.

LANGAN, B. W.; WENG, K.; WARD, M. A. Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1045–1051, 2002.

LIU, J. et al. Experimental investigation on pore structure characterization of concrete exposed to water and chlorides. **Materials**, v. 6, n. 9, p. 6646–6659, 2014.

MAAGE, B. M. et al. Service Life Prediction of Existing Concrete Structures Exposed to Marine Environment. **Materials journal**, v. 93, n. 6, p. 602–608, 1996.

MALHEIRO, R. et al. Durabilidade do betão tendo em conta a ação combinada da carbonatação e dos iões cloreto. **I encontro Luso-Brasileiro de Degradação em Estruturas de Concreto Armado, Salvador, Bahia**. December 2015, p. 213–224, 2014.

MANGAT, P. S.; KHATIB, J. M.; MOLLOY, B. T. Microstructure, chloride diffusion and reinforcement corrosion in blended cement paste and concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 16, n. 2, p. 73–81, jan. 1994.

MANGAT, P. S.; MOLLOY, B. T. Prediction of long term chloride concentration in concrete. **Materials and Structures**, v. 27, n. 6, p. 338–346, jul. 1994.

MARKESSET, G.; SKJØLSVOLD, O. Time Dependent Chloride Diffusion Coefficient – Field Studies of Concrete Exposed To Marine Environment in Norway. **Proceedings of the 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructures**, v. 0, n. 1, p. 83–90, 2010.

MARTÍN-PÉREZ, B. Service Life Modelling of Reinforced Concrete Highway Structures Exposed to Chlorides. 1999.

MATERIALS., A. S. F. T. A. ASTM C 114: Standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement. **Annual Book of ASTM Standards**, 2007.

MEDEIROS JUNIOR, R. A.; GANS, P. S. Efeito da adição de pozolana na resistividade elétrica superficial do concreto. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 2, n. 3, p. 14–23, 2017.

MEDEIROS JUNIOR, R. A. DE. Estudo da resistividade do concreto para proposta de modelagem de vida útil - corrosão das armaduras. **Tese de Doutorado (Instituto Tecnológico de Aeronáutica)**, 2014.

MEDEIROS, M. H. F. D. *et al.* High reactivity pozzolan: a critical evaluation of Pozzolanic Activity Index (PAI) with lime using X-Ray Diffraction. **Ambiente Construído**, v. 15, n. 3, p. 19–29, 2015.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstruture, Properties, and Materials**. 2008.

MEIRA, G. R. Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado. **Universidade Federal De Santa Catarina - Ufsc Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Civil - Ppgec**, p. 368, 2004.

MEIRA, G. R. Corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado: fundamentos, diagnóstico e prevenção. **IFPB**, v. 1, p. 103, 2017.

MOFFATT, E. G.; THOMAS, M. D. A. Performance of 25-year-old silica fume and fly ash lightweight concrete blocks in a harsh marine environment. **Cement and Concrete Research**, v. 113, n. March, p. 65–73, 2018.

NILSSON, L. O.; TANG, L. Transport Mechanisms in Poruos Materials - An Introduction to Their Basis Lawas and Correlation. **Springer Science Business Media**, v. 304, p. 289–311, 1996.

PEREIRA, C. J.; RICE, R. W.; SKALNY, J. P. Pore structure and its relationship to properties of materials. **MRS Online Proceedings Library (OPL)**, v. 137, p. 3–21, 1988.

PILAR, R. *et al.* Avaliação de pastas de cimento Portland contendo cinza pesada moída. **Revista Materia**, v. 21, n. 1, p. 92–104, 2016.

PRESUEL-MORENO, F.; WU, Y. Y.; LIU, Y. Effect of curing regime on concrete resistivity and aging factor over time. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 874–882, 2013.

REAL, L. V. Efeito de adições pozolânicas na estimativa de vida útil do concreto através da resistividade elétrica superficial. **Dissertação (mestrado) Universidade Federal do Paraná**, 2015.

REAL, L. V.; MEDEIROS, M. H. F.; RIVAROLA, G. R. The influence of pozzolans of high reactivity on the age factor of the service-life estimation model proposed by Andrade ( 2004 ). **Revista Técnico-Científica**, p. 1–12, 2019.

RILEM RECOMMENDATION. TC 154-EMC: Electrochemical Techniques For Measuring Metalic Corrosion. **Materials and Structures**, v. 33, p. 603–311, 2000.

RILEM RECOMMENDATION. TC 178-TMC : Analysis of water soluble chloride content in concrete. **Materials and Structures**, v. 35, n. November 2002, p. 586–588, 2002a.

RILEM RECOMMENDATION. TC 178-TMC: Analysis of total chloride content in

concrete. **Materials and Structures**, v. 35, n. November, p. 583–585, dez. 2002b.

ROMANO, R. C. O. et al. Influência da condição de mistura na dispersão de sílica ativa. **17° CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, n. March 2014, p. 16, 2006.

SADATI, S.; KHANZADEH MORADLLO, M.; SHEKARCHI, M. Long-Term Performance of Silica Fume Concrete in Soil Exposure of Marine Environments. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 9, p. 04017126, 2017.

STANISH, K. D.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. Testing the Chloride penetration resistance of concrete: a literature review. **HWA Contract DTFH61-97-R-00022**, p. 1–34, 1997.

STANISH, K.; THOMAS, M. The use of bulk diffusion tests to establish time-dependent concrete chloride diffusion coefficients. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 1, p. 55–62, 2003.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 1997.

TUUTTI, K. Corrosion of Steel in Concrete. **Cement-och betonginst**, p. 773, 1982.

VALDÉS, A. C. et al. Effect of the degree of hydration , type of mineral addition and degree of saturation of the concrete in the electrical resistivity readings. **Revista Técnico-Científica do Crea-PR**, v. 1, p. 1–18, 2017.

VISSER, J. H. M.; GAAL, G. C. M.; DE ROOIJ, M. R. **TIME DEPENDENCY OF CHLORIDE DIFFUSION COEFFICIENTS IN CONCRETE**, 2002.