

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL**

**ESTUDO DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS PRODUZIDOS COM ADITIVOS REDUTORES DE
PERMEABILIDADE POR CRISTALIZAÇÃO CAPILAR**

Carla Dabian de Oliveira

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
Janeiro/2018

CARLA DABIAN DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS PRODUZIDOS COM ADITIVOS REDUTORES DE
PERMEABILIDADE POR CRISTALIZAÇÃO CAPILAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais cimentícios.

Orientador: Professor Dr. Aldo Giuntini de Magalhães

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2018

O48e	<p>Oliveira, Carla Dabian de. Estudo da penetração de cloretos em compósitos cimentícios produzidos com aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar [recurso eletrônico] / Carla Dabian de Oliveira. – 2018. 1 recurso eletrônico (xxi, 88 f. : enc.: il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Aldo Giuntini de Magalhães.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f. 85-88. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>Bibliografia: f. 78-84.</p> <p>1. Construção civil - Teses. 2. Materiais de construção - Teses. 3. Cimento - Aditivos - Teses. 4. Permeabilidade - Teses. 5. Concreto - Teses. 6. Durabilidade (Engenharia) - Teses. I. Magalhães, Aldo Giuntini de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p>
------	---

CDU: 691(043)

CARLA DABIAN DE OLIVEIRA

"ESTUDO DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS PRODUZIDOS COM ADITIVOS REDUTORES DE PERMEABILIDADE POR CRISTALIZAÇÃO CAPILAR"

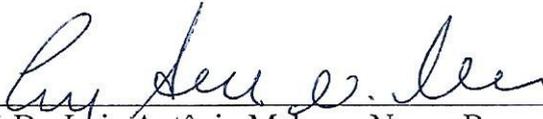
Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 23 de fevereiro de 2018

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Aldo Giuntini de Magalhães
Orientador – UFMG



Prof. Dr. Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco
UFMG



Prof. Dr. PETER LUDVIG
CEFET/MG

Dedico esse trabalho ao meu amado pai Jamil Dabian (*in memoriam*),
à minha mãe, meu esposo, aos meus filhos e a todos que
de alguma forma estiveram presentes em minha vida!

AGRADECIMENTOS

Acredito ser a gratidão um dos sentimentos mais nobres e importantes das nossas vidas, tornando assim um desafio conseguir agradecer, em tão poucas palavras, todos que me incentivaram, contribuíram e torceram por mim durante esses longos anos.

A Deus por toda força e fé sempre me guiando, acalmando e fortalecendo!

Aos meus pais, “mamy” Neusa, sempre incentivadora e amiga incondicional e meu “papy” Jamil que apesar de não está mais entre nós tornou-se a maior das minhas forças para concluir o meu trabalho. Obrigada por terem me dado a possibilidade dos estudos. Amarei vocês eternamente!

Ao meu querido esposo Leci, melhor amigo e maior incentivador! Obrigada pelo amor e companheirismo sempre! Aos meus filhos Artur e Laura que de tanto participarem, tenho certeza terem adquirido “conhecimentos” sobre o nobre concreto! Obrigada pela paciência, colaboração e carinho nos momentos em que mais precisei! Amo vocês!

Ao meu maninho Jamil, às minhas queridas tia Jamile e Nicinha e à minha amiga-irmã-filha Danete por todo apoio e amor!

Ao meu orientador professor Aldo Giuntini, pela orientação, dedicação, incentivo e compreensão durante todo o tempo do meu trabalho! Obrigada pelos ensinamentos e conhecimentos compartilhados!

Às professoras Adriana e Maria Teresa pelas palavras de força no momento mais difícil e que não me deixaram desistir do mestrado. E ao professor Paulo Andery pela atenção na ocasião da minha transferência!

Ao amigo Evando, pela ajuda e companheirismo desde que entrei na UFMG! Aos futuros mestres Thiago, Priscilla e Ruan por terem sido sempre tão amigos e prestativos!

Às queridas Alice, Suélen e Laísa pelo incentivo e apoio sempre!

À Elen por toda a ajuda e experiência que contribuíram muito para o meu trabalho! Obrigada pela disponibilidade!

À FAPEMIG e CAPES pelo apoio financeiro.

Ao Centro de Microscopia UFMG pelo apoio na realização das análises microestruturais, equipamentos e suporte técnico.

Ao Laboratório de Materiais Cimentícios da Escola de Engenharia da UFMG (LabMac) pelo fornecimento da infraestrutura necessária para realização dos ensaios.

Ao Centro de Microscopia da UFMG pelo apoio na realização das análises microestruturais;

À Empresa Viatest, por permitir que eu realizasse parte dos meus ensaios utilizando toda a estrutura e, de forma especial, ao Engenheiro Raul Ramires que colocou à disposição da pesquisa toda sua experiência e conhecimento técnico com tamanha disponibilidade e boa vontade!

À Empresa Holanda Engenharia por ter aberto suas portas em apoio à pesquisa, fornecendo-nos seus conhecimentos sobre o tema principal do meu trabalho e ao Engenheiro Rodolfo Leal por compartilhar seus conhecimentos comigo!

Aos amigos Daniela (amiguinha), sempre me incentivando a concluir, Renato, Andréia, Mirian, Adriane e Grazi presentes em momentos importantes dessa caminhada. E a algumas pessoas que talvez nunca leiam essa dissertação mas merecem toda a minha gratidão por terem me ajudado sempre que precisei: meus sogros Elisa e Joel, minha irmã de coração Silene e à minha companheira de sempre, Rosângela!

Aos colegas do Departamento/Secretaria pelo apoio, atenção e tão boa convivência durante todo esse tempo.

Para finalizar, mais uma vez agradeço a Deus por colocar tão carinhosamente e perfeitamente todas essas pessoas em minha vida!

“Talvez não tenha conseguido fazer o meu melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou quem era antes”.

Marthin Luther King

RESUMO

A penetração de íons cloreto através do concreto é um dos mecanismos capazes de desestabilizar a camada passivadora do aço desencadeando a corrosão da armadura, considerada uma das mais severas manifestações patológicas em estruturas de concreto armado e relacionada diretamente com a durabilidade e vida útil dessas estruturas. Sendo o concreto a barreira física e química protetora das armaduras, torna-se imprescindível estudos relacionados à redução da penetração de agentes agressivos pelo concreto. A introdução de aditivos redutores de permeabilidade à mistura tem sido uma das opções em reduzir a penetração de agentes pela matriz cimentícia, modificando a estrutura interna por meio de cristais ativados pela umidade e oxigênio. O presente estudo buscou avaliar o desempenho dos sistemas de impermeabilização por cristalização capilar do concreto frente a penetração de cloretos. Para tanto, foram preparados seis traços, sendo três para cada uma das classes de agressividade ambiental II e III da NBR 6118 (ABNT, 2014), com relação a/c de 0,60 e 0,55, respectivamente, e utilizando-se em ambos o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V). Os corpos de prova (CPs) cilíndricos com dimensões (100 x 200) mm após cura submersa foram reduzidos em fatias também cilíndricas de (100 x 50) mm e levados ao ensaio de migração prescrito pela norma NT Build 492. Ensaio de absorção de água por capilaridade, absorção de água, índice de vazios e alguns ensaios mecânicos também foram utilizados para melhor caracterização dos concretos. Os resultados obtidos demonstraram que os aditivos produziram melhorias em algumas das propriedades analisadas. Em particular, observou-se o aumento da resistência à penetração de íons cloreto e a redução da absorção de água por capilaridade. Notou-se, entretanto, as melhorias mais significativas se deram pela redução da relação a/c, estabelecidas de acordo com as classes de agressividade ambiental adotadas.

Palavras-chave: *aditivos redutores de permeabilidade, concreto, migração de íons cloreto, durabilidade.*

ABSTRACT

The penetration of chloride ions through concrete is one of the mechanisms capable of destabilizing the passive layer of the steel triggering the corrosion of the reinforcement, considered one of the most severe pathological manifestations in reinforced concrete structures and directly related to durability and service life of these structures. The concrete is the physical and chemical protective barrier of the reinforcement, so, it is important to improve studies related to the reduction of penetration of aggressive agents through concrete. The introduction of additives that reduce the permeability to the mixture has been one of the options in reducing the penetration of agents through cementitious matrix, modifying the internal structure due to crystals activated by moisture and oxygen. The present study sought to evaluate the performance of waterproofing systems by capillary crystallization of concrete against the penetration of chlorides. For this reason, six mixtures were prepared, with three types for each one of the class of environmental aggressiveness II and III of NBR 6118 (ABNT, 2014) with ratio b/w of 0.60 and 0.55, respectively, and using in both classes the initial high resistance Portland cement (CP V). Cylindrical test specimens with dimensions (100 x 200) mm after submerged curing were reduced in cylindrical slices of (100 x 50) mm and taken to the migration test prescribed by the NT Build 492 standard. Water absorption tests by capillarity, water absorption, voids and some mechanical tests were also used for better characterization of concretes. The results showed that the additives used produced improvements in some of the properties analyzed. In particular, it was observed the increasing resistance to chloride ion penetration and the reduction of the water absorption by capillarity. It was noted, however, that the most significant improvements were due to the reduction of the b/w ratio, established according to the classes of environmental aggression adopted.

Keywords: reducers permeability additives, concrete, chloride ions migration, durability

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Parâmetros de avaliação de durabilidade e desempenho de uma estrutura	08
Figura 2.2 - Influência do tipo de cimento na difusidade dos íons de Cl^-	11
Figura 2.3 - (A) Representação de pilha de corrosão em um mesmo metal	13
(B) Ilustração de uma corrosão	13
Figura 2.4 - Principais tipos de corrosão	14
Figura 2.5 - Esquema de poros de um material	15
Figura 2.6 - Distribuição de poros	15
Figura 2.7 - Porosidades semelhantes, permeabilidades diferentes:	16
I - Alta permeabilidade	
II - Baixa permeabilidade	
Figura 2.8 - Mecanismos de transporte de íons de cloretos pelo concreto	17
Figura 2.9 - Preparação para ensaio conforme AASTHO T 259	25
Figura 2.10 - Amostras nas meias células	27
Figura 2.11 - (A) e (B) Arranjo experimental da célula do ensaio de migração de íons cloreto	27
Figura 2.12 - Arranjo do ensaio	29
Figura 2.13 - Média das profundidades de penetração	31
Figura 2.14 - (A) e (B) Formação de cristais com a utilização de aditivos redutores de permeabilidade	34
Figura 3.1 - Curva granulométrica agregado miúdo	37
Figura 3.2 - Curva granulométrica agregado graúdo	38
Figura 3.3 - Difratoograma da fração do aditivo 1 pelo método do pó em amostra total passante na peneira #200 (abertura de 75 μm)	41
Figura 3.4 - Difratoograma da fração do aditivo 2 pelo método do pó em amostra total passante na peneira #200 (abertura de 75 μm)	41
Figura 3.5 - Granulometria a laser do aditivo 1 ($d_{10\%} = 0,83 \mu\text{m}$; $d_{50\%} = 5,31 \mu\text{m}$; $d_{90\%} = 19,08 \mu\text{m}$)	42
Figura 3.6 - Granulometria a laser do aditivo 2 ($d_{10\%} = 0,85 \mu\text{m}$; $d_{50\%} = 6,08 \mu\text{m}$; $d_{90\%} = 19,87 \mu\text{m}$)	43
Figura 3.7 - Betoneira utilizada	46
Figura 3.8 - Slump test	46

Figura 3.9 - Moldagem dos CPs	48
Figura 3.10 - Identificação das amostras para:	48
I - Moldagem	
II - Entrada tanque de cura	
Figura 3.11 - Prensa utilizada para ensaios mecânicos	49
Figura 3.12 - Aparato utilizado para ensaio de tração	50
Figura 3.13 - CP no compressômetro	50
Figura 3.14 - Conjunto posicionado na prensa	50
Figura 3.15 - Ensaio de capilaridade	52
I - CPs em lâmina d'água	
II - Manutenção da lâmina d'água	
Figura 3.16 - Detalhe lâmina da d'água	52
Figura 3.17 - Esquema para corte das amostras para ensaio NT Build 492 (1999)	54
Figura 3.18 - Amostras preparadas para ensaio:	54
I - Identificação da amostra	
II - Face de corte	
Figura 3.19 - Amostras na câmara de vácuo:	55
I - Vácuo seco	
II - Vácuo saturado em solução $\text{Ca}(\text{OH})_2$	
Figura 3.20 - Conjunto de vácuo: câmara de vácuo, ColdTrap e bomba de vácuo	56
Figura 3.21 - Montagem das amostras nas camisas de silicone:	56
I - Camisa de silicone com abraçadeiras	
II - Corpo de prova acondicionados e fixados na camisa de silicone	
Figura 3.22 - Teste de estanqueidade do conjunto	57
Figura 3.23 - Montagem conjuntos dentro das caixas com soluções anódica e catódica	57
Figura 3.24 - Montagem completa do ensaio de migração de cloretos	58
Figura 3.25 - Amostras antes (I), durante (II) e depois (III) do seccionamento diametral	59
Figura 3.26 - Amostras:	59
I - Logo após ao seccionamento	
II - Após aplicação do nitrato de prata	
Figura 3.27 - Marcações p/ medição das profundidades de penetração íons de cloretos	60
Figura 3.28 - Máquina de corte	60
Figura 3.29 - Amostras cortadas e retificadas pra ensaio do MEV e detalhe da amostra	61
Figura 4.1 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão - Classe II	64

Figura 4.2 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão - Classe III	64
Figura 4.3 - Comparativo entre todas as misturas: resistência à compressão	65
Figura 4.4 - Resultados dos ensaios de resistência à tração	67
Figura 4.5 - Resultados obtidos pelo ensaio de absorção de água por capilaridade	68
Figura 4.6 - Visualização da penetração de íons cloreto nas amostras de diversos traços, evidenciada pela aspersão de nitrato de prata	71
Figura 4.7 - Imagens geradas por MEV do traço da classe de agressividade III, com aumento de 2500x, na região onde não foi detectada a penetração de íons cloreto: (a) Traço TRC3; (b) Traço TA1C3; (c) Traço TA2C3	73
Figura 4.8 - Imagens geradas por MEV do traço da classe de agressividade III, com aumento de 2500x, na região onde foram medidas a profundidade de penetração de íons cloreto: (a) Traço TRC3; (b) Traço TA1C3; (c) Traço TA2C3	73
Figura 4.9 - Imagens geradas por MEV do traço da classe de agressividade III, com aumento de 25000x, na região onde foram medidas a profundidade de penetração de íons cloreto: (a) Traço TRC3; (b) Traço TA1C3; (c) Traço TA2C3	74
Quadro 2.1 - Classes de agressividade ambiental	06
Quadro 2.2 - Teores críticos de cloretos em relação à massa de cimento	12

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classes de agressividade ao concreto de acordo com o meio ambiente	07
Tabela 2.2 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto	07
Tabela 2.3 - Métodos para determinação de penetração de cloretos	23
Tabela 2.4 - Penetrabilidade de íons de cloretos baseadas na carga passante	27
Tabela 2.5 - Voltagem e duração	29
Tabela 2.6 - Avaliação da qualidade do concreto ensaiado em função do índice de difusão encontrado	31
Tabela 3.1 - Propriedades químicas do cimento CPV ARI FÁCIL utilizado	34
Tabela 3.2 - Propriedades físicas do cimento CPV ARIA FÁCIL utilizado	34
Tabela 3.3 - Principais características analisadas do agregado miúdo	35
Tabela 3.4 - Principais características analisadas do agregado graúdo	36
Tabela 3.5 - Propriedades físicas e químicas dos aditivos	37
Tabela 3.6 - Denominação e nomenclatura das misturas	40
Tabela 3.7 - Composição dos traços	41
Tabela 3.8 - Quantidade de CPs utilizados e respectivos ensaios	42
Tabela 3.9 - Parâmetros utilizados para determinação do módulo de elasticidade	46
Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios de consistência pelo abatimento de tronco de cone	59
Tabela 4.2 - Resistência média à compressão dos CPs (100 x 200) mm	59
Tabela 4.3 - Resistência média à tração dos CPs (100 x 200) mm	62
Tabela 4.4 - Valores médios do Módulo de elasticidade dos CPs (150 x 300) mm	63
Tabela 4.5 - Média dos resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade estabelecido pela NBR 9779 (ABNT, 2012)	64
Tabela 4.6 - Valores médios do índice de absorção de água, do índice de vazios e da massa específica dos CPs, obtidos segundo as recomendações da NBR 9778 (ABNT, 2005)	65
Tabela 4.7 - Valores médios do coeficiente de difusão de íons de cloretos obtidos segundo os procedimentos estabelecidos na norma NT Build 492 (1999)	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACIC	American Concrete Institute Committee
ARI	Alta Resistência Inicial
ASTM	American Society for Testing and Materials
3D	Três Dimensões
CEB	Comité Euro-International du Béton
CEN	Comité Europeen de Normalisation
CPs	Corpos de prova
GE	General Electric
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
ISO	International Organization for Standardization
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
PF	Perda ao Fogo
pH	Potencial Hidrogeniônico
PRAN	Aditivos redutores de permeabilidade em condições não hidrostáticas
PRAH	Aditivos redutores de permeabilidade à pressão estática
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires d' Essais et des Echerces sur lês Matériau et les Constructions
SSS	Superfície seca saturada
TA1C2	Traço com Adivo 1 classe de agressividade II
TA2C2	Traço com Adivo 2 classe de agressividade II

TA1C3	Traço com Aditivo 1 classe de agressividade III
TA2C3	Traço com Aditivo 2 classe de agressividade III
TRC2	Traço de referência classe de agressividade II
TRC3	Traço de referência classe de agressividade III
TR	Traço de referência
TRA1	Traço de referência com aditivo 1
TRA2	Traço de referência com aditivo 2
UR	Umidade Relativa

LISTA DE UNIDADES

%	por cento
A	ampère
Å	ångström
cm	centímetro
cm ²	centímetro quadrado
cm ² /g	centímetro quadrado por grama
cm ³	centímetro cúbico
g	grama
g/cm ³	grama por centímetro cúbico
h	hora
kg	quilograma
kg/cm ³	quilograma por centímetro cúbico
kg/m ³	quilograma por metro cúbico
kN	quilonewton
m ²	metro quadrado
m ³	metro cúbico
mA	miliampère
min	minuto
mm	milímetro
MPa	megapascal
nm	nanômetro
°C	grau Celsius
Pa	Pascal
V	volts
W	Watt

LISTA DE SÍMBOLOS

a/c	relação água/cimento
AgNO ₃	nitrato de prata
Al ₂ O ₃	óxido de alumínio
AlCl	cloreto de alumínio
BaCl ₂	cloreto de bário
C30	classe de resistência de 30 MPa
C ₃ A	aluminato tricálcio
C40	classe de resistência de 40 MPa
Ca	cálcio
CA	concreto armado
Ca(OH) ₂	hidróxido de cálcio
CaO	óxido de cálcio
CaO	óxido de cálcio
CaSO ₄	sulfato de cálcio
Cl	cloro
Cl ⁻	íons de cloreto
CO ₂	anidrido carbônico
CO ₂	dióxido de carbono
CP	concreto protendido
CP V	cimento Portland de alta resistência inicial
CPs	corpos de prova
C-S-H	silicato de cálcio hidratado
D _{nssm}	coeficiente de difusão por migração em estado não estacionário
f _c	
Fe ₂ O ₃	óxido de ferro

H ₂ O	água
HCl	ácido clorídrico
I ₀	corrente elétrica inicial
K ₂ O	óxido de potássio
KCl	cloreto de potássio
KOH	hidróxido de potássio
L	espessura da amostra
m	massa
Mg(OH)	hidróxido de magnésio
MgO	óxido de magnésio
MgSO ₄	sulfato de magnésio
M _i	Massa imerso
M _s	Massa seca em estufa
M _{sat}	Massa saturada superfície seca
Na ₂ SO ₄	sulfato de sódio
NaCl	cloreto de sódio
NaOH	hidróxido de sódio
OH ⁻	hidroxila
SiO ₂	óxido de silício
SO ₃	trióxido de enxofre
t	tempo de duração do ensaio
T	Valor médio da diferença das temperaturas inicial e final
U	valor absoluto da voltagem aplicada
X _d	valor médio das profundidades de penetração
ρ	densidade
σ	tensão

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	x
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiv
LISTA DE UNIDADES	xvi
LISTA DE SÍMBOLOS	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Importância e justificativa	1
1.2 Objetivo geral	3
1.3 Objetivos específicos	3
1.4 Estrutura da dissertação	4
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Durabilidade das estruturas de concreto armado	5
2.2 Ataque de cloretos	9
2.2.1 Corrosão das armaduras	13
2.3 Estrutura de vazios	14
2.4 Mecanismos de transporte	16
2.4.1 Permeabilidade	17
2.4.2 Absorção capilar	20
2.4.3 Difusão	20
2.4.4 Migração	22
2.4.5 Métodos para previsão de penetração de cloretos	23
2.5 Considerações normativas sobre ensaios de penetração de cloretos	24
2.5.1 AASHTO T 277 26 (2015)	24

2.5.2 AASHTO T 259 27 (2017)	24
2.5.3 ASTM C 1202 (2010)	25
2.5.4 LNEC E 390 (1993)	28
2.5.5 NT BUILD 492 (1999) e LNEC 463 (2004)	28
2.5.6 ISO 1920 (2013)	32
2.6 Aditivos impermeabilizantes para compósitos cimentícios	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1 Materiais utilizados	35
3.1.1 Aglomerante	35
3.1.2 Agregado miúdo	37
3.1.3 Agregado graúdo	38
3.1.4 Aditivo cristalizante	39
3.1.4.1 Composição química qualitativa	40
3.1.4.2 Identificação qualitativa das fases cristalinas	40
3.1.4.3 Área superficial específica	42
3.1.4.4 Dimensão granulométrica	42
3.1.5 Água	43
3.2 Plano experimental	43
3.2.1 Dosagem e fabricação dos concretos	44
3.2.2 Moldagem e cura dos corpos de prova	47
3.2.3 Resistência à compressão axial	48
3.2.4 Tração por compressão diametral	49
3.2.5 Módulo de elasticidade estático	50
3.2.6 Absorção de água por capilaridade	51
3.2.7 Absorção, índice de vazios e massa específica	52

3.2.8 Penetração de íons cloreto	53
3.2.9 Ensaio no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	60
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS	62
4.1 Abatimento de tronco de cone	62
4.2 Resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade	63
4.3 Absorção de água por capilaridade	67
4.4 Absorção de água, índice de vazios e massa específica	69
4.5 Determinação do coeficiente de difusão pela NT Buid 492	70
4.6 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	72
5. CONCLUSÕES	75
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
APÊNDICES	85

1

INTRODUÇÃO

1.1 Importância e justificativa

Nas últimas décadas muitos têm sido os desafios da engenharia de materiais em aumentar e manter a durabilidade das estruturas de concreto armado. Por se tratar de uma associação de materiais, o concreto armado é um material construtivo com boa resistência a diferentes tipos de esforços mecânicos e excelente estabilidade. Porém, o desempenho de um compósito cimentício vai além de sua resistência mecânica, sendo sua durabilidade e sua vida útil fatores primordiais para que um concreto seja considerado realmente eficiente.

O concreto tem como uma de suas funções proteger o aço: de forma física, por meio do cobrimento e, de forma química, por meio da preservação da camada passivadora que é formada e mantida naturalmente em sua superfície em decorrência da alta alcalinidade presente na solução dos poros do concreto. Porém, ao longo da vida útil de projeto, essa proteção pode ser comprometida por reações desencadeadas e influenciadas pelo meio no qual a estrutura está inserida, levando ao desequilíbrio desta e abrindo caminho para manifestações patológicas capazes de gerar diversos tipos de degradação da estrutura.

Dentre as patologias das estruturas em concreto armado, a corrosão das armaduras é considerada a pior e mais comum. Em síntese, trata-se de um processo eletroquímico decorrente do fluxo de elétrons e íons entre duas regiões distintas de um metal e é desencadeado pela penetração de agentes oxidantes como o oxigênio e hidrogênio, os quais ao reagirem com a superfície metálica, oxidam e deterioram a armadura, prejudicando a sua funcionalidade (SOUSA, 2014).

Mecanismos como a carbonatação do concreto, responsável pela redução do pH da matriz cimentícia, e o ataque de íons de cloretos, ambos capazes de desestabilizar a camada passivadora do aço, são os principais desencadeadores dos processos causadores da corrosão. Tanto a carbonatação quanto a penetração de íons de cloretos ocorrem devido ao transporte de massa (líquidos ou gases) pelo interior do concreto. No caso particular dos íons cloreto, estes podem ser encontrados em diversas fontes, como, por exemplo, na água de emassamento, nas águas marinhas, na névoa salina e em alguns tipos de aditivos, e penetram no concreto pela sua rede interconectada de poros, principalmente por difusão e migração.

Para melhorar o desempenho dos concretos à penetração de agentes deletérios, busca-se encontrar soluções capazes de reduzir o avanço destes em sua matriz cimentícia. Uma das opções adotadas é a introdução na mistura de aditivos redutores de permeabilidade, capazes de modificar sua estrutura interna, principalmente em seu estado endurecido, por meio da formação de cristais ativados na presença de umidade e oxigênio. O presente trabalho buscou avaliar o desempenho de dois destes aditivos por meio da análise dos efeitos produzidos nas propriedades mecânicas, na estrutura de vazios, na absorção capilar e na capacidade de transporte de íons dos concretos produzidos. Utilizou-se o ensaio acelerado de migração de íons cloreto no estado não estacionário, conforme procedimento normativo especificado pela NT Build 492 (NordestTest, 1999), a fim de determinar o coeficiente de difusão destas misturas.

O tema proposto se torna relevante, uma vez que poucas informações são encontradas na literatura sobre a utilização e desempenho dos aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar. Soma-se a isto, o fato do ensaio estabelecido pela NT Build 492 (NordestTest, 1999), ainda ser pouco executado no Brasil.

1.2 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo principal a avaliação do desempenho de sistemas de impermeabilização por cristalização capilar incorporados ao concreto frente à penetração de cloretos.

1.3 Objetivos específicos

Este estudo tem como objetivos específicos comparar o desempenho final dos concretos produzidos com e sem os aditivos redutores de permeabilidade, quanto aos seguintes aspectos:

- suas propriedades no estado fresco (consistência por abatimento de tronco de cone, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade);
- sua resistência à penetração de água (absorção por capilaridade, absorção por imersão, índice de vazios e densidade);
- sua resistência a migração de cloretos por meio de método de ensaio acelerado no estado não estacionário;
- avaliação qualitativa de sua microestrutura por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

1.4 Estrutura da dissertação

Para a organização e estruturação deste estudo, além do presente capítulo que apresenta uma breve introdução, objetivos geral e específicos, o trabalho foi dividido em mais cinco capítulos:

No Capítulo 2 é descrita a fundamentação teórica na qual aborda-se conceitos relevantes ao desenvolvimento e esclarecimento do processo que origina o ataque por cloretos, tais como a descrição de como ocorre a penetração destes íons no concreto, aspectos relacionados a durabilidade do concreto, à corrosão das armaduras, aos mecanismos de transporte de massa e a alguns dos métodos normativos que buscam avaliar o desempenho do concreto frente a penetração de tais íons.

No Capítulo 3 estão dispostos os materiais e os métodos utilizados, detalhando os procedimentos do plano experimental como: a caracterização dos materiais, moldagem dos corpos de prova fabricados, preparação das amostras e a descrição dos ensaios executados.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados para cada ensaio executado bem como as observações e análises dos mesmos. Foram descritos em forma de textos, tabelas, gráficos e as discussões em termos comparativos diante dos seis tipos de concretos estudados.

No Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais e as conclusões oriundas das análises dos resultados. Em seguida são apresentadas as referências bibliográficas consultadas e utilizadas como base para o desenvolvimento desse estudo, seguido pelos apêndices que compõe esse trabalho. Salienta-se que somente foram referenciadas as fontes não produzidas pela autora especificamente para esse trabalho.

Apesar das recomendações da NBR 14724 (ABNT, 2011), ao longo do texto a identificação das figuras será feita de forma clássica, ou seja, na parte inferior à mesma, recebendo numeração sequencial e numeração referente ao capítulo a qual pertence.

2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo dedica-se à compreensão dos principais aspectos relacionados à ação dos cloretos nas estruturas de concreto armado. Faz-se uma abordagem geral sobre algumas recomendações normativas vigentes. Por fim, uma abordagem introdutória sobre os aditivos incorporadores de ar é feita mostrando os efeitos mais relevantes produzidos sobre o material.

2.1 Durabilidade das estruturas de concreto armado

O cimento Portland vem sendo utilizado desde o início do século XX para a execução das mais variadas estruturas de concreto armado. Inicialmente, o concreto era considerado um material de durabilidade ilimitada, supondo-se ser capaz de garantir a devida proteção das armaduras. Apesar do bom desempenho notado ao longo de alguns anos, as estruturas de concreto armado, de um modo geral, apresentaram durabilidade insuficiente para garantir o desempenho esperado ao longo da vida útil prevista. Em decorrência, estudos realizados com o intuito de se identificar e mensurar a ação dos agentes envolvidos na deterioração de estruturas de concreto armado e de gerar dados para o desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de fornecer melhores estimativas da vida útil de tais estruturas, tornam-se cada vez mais numerosos.

Dentre os principais métodos para se estimar a vida útil das estruturas de concreto armado, têm-se: o método com base em experiências anteriores, o método com base em ensaios acelerados, o método com base no enfoque determinista e o método com base no enfoque estocástico ou probabilista (MEDEIROS *et al.*, 2011), dentre outros.

Segundo Andrade (1995), métodos tradicionais utilizados para se avaliar a vida útil das estruturas, levam em consideração os seguintes parâmetros relacionados às características do

concreto: a classe de resistência à compressão, o consumo de cimento Portland e a relação água/aglomerante utilizados na mistura e o teor de ar incorporado. Isaia (2011) inclui, além dos já mencionados, os seguintes parâmetros: tipo de cimento, tipos e proporções das adições utilizadas, natureza e diâmetro máximo dos agregados e tipo de cura empregada. As condições ambientais de exposição da estrutura e a espessura de recobrimento das armaduras tem, também, grande influência no processo.

As estruturas de concreto armado podem se deteriorar em decorrência da agressividade do meio em que estão inseridas, uma vez que este é capaz de exercer sobre elas ações deletérias de natureza física e química. Há algumas décadas, diversos países vêm adequando suas normas técnicas, relacionadas ao projeto e execução de estruturas de concreto armado, de modo a fornecer critérios específicos para que a durabilidade e, conseqüentemente, a vida útil prevista em projeto, seja alcançada. No Brasil, a NBR 6118 (ABNT, 2014) preconiza que as estruturas devem “conservar a segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período de vida útil, sob as condições ambientais previstas na época do projeto”.

Para tal, deve-se estabelecer a classe de agressividade ambiental que a estrutura será submetida, conforme apresentado no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade	Agressividade	Risco de deterioração
I	Fraca	Insignificante
II	Média	Pequeno
III	Forte	Grande
IV	Muito forte	Elevado

Fonte: NBR 6118 (2014), p. 16 (adaptada).

As tabelas 2.1 e 2.2 relacionam e especificam as classes de agressividade, o ambiente onde a estrutura está inserida e a qualidade de cada concreto indicado para cada uma das classes.

A Figura 2.1 mostra esquematicamente os parâmetros utilizados para a avaliação da durabilidade e desempenho de estruturas em concreto armado.

Tabela 2.1 - Classes de agressividade ao concreto de acordo com o meio ambiente

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana ^{1,2}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹ Industrial ^{1,2}	Grande
IV	Muito forte	Industrial ^{1,3} Respingo de maré	Elevado

- 1) Pode-se admitir um micro clima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).
- 2) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras de região de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.
- 3) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

Tabela 2.2 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe do concreto (de acordo com a ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
Consumo do cimento por m ³ de concreto kg/m ³	CA e CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

Notas:

- 1 - O concreto empregado deve cumprir com os requisitos estabelecidos na NBR 12655 (ABNT, 2006)
- 2 - CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado
- 3 - CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido

Fonte: NBR 12.655 (ABNT, 2006) p. 10.

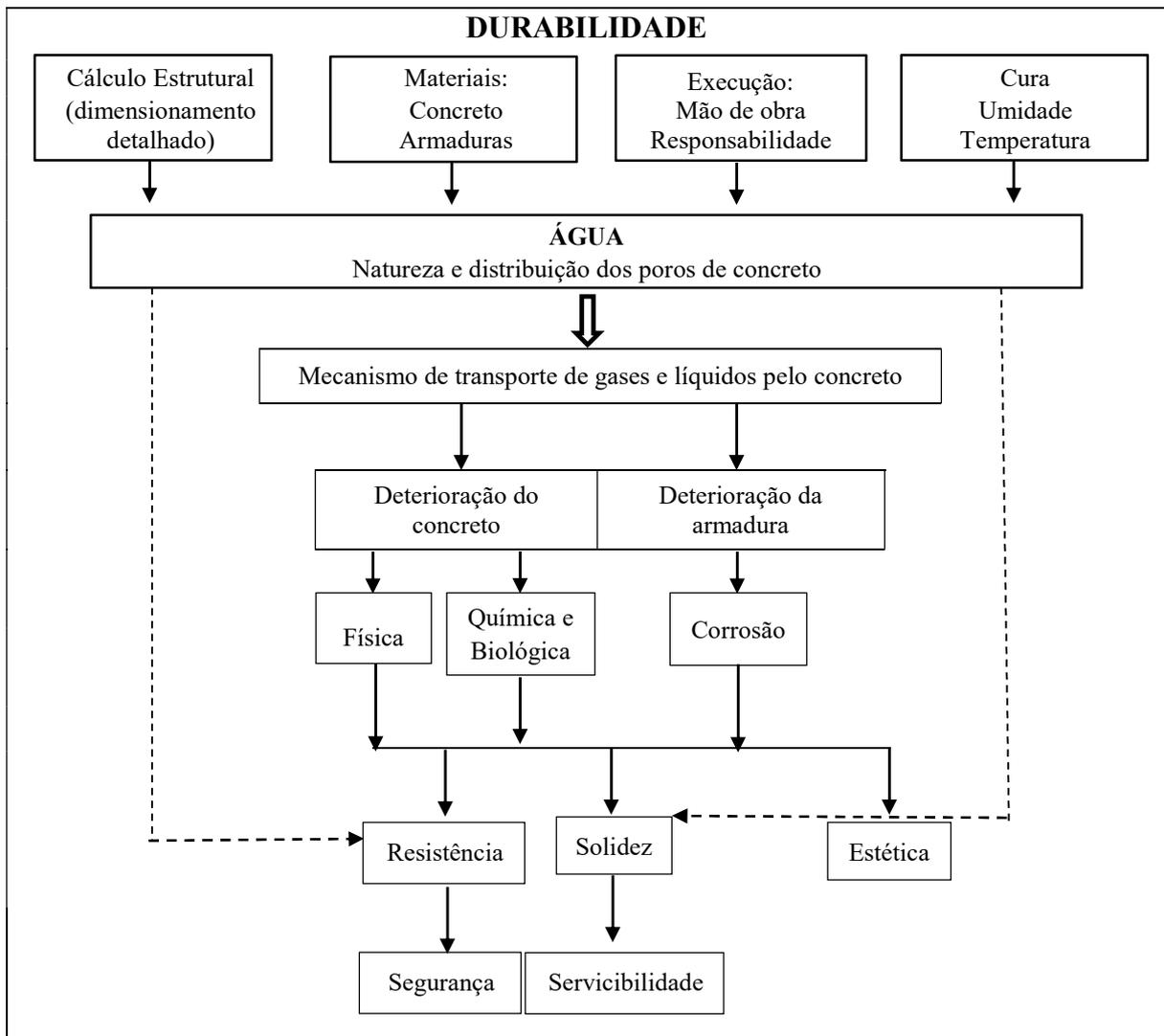


Figura 2.1 - Parâmetros de avaliação de durabilidade e desempenho de uma estrutura
 Fonte: Souza e Ripper, 1998, p. 20 (adaptado).

Na dosagem dos concretos, não foram utilizados aditivos plastificantes, de modo a se evitar interações químicas e físicas com os aditivos redutores de permeabilidade, analisados neste estudo. Foi definido que as medidas de abatimento de tronco de cone (*slump test*), conforme estabelecido pela NBR NM 67 (ABNT, 1998), deveriam estar entre os intervalos de (7 ± 2) cm e (10 ± 2) cm para as classes de agressividade III e II, respectivamente, mantendo-se a relação água/cimento estabelecida pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014), conforme mostrado na Tabela 3.8. A areia e brita utilizadas foram secas ao ar, sob abrigo, armazenadas em sacos em sacos plásticos e acondicionadas dentro de caixotes plásticos.

A durabilidade das estruturas é afetada diretamente pelo ingresso de substâncias agressivas no concreto que, por sua vez, depende de certos aspectos de sua microestrutura, tais como, de sua

estrutura de vazios. Em ambientes marinhos destacam-se as patologias relacionadas à corrosão das armaduras em decorrência, predominantemente, da penetração de íons de cloreto na estrutura. Já nos ambientes urbanos predominam a ocorrência de intempéries como chuvas ácidas, ventos e temperaturas atípicas, deposição de partículas sólidas nas estruturas e o fenômeno da perda de alcalinidade das soluções intersticiais do concreto, conhecido como carbonatação (SILVA, 2011). Além do CO_2 outros gases como o dióxido de enxofre (SO_2) e gás sulfídrico (H_2S) podem reduzir também o pH da solução existente nos poros do concreto (VERAS e CUNHA, 2014).

A durabilidade das estruturas de concreto armado depende das decisões tomadas na fase de projeto, da escolha adequada dos materiais constituintes, da adequada execução da estrutura, das condições de uso e da realização das manutenções pertinentes ao longo da vida útil (SOUZA E RIPPER, 1998).

2.2 Ataques por cloretos

Pode-se definir cloretos como sais inorgânicos que, em sua maioria, são solúveis em água e derivados da reação de uma base com o ácido clorídrico (HCl). É uma espécie iônica formada pela ligação entre um ânion do elemento cloro (Cl^-) e qualquer outro elemento com menor carga eletronegativa. Os mais comuns dentre os cloretos são: cloreto de alumínio (AlCl), cloreto de cálcio (CaCl_2), cloreto de bário (BaCl_2), cloreto de potássio (KCl) e o cloreto de sódio (NaCl). Os cloretos estão presentes em todas as águas naturais, em concentrações variáveis, tais como nas águas minerais, águas potáveis, águas de rios e águas do mar.

Segundo Andrade (1993) e Helene (1993), os íons cloretos podem chegar até as estruturas por meio de diferentes fontes, tendo como as principais delas:

- Contato direto com a água do mar ou respingos de marés;
- contaminação pela névoa salina (maresia);
- por meio da água e dos agregados adicionados ao concreto;
- por meio de certos tipos de aceleradores de pega que contém cloreto de cálcio;
- por meio de alguns processos industriais.

Os íons de cloretos dissolvidos em água são considerados os com maior potencial de penetração. Silva (2006) cita ainda alguns fatores que influenciam de forma relevante a velocidade e profundidade da penetração dos íons cloretos:

- Tipos de cimento;
- consumo de cimento;
- relação água/aglomerante;
- pH da solução contida nos poros;
- quantidade de C-S-H;
- temperatura;
- cobertura de proteção da armadura;
- adensamento e cura;
- ocorrência ou não de fissuras.

Os estudos relacionados a durabilidade das estruturas de concreto armado, quando se analisam aspectos ligados à penetração de íons cloreto, tomam como referência o concreto no estado endurecido, e buscam avaliar seu desempenho no que diz respeito a proteção oferecida às armaduras.

Dentre os problemas causados ao concreto, nos casos envolvendo ataques por cloretos, a corrosão das armaduras é considerada o mais grave deles. O risco da corrosão induzida por íons cloreto aumenta com a facilidade dos mesmos em migrar através da pasta de cimento e com o aumento da proporção entre os íons de cloretos (Cl^-) e a hidroxila (OH^-) existentes nas soluções presentes nos poros do material. Segundo Taylor (1997), a relação Cl^-/OH^- é afetada pela quantidade de Cl^- não fixada pelas fases sólidas do cimento hidratado e pela concentração de OH^- , que, por sua vez, depende do teor de álcalis presentes neste. Nos concretos fabricados a partir de cimentos Portland produzidos com adições, a concentração de OH^- normalmente é menor do que nos casos onde são utilizados o cimento Portland comum.

A fixação do Cl^- à matriz cimentícia é favorecida pela presença do aluminato tricálcico (C_3A) que, ao reagir com estes íons, produz o $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Sua formação, entretanto, pode ser reduzida em função da presença de sulfatos, uma vez que, em decorrência de sua maior afinidade química com os aluminatos, fará com que os monosulfatos e a etringita sejam produzidos preferencialmente (TAYLOR, 1997).

Page *et al.* (1981) *apud* Hilsdorf (1997) determinaram a taxa de Cl^-/OH^- presente nas soluções dos poros, a difusibilidade do Cl^- e a taxa de corrosão da armadura em aços envoltos em compósitos cimentícios produzidos a partir de diferentes tipos de cimentos. Taxas menores Cl^-/OH^- foram encontradas nos cimentos com maiores percentuais de C_3A (aluminato tricálcico). Tais taxas também eram menores nos cimentos contendo algumas adições, tais como, 30% de cinza volante ou 65% de escória de alto forno. Sendo menores as concentrações de OH^- encontrados nos cimentos compostos, as menores taxas de Cl^-/OH^- , obtidas nestes, eram presumivelmente devido a maiores percentuais de Cl^- fixados por seus produtos de hidratação. Verificou-se que a difusão de Cl^- varia em função o tipo de cimento utilizado, de acordo com a sequência mostrada na Figura 2.2.

Em conformidade com esses estudos, as taxas de corrosão são ligeiramente mais baixas nas armaduras envoltas em compósitos cimentícios produzidos com cimentos compostos, ou seja, contendo algum tipo de adição. Os autores enfatizaram a necessidade de mais estudos serem realizados para uma maior quantidade de tipos de cimento e de soluções de cloretos, antes de serem emitidas conclusões mais gerais. Apesar disso, os resultados indicaram que a fixação do Cl^- , assim como, a redução da difusibilidade, são ações eficazes quando se pretende reduzir a corrosão induzida por cloretos.

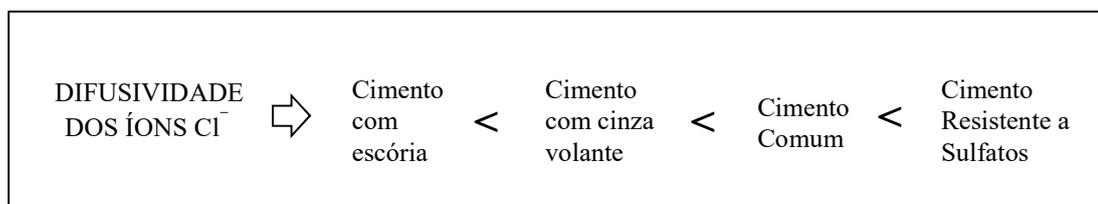


Figura 2.2 - Influência do tipo de cimento na difusividade dos íons Cl^-
 Fonte: Taylor, 1997, p. 360 (adaptado)

As armaduras apresentam tolerância a certos teores de cloretos sem que ocorra o início do processo corrosivo, mas, há um limite para que essa concentração não prejudique e provoque o rompimento da camada passivadora do metal. Alguns teores críticos de cloretos são apresentados no Quadro 2.2.

Apesar de não fazer qualquer menção quanto ao limite de cloretos permitido nos concretos com fins estruturais, a NBR 6118 (ABNT, 2014), em seu item 6.3.3.2, indica que as medidas

preventivas ao ataque de cloretos consistem em dificultar seu ingresso ao interior do concreto. Recomenda ter atenção com o cobrimento das armaduras juntamente com um rigoroso controle da fissuração, especificando o uso de um concreto de pequena porosidade. Nestes casos, aconselha o uso de cimento composto com adição de escória ou material pozolânico. Em seu item 7.4.4, enfatiza que não é permitida a utilização de aditivos contendo cloretos em sua composição tanto para concreto armado quanto para o concreto protendido. Coube à NBR 12655 (2015) estabelecer tais limites.

Para Andrade (1992), de um modo geral, os limites de cloretos devem ser de até 0,4% para massa de cimento e 0,1% para massa de concreto. Acima desses valores, podem provocar a despassivação das armaduras, porém, não se pode definir um valor mínimo exato para que a quantidade de cloretos seja prejudicial já que são muitos os fatores que, combinados ou não, podem desencadear o processo de corrosão em um metal.

Quadro 2.2 - Teores críticos de cloretos em relação à massa de cimento

Autores/Normas	Teor máximo de cloretos (%)
BRE (1980)	1
ACI Committe 318	0,20
ACI - Committee 222	0,15
BS 8110: Part 1 - BSI (1985)	0,4 para concreto armado 0,1 para concreto protendido
Andrade (1992)	0,4
Thomas (1996)	0,2 - concreto com 50% cinza volante 0,7 - para concretos sem cinza volante
NBR 12655 (2015)	0,05 para concreto protendido 0,15 para concreto exposto a cloretos 0,30 para concreto não exposto a cloretos 0,40 em brandas condições de exposição
NBR 6118 (2014)	Não há especificações

Fonte: Silva (2006), p. 48 (adaptado).

2.2.1 Corrosão das armaduras

O concreto garante a proteção das barras de aço nele contidas de forma física, desempenhando o papel de barreira protetora, e química, por meio da formação de uma película, conhecida como camada passivadora, produzida em decorrência da alta alcalinidade do meio que as envolve. Durante muito tempo atribuiu-se esta alcalinidade unicamente à presença do hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, produzido durante a hidratação do cimento, porém, estudos mais recentes indicam que ela se deve também ao hidróxido de sódio (NaOH) e ao hidróxido de potássio (KOH), presentes nas soluções contidas nos poros do concreto (ANDRADE e PAGE, 1996).

A corrosão das armaduras é considerada a pior e mais comum dentre as formas de deterioração de uma estrutura de concreto armado. Inicia-se com a despassivação das armaduras e subsequente formação da célula de corrosão (FIGUEIREDO e MEIRA, 2011). A ação dos íons cloreto é uma das principais causadoras da desestabilização da camada passivadora do aço, juntamente com o fenômeno da carbonatação, deixando o material vulnerável ao início do processo corrosivo (BAKKER, 1988). A Figura 2.3 (A) mostra a representação das principais reações encontradas em uma pilha de corrosão e a Figura 2.3 (B) ilustra corrosão em situação real em uma estrutura de concreto armado.

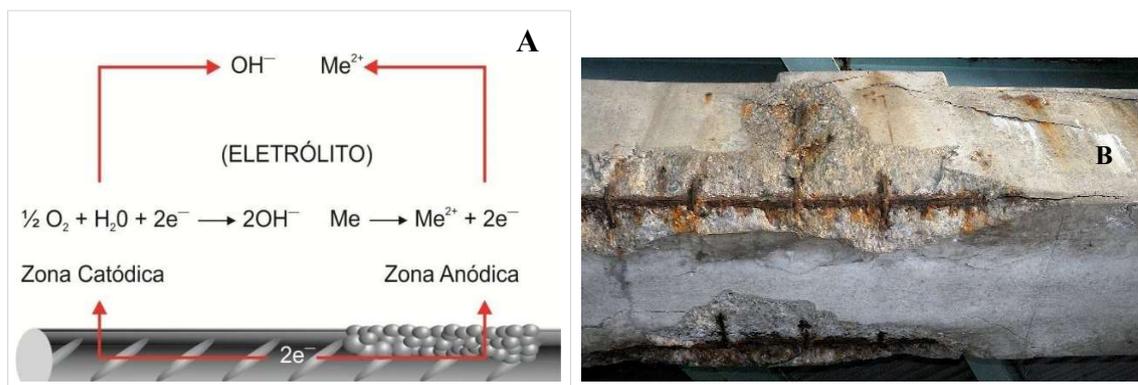


Figura 2.3 - (A) Representação de pilha de corrosão em um mesmo metal

Fonte: Figueiredo e Meira (2011), p. 906.

(B) Ilustração corrosão

Fonte: próprio autor

O processo corrosivo pode ocorrer de forma uniforme, ao longo da armadura, ou de maneira localizada. Sua forma localizada é iniciada, muitas vezes, em decorrência de um ataque por cloretos. A corrosão localizada por pite é extremamente grave, podendo causar a perfuração da

peça e chegar, inclusive, ao seccionamento da barra de aço. A velocidade da corrosão localizada é maior do que a ocasionada na corrosão generalizada. Os tipos de corrosão são mostradas na Figura 2.4.

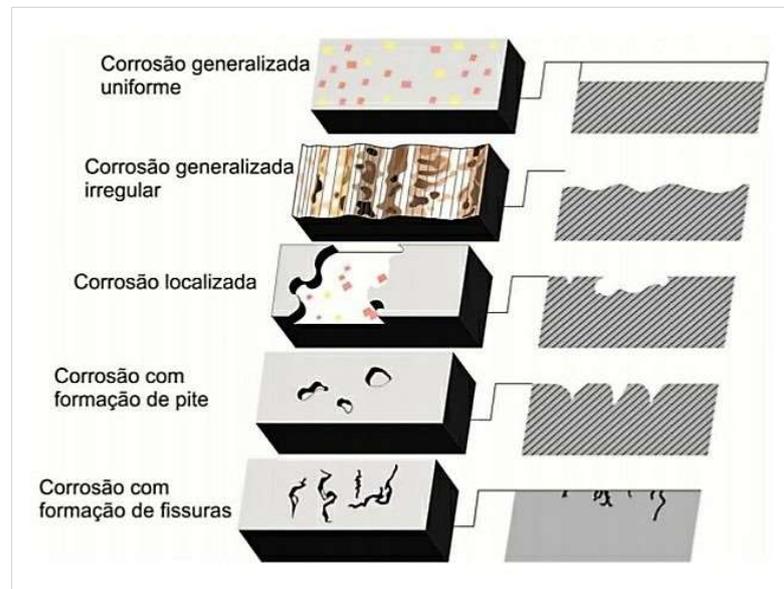


Figura 2.4 - Principais tipos de corrosão
Fonte: FELIU (1984), p. 35.

A corrosão pode ser desencadeada por fatores como a qualidade do concreto, o ambiente onde a estrutura foi executada e o cobrimento mínimo da armadura para a qual foi projetada, assim como a forma e qualidade da sua execução (FEDUMENTI, 2013).

As características peculiares do concreto tornam o transporte de fluidos um assunto bastante complexo e importante já que os principais fatores de sua deterioração estão relacionados com a sua estanqueidade, permeabilidade, absorção e difusibilidade (MEDEIROS, 2013).

2.3 Estrutura de vazios

Sendo a estrutura interna de um compósito de matriz cimentícia formada por componentes sólidos e por vazios, o desempenho do concreto quanto à penetração de agentes agressivos ou não, depende muito da distribuição, da forma e do tamanho de seus poros (RIBEIRO, 2014). A caracterização desta estrutura porosa, semelhante a representada na Figura 2.5, é uma tarefa bastante complexa, sendo necessário a realização de diversos ensaios para defini-la.

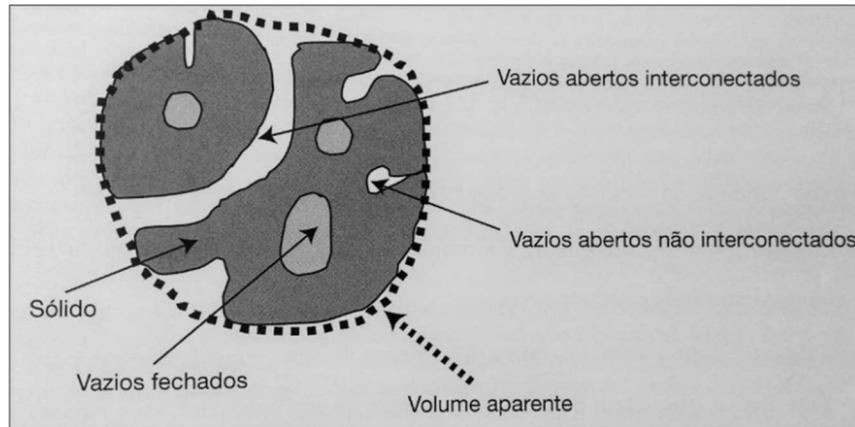


Figura 2.5 - Esquema de poros de um material
Fonte: Ollivier (2014), p. 43.

A conexão entre os poros, suas formas e tortuosidades são características fundamentais a serem analisadas quando se deseja avaliar a permeabilidade de um material. Os poros de maior importância são os contínuos (interconectados), com raios entre 10^{-2} e 10^{-8} m, que influenciam muito na capacidade de transporte de agentes através do concreto, diferentemente dos descontínuos, que são irrelevantes para este aspecto (NEVILLE, 2016).

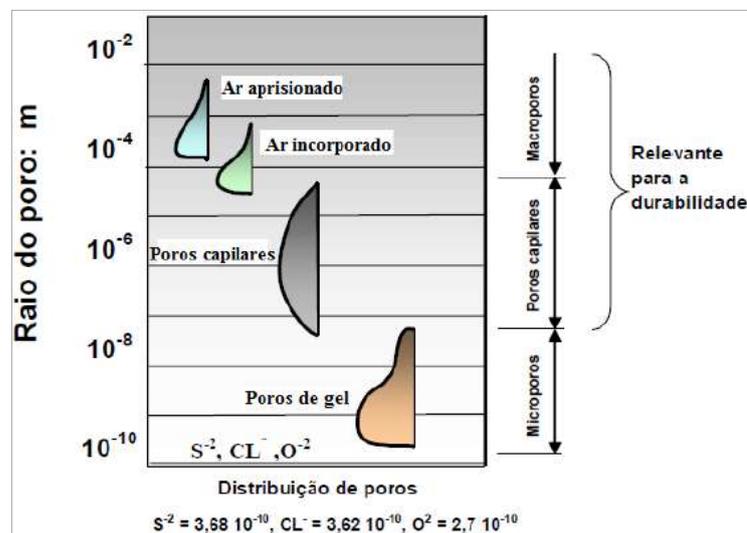


Figura 2.6 - Distribuição de poros
Fonte: Cascudo (1997), p. 237.

O excesso de poros com diâmetros maiores (500 \AA) podem aumentar a permeabilidade e também prejudicar a resistência mecânica do concreto, ao passo que os poros de menores diâmetros geralmente interferem na retração e na fluência (KHIARA, 2005).

Segundo Nepomuceno (2005), cada material possui uma estrutura interna particular que determinará a velocidade de penetração dos fluídos através desta. Materiais com porosidades semelhantes podem apresentar permeabilidades bastante distintas devido a conectividade dos poros da estrutura. Na Figura 2.7 (I) os poros são interconectados por grandes aberturas e na Figura 2.7 (II) os poros são conectados apenas parcialmente.

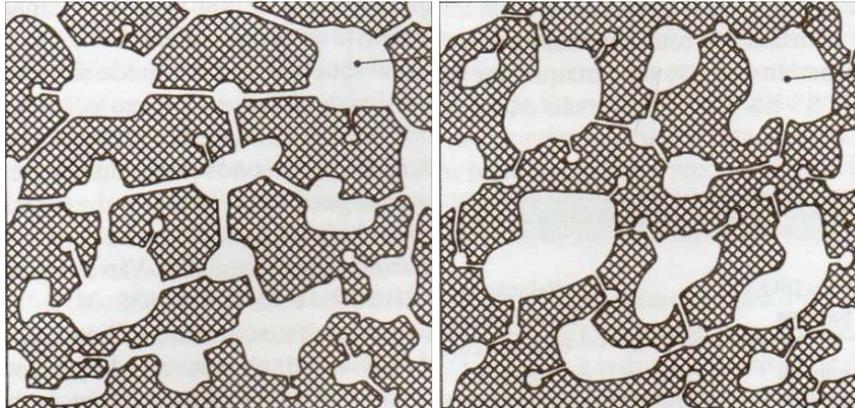


Figura 2.7 - Porosidades semelhantes, permeabilidades diferentes:

I - Alta permeabilidade

II - Baixa permeabilidade

Fonte: Neville (2013), p. 261.

Para se garantir a durabilidade das estruturas de concreto armado, torna-se imprescindível o conhecimento e a análise dos mecanismos de transportes que regem o acesso de agentes deletérios ao seu interior.

2.4 Mecanismos de transporte

A deterioração das estruturas de concreto armado está diretamente relacionada aos fluidos (gases, vapores e líquidos), que ingressam através da estrutura de vazios do material e aos fatores que proporcionam essa penetração. Em se tratando de concreto, tais substâncias penetram devido às forças impulsoras que promovem diferenças entre variáveis, tais como potencial elétrico, pressão, temperatura, densidade e sucção capilar (NEPOMUCENO, 2005). Segundo Andrade (1995), devem ser considerados dois aspectos para a avaliação dos danos decorrentes da penetração de agentes agressivos: a identificação dos mecanismos que atacam o concreto e os níveis máximos toleráveis dos danos causados por eles.

Segundo Hilsdorf (1995), além da capilaridade dos poros, as fissuras e os defeitos podem gerar caminhos para a penetração de fluidos no concreto, onde os íons cloretos são transportados principalmente por difusão, que ocorre devido a diferença de concentração entre diversas regiões; por permeabilidade, onde a diferença de pressão hidráulica transporta os íons de cloreto entre regiões; por migração, na qual os íons negativos de cloretos migram para regiões positivas da armadura (anódica); e por convecção, analisada por meio da diferença do teor de umidade, já que águas contendo cloretos sempre movem-se para a região com menor concentração de umidade.

Nos próximos tópicos são descritos detalhadamente os principais fenômenos responsáveis pela penetração de fluidos e gases no concreto.

Os concretos mais porosos e/ou com fissuras podem ser contaminados pela absorção capilar, enquanto que nos mais densos e sem fissuras a penetração de íons de cloretos ocorre por meio da difusão (HELENE, 1993).

A Figura 2.8 mostra um esquema dos mecanismos de entrada de íons de cloretos pelo concreto.

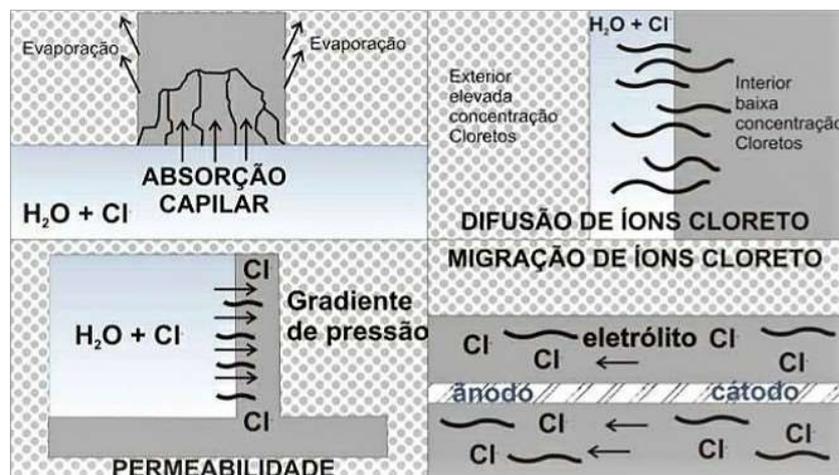


Figura 2.8 - Mecanismos de transporte de íons de cloretos pelo concreto
Fonte: Helene (1993), p. 121.

2.4.1 Permeabilidade

Helene (1993) definiu a permeabilidade como sendo a movimentação de um fluido submetido à ação de um gradiente de pressão, sendo dependente do diâmetro e da intercomunicação dos

poros do material. Já Neville (2013) a define como sendo a facilidade com que líquidos ou gases se movimentam através do concreto, sendo esta, propriedade essencial para a estanqueidade das estruturas que precisam conter os ataques químicos. Nos concretos produzidos com agregados comuns essa permeabilidade é governada pela porosidade da pasta de cimento.

A permeabilidade do concreto à água foi um dos primeiros parâmetros utilizados para classificar um concreto no que diz respeito à sua durabilidade, pois caracteriza a conectividade da sua estrutura porosa. Como este ensaio é executado com a amostra saturada, e isso não é uma condição real das construções, outros parâmetros passaram a ser utilizados de forma combinada para se avaliar a permeabilidade de um material como, por exemplo, a absorção capilar (NEPOMUCENO, 2005).

A permeabilidade de um material pode ser medida simplificada por um ensaio em laboratório no qual a superfície superior de uma amostra é submetida a água sob pressão até alcançar a condição estável. A Lei de Darcy para fluxo laminar em um sistema poroso é utilizada para descrever o fluxo de fluidos não compressíveis através dos poros de um concreto conforme Equação 2.1 (NEVILLE, 2013).

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dq}{dt} = K' \rho g \cdot \frac{\Delta h}{\eta L} \quad \text{Eq. 2.1}$$

Onde:

$\frac{dq}{dt}$ = velocidade do fluxo de água (m^3/s);

A = área da seção transversal da amostra (m^2);

Δh = diferença de altura na coluna hidráulica através da amostra (m);

L = espessura da amostra (m);

η = viscosidade dinâmica do fluido ($N \cdot s/m^2$);

ρ = densidade do fluido (kg/m^3);

g = aceleração devido à gravidade (m/s^2);

K' = permeabilidade intrínseca do material (m^2).

O coeficiente K' independe do fluido envolvido. Como o fluido utilizado é geralmente a água, podemos então colocar:

$$K = \frac{K' \rho g}{\eta} \quad \text{Eq. 2.2}$$

Onde K é expresso em m/s^2 e é chamado de coeficiente de permeabilidade do concreto, para o caso do uso de água à temperatura ambiente. Tal consideração deve ser feita em virtude da mudança da viscosidade da água em função da temperatura.

Quando o fluxo dq/dt atinge o estado estacionário, K pode ser obtido diretamente, utilizando-se a Equação 2.3.

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dq}{dt} = K \cdot \frac{\Delta h}{L} \quad \text{Eq. 2.3}$$

Segundo Código Modelo fib (fib, 2010), o coeficiente de permeabilidade de um concreto endurecido também pode ser determinado em função da resistência média à compressão por meio da Equação 2.4.

$$K_w = K_{w0} \times \frac{1}{(f_{cm})^6} \quad \text{Eq. 2.4}$$

Onde:

K_w = coeficiente de permeabilidade (m/s);

f_{cm} = resistência média à compressão (MPa);

K_{w0} = constante $4 \times 10^{-3} m/s$

Quanto menor o coeficiente de permeabilidade de um material ou de uma amostra, mais durável este será, sendo considerado um dos fatores de grande influência na durabilidade de um material cimentício.

Chia e Zhang (2002) observaram que as partículas de agregados leves não apresentaram nenhum sinal de penetração de cloretos e concluíram que a qualidade da pasta é de fato, o principal fator na penetração de cloretos em concretos. E, ainda que, concretos leves e concretos normais com a mesma resistência quando comparados mostraram comportamento semelhante quanto a permeabilidade à água podendo, inclusive, o concreto leve apresentar melhor desempenho que o concreto normal.

2.4.2 Absorção capilar

A absorção capilar, também chamada de sucção capilar, é responsável pelo transporte de um líquido devido a tensão superficial que atua nas paredes dos poros e capilares do concreto. a penetração por meio de forças capilares é “o mais comum dos mecanismos de transporte” (HELENE, 1993). Em concretos completamente saturados não há absorção capilar, sendo preciso que os poros estejam secos ou parcialmente secos para que seja possível a absorção.

Segundo Helene (1993) a absorção capilar pode ser determinada pela Lei de Jurin, que fornece a taxa de ascensão da água nos capilares do concreto, considerando que o processo ocorrerá no estado estacionário e na ausência de evaporação.

2.4.3 Difusão

A difusão é o mecanismo de transporte predominante quando se analisa o ingresso dos íons cloreto no concreto. A teoria da difusão é baseada no modelo matemático proposto por Adolph Eugen Fick que, curiosamente, apesar de cursar medicina em Marburg, sempre teve um interesse especial pela matemática, física e química. Ele iniciou suas teorias em 1855 e por volta de 1970 suas Leis começaram a ser utilizadas para os estudos da difusão de cloretos em concretos (HILSDOF, 1995).

Em 1855, Fick foi o primeiro a descrever o fenômeno da difusão por meio de uma adaptação da equação empírica de condução de calor de Fourier. Segundo sua teoria, o transporte de cloretos pelo concreto, através de uma seção transversal unitária de material por unidade de tempo, é proporcional ao gradiente de concentração de cloretos, medido na direção normal à seção transversal (LIBERATI *et al.*, 2014).

Segundo Kropp *et al.* (1995), a difusão corresponde a uma transferência de massa por movimento aleatório de moléculas ou íons livres na solução de poros, resultando em uma rede de fluxo de regiões de maior concentração para regiões com menor concentração da substância difusora.

A taxa de transferência de massa através de uma unidade de área de uma determinada seção, é dada pela Equação 2.5.

$$F = \frac{dm}{dt} \frac{1}{A} \quad \text{Eq. 2.5}$$

Onde:

F = fluxo de massa (g/m²s);

m = massa da substância fluindo (g);

t = tempo (s);

A = área (m²).

O fluxo de massa F é proporcional ao gradiente de concentração dc/dx e ao coeficiente de difusão D (m²/s). Esta relação é conhecida como a primeira lei de Fick para a difusão e expressa segundo a Equação 2.6. Ela é utilizado nos casos onde se considera um fluxo estacionário. Quando predomina o regime de fluxo não-estacionário, deve-se aplicar a segunda lei de Fick.

$$F = -D \cdot \frac{dc}{dx} \quad \text{Eq. 2.6}$$

Onde:

D = coeficiente de difusão (m²/s);

c = concentração (g/m³);

x = distância (m).

Para os sólidos, o coeficiente de difusão D é uma propriedade característica do material e descreve a capacidade de transferência de uma determinada substância.

A NT Build 492 (1999) define a difusão como o movimento das moléculas ou íons sob a ação de um gradiente de concentração tanto no meio externo quanto interno do concreto ou mais estritamente sob a ação de um potencial químico de uma zona de elevada concentração para outra de baixa concentração. A difusão é complementada pela ação capilar, exceto em materiais saturados completamente.

Ensaio atribuem que a exposição prévia das amostras submersas a um vácuo, facilita a participação dos agregados no processo de difusão de cloretos através do concreto (OSBORNE, 1995 *apud* BOGAS e GOMES, 2015).

2.4.4 Migração

Segundo a NT Build 492 (1999), migração é definida como o movimento dos íons sob a ação de um campo elétrico externo. Este fenômeno pode gerar uma diferença de concentração em uma solução homogênea ou pode provocar um fluxo na direção do gradiente de concentração (KROPP *et. al*, 1995).

A equação de Nernst-Planck (EQUAÇÃO 2.7) fornece a lei geral de transferência de massa em eletrolitos, sendo composta por três termos:

Fluxo = difusão + migração + convecção

$$J = D \cdot \frac{dC}{dx} + \frac{ZF}{RT} \cdot DC \cdot \frac{dE}{dx} + CV_e \quad \text{Eq. 2.7}$$

Onde:

J = fluxo de massa (g/m²s);

D = coeficiente de difusão (m²/s);

C = concentração (g/m³);

x = distância (m);

Z = carga elétrica (C);

F = constante de Faraday (kg/m³);

R = constante dos gases (J/mol.K);

T = temperatura absoluta (K);

E = potencial elétrico (V);

V_e = velocidade da solução (m/s)

Assumindo um fluxo estacionário de íons e desde que não haja convecção destes devido ao movimento do eletrólito, a Equação 2.7 permite o cálculo do coeficiente de difusão D .

Segundo Kropp *et al.* (1995) uma aplicação direta desta equação ao concreto é difícil porque a solução presente em seus poros trabalha como um polieletrólito de alta força iônica. Ela, no entanto, pode ser aplicada se algumas simplificações forem consideradas.

2.4.5 Métodos para previsão de penetração de cloretos

Visto que o processo natural de penetração de cloretos é muito lento, os estudos em laboratórios comumente utilizam-se de métodos de ensaios acelerados onde a aplicação de corrente elétrica, por exemplo, auxilia no aumento de velocidade desse processo. Alguns testes utilizados levam bastante tempo para serem concluídos tornando-os pouco práticos para estudos científicos assim como para análise e acompanhamento de concretos, sendo assim desenvolvidos métodos acelerados (SALTA, 1997). A Tabela 2.3 sintetiza os principais métodos utilizados para a determinação dos coeficientes de difusão.

Tabela 2.3 - Métodos para determinação de penetração de cloretos

Mecanismo	Regime		Ensaio
Difusão	Não estacionário - Por imersão (2ª.Lei de Fick)	Acelerados	LNEC E 390 AASHTO T 259
	Estacionário - Células (1ª.Lei de Fick)	Células de difusão:	LNEC E 383
Migração	Não estacionário – rápidos de penetrabilidade de cloretos	Acelerados	AASTHO T 277 ASTM C1202:2012 NT Build 492:1999
	Estacionário	-	-

Como não existem no Brasil normas que padronizem esses métodos acelerados de penetração de cloretos têm-se utilizado métodos prescritos em normas estrangeiras.

2.5 Considerações normativas sobre ensaios de penetração de cloretos

Neste tópico pretende-se dar uma visão geral das principais normas referentes à penetração de cloretos.

2.5.1 AASHTO T 277 (2015)

Sendo a penetração de íons de cloretos no concreto um processo naturalmente lento, alguns ensaios foram desenvolvidos ao longo das últimas décadas de forma a acelerar tal processo e contribuir para os estudos de penetrabilidade de íons através de um composto cimentício. A norma AASHTO T 277 (2015) - *Standard Method of Test for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration* foi criada originalmente na década de 70 pela *Portland Cement Association*, introduzida nos EUA nos anos 80 e desenvolvida por Whiting (FERREIRA, 2000). Várias agências e organizações de normas técnicas adaptaram-na a partir de sua publicação original, sendo uma dessas adaptações feita pela *American Society for testing and Materials* consolidada na norma ASTM C 1202 (ASTM 2017), descrita no item 2.5.3.

Simplificadamente, o ensaio consiste em quantificar a carga passante pelo concreto, em Coulombs, após um período de 6 horas sob um potencial elétrico de 60 volts, fornecendo a movimentação de íons de cloretos e também de outros íons pelo material. Para a indústria da construção esse procedimento determina a maior e menor resistência de penetração de cloretos no concreto (ANDRADE, 1996).

2.5.2 AASHTO T 259 (2017)

A norma AASHTO T 259 (1980) - *Standard Method of Test for Resistance of Concrete Chloride Ion Penetration – Salt Ponding Test*, propõe um método de ensaio para se avaliar a

difusão dos íons cloreto no concreto no regime não estacionário. Apesar de seu longo tempo de realização (90 dias), ainda é tradicionalmente utilizada (VIVAS *et al.*, 2007).

Este teste necessita de três amostras cúbicas com dimensões (300 x 300 x 750) mm ou amostras conforme programa experimental respeitando uma espessura mínima de 75 mm e superfície de 300 mm. Alguns trabalhos adotam um prazo de cura úmida por tempo pré-estabelecido antes da imersão na solução com cloreto de sódio.

As amostras têm as faces laterais seladas deixando livres somente as faces superior e inferior e, então, a face superior é exposta a uma lâmina de 13 mm de solução a 3% de cloreto de sódio (NaCl) enquanto a face inferior é deixada exposta a ambiente de secagem por um período de 90 dias como mostrado na Figura 2.9.

Ao final deste prazo a peça de concreto é fatiada em pequenas amostras e medida a concentração de cloretos por meio colorimétrico, com a aspensão de nitrato de prata (AgNO_3) ou também por meio de um espectrômetro, para que seja traçado o perfil de cloretos da amostra estudada. A partir desse perfil a segunda Lei de Fick é aplicada para a determinação do coeficiente de difusão de cloretos.

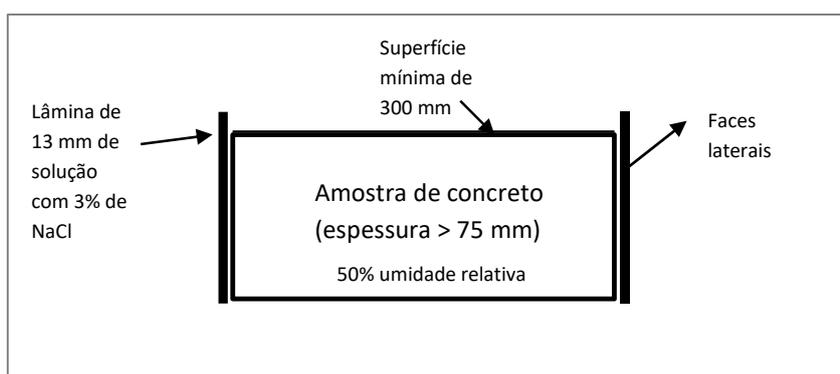


Figura 2.9 - Preparação para o ensaio conforme AASTHO T 259
Fonte: STANISH *et al.* (1997), p. 4.

2.5.3 ASTM C 1202 (2017)

A norma da ASTM C 1202 - *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration* é uma adaptação da AASHTO T 277, proposta

inicialmente por Whiting (1981) e com atualizações em 2007, 2010 e 2017. É um dos métodos mais utilizados em estudos científicos devido a sua simplicidade e rapidez.

Apesar de citado por algumas fontes como uma adaptação da AASTHO T 277, a ASTM C 1202 (ASTM 2017) considera que este ensaio segue as referências da AASTHO T 259 descrito no item 2.5.2.

A norma ASTM C1202 (2010) *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration* propõe um ensaio acelerado de resposta rápida para se avaliar a penetração de íons cloreto no interior do concreto. Segundo Helene (1993) a principal crítica ao ensaio refere-se à elevada diferença de potencial imposta, de 60 V. Em concretos de elevada resistividade a corrente no sistema pode elevar a temperatura do sistema exageradamente e distorcer os resultados, sendo necessário e conveniente monitorar a temperatura da solução, dentro das células.

Stanish *et al.* (1997) consideram que o nome deste ensaio não é correto pois o teste mede o movimento de íons de cloretos e de outros íons também e não somente a penetrabilidade dos cloretos, podendo assim distorcer o resultado do teste.

Esta norma estabelece basicamente no monitoramento da quantidade de corrente elétrica passante através da amostra durante um período pré-estabelecido. Os corpos de provas fabricados com dimensões de 100 mm de diâmetro e espessura de 51 mm, devem estar secos e com as laterais seladas. As amostras são colocadas em um dessecador com bomba à vácuo e mantidos assim por 3 horas, com pressão 6650 Pa (66,5 mbar). Com o vácuo ainda ligado, a câmara é preenchida com água até que as amostras fiquem totalmente cobertas. As amostras são então mantidas no vácuo por mais 1 hora. Após o término deste prazo a bomba é desligada e as mesmas são mantidas submersas em água por um período de (18 ± 2) horas.

Após retiradas da água as amostras são enxutas e mantidas em umidade relativa de 95% para o início do ensaio. As amostras são colocadas entre as meia-células, mostrada na Figura 2.10, onde a face superior fica em contato com solução 3% de cloreto de sódio (NaCl) e a face inferior em solução 0,3 N de hidróxido de sódio (NaOH). Uma diferença de potencial de (60 ± 1) volts é mantida durante período de 6 horas enquanto o monitoramento da corrente é feito em intervalos de 30 minutos.

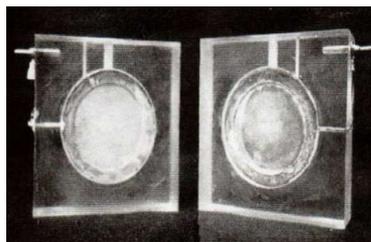


Figura 2.10 - Amostras nas meias-células
Fonte: ASTM C 1202 (2010), p. 3.

A Figura 2.11 (A) e (B) mostram o arranjo e montagem do ensaio de acordo com a norma ASTM C1202 (2017).

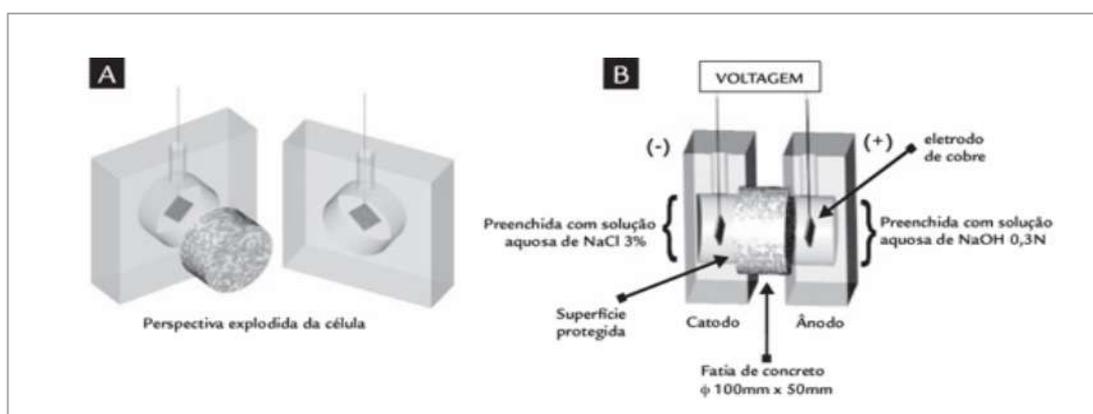


Figura 2.11 (A) e (B) - Arranjo experimental da célula de migração de íons cloreto
Fonte: MEDEIROS (2008).

Por meio da Equação 2.8, é determinada, em Coulombs (Q), o total de carga passante e a classificação da resistência do concreto quanto à penetrabilidade de cloreto.

$$Q = 900 (I_0 + 2 \cdot I_{30} + 2 \cdot I_{60} + \dots + 2 \cdot I_{330} + 2 \cdot I_{360}) \quad \text{Eq. 2.8}$$

Onde:

Q = total de carga passante (C)

I_0 = corrente medida imediatamente após a tensão aplicada (A)

I_t = corrente medida nos tempos pré-estabelecido ao longo do ensaio (A)

A Tabela 2.4 especifica as referências da relação entre a quantidade de carga passante e a caracterização do concreto quanto ao nível de penetrabilidade de íons de cloretos pelo concreto.

Tabela 2.4 - Penetrabilidade de íons de cloretos baseado na carga passante

Carga total passante (Coulombs)	Penetrabilidade de íons de cloretos pelo concreto
< 4000	Alta
2000 - 4000	Moderada
1000 - 2000	Baixa
100 - 1000	Muito baixa
< 100	Desprezível

Fonte: ASTM C1202 (2010), p. 2.

2.5.4 LNEC E 390 (1993)

A norma portuguesa do Laboratório Nacional de Engenharia Civil LNEC E 390 - *Betões - Determinação da resistência à penetração de cloretos - ensaio de imersão* se baseia no ensaio descrito pela AASTHO T 259 (2017).

2.5.5 NT BUILD 492 (1999) e LNEC 463 (2004)

A Nordtest Method - NT Build 492 (1999) - *Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments*, tem como objetivo a determinação do coeficiente de difusão de cloretos, por migração através de concretos, argamassas e materiais de repara a base de cimento, no qual é quantificado a resistência do material frente à penetração de cloretos no regime não estacionário. A norma portuguesa do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC E 463 - *Betão - Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário*, determina exatamente os mesmos procedimentos para a obtenção do coeficiente de difusão de cloretos da NT Build 492.

Sendo considerado um teste rápido e prático, foi baseado inicialmente na proposta de Tang e Nilsson (1992) que desenvolveram um ensaio para a determinação da profundidade de penetração de cloretos por meio de medição colorimétrica seguindo a hipótese de que o fluxo de íons é proporcional à sua força motriz. Parte dessa força é de origem química (concentração de soluções) e outra de origem elétrica. Os cálculos são baseados na segunda Lei de Fick (MENDES, 2009).

As amostras possuem 100 mm de diâmetro e (50 ± 2) mm de espessura, e são submetidas ao vácuo de modo semelhante ao estabelecido pela ASTM C 1202 (2010), com a diferença de que se utiliza uma solução de hidróxido de cálcio para imersão das amostras no interior da câmara de vácuo, ao invés de água.

Uma solução preparada com 10% em massa de cloreto de sódio (NaCl) dissolvido em água é utilizada como solução catódica e uma solução com 0,3 N de hidróxido de sódio (NaOH) é utilizada como solução anódica. Ao longo do ensaio é mantida uma diferença de potencial entre as duas faces das amostras. A intensidade tensão a ser aplicada é definida em função da corrente inicial medida, conforme mostrado na Tabela 2.5.

A disposição do arranjo para o ensaio é mostrada na Figura 2.12.

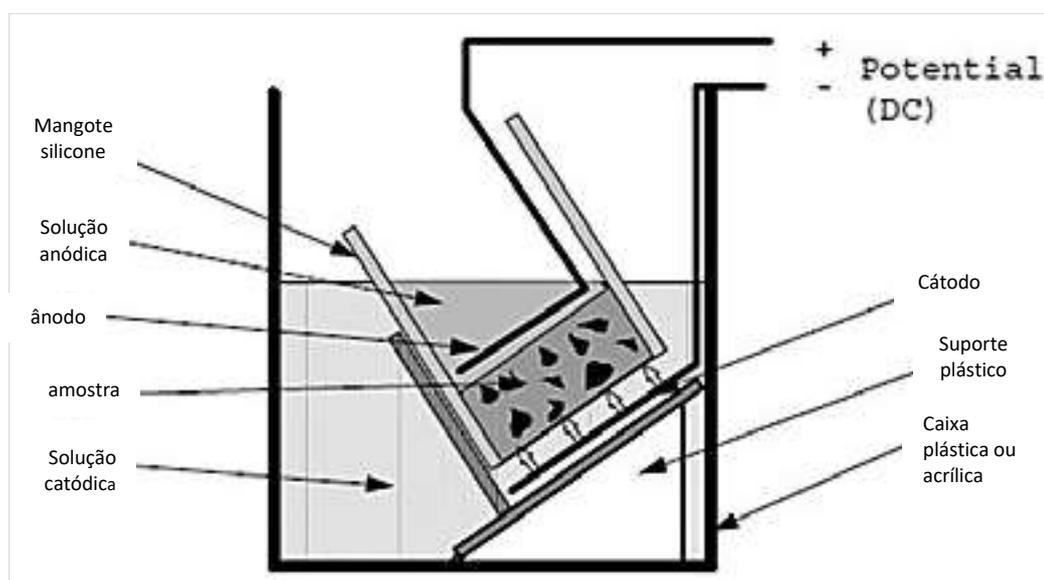


Figura 2.12 - Arranjo do ensaio
Fonte: NT Build 492 (1999), p. 5 (adaptado).

Tabela 2.5 - Voltagem e duração

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

Fonte: NT Build (1999), p. 8 (adaptado)

A partir da definição do período de duração do ensaio é feito o registro da temperatura inicial das soluções. Ao término do ensaio deve-se registrar a corrente e temperatura final para se concluir o procedimento.

O coeficiente de difusão é determinado pela Equação 2.9.

$$D_{nssm} = \frac{0.0239 \cdot (273 + T) \cdot L}{(U - 2) \cdot t} \cdot \left(X_d - 0.0238 \cdot \sqrt{\frac{(273 + T) \cdot L \cdot X_d}{U - 2}} \right) \quad \text{Eq. 2.9}$$

Onde:

D_{nssm} = coeficiente de difusão por meio da migração, em regime não estacionário ($\times 10^{-12}$ m²/s);

U = tensão aplicada (V);

T = valor médio das temperaturas (°C);

L = espessura corpo-de-prova (mm);

X_a = valor médio da profundidade de penetração (mm);

t = duração do ensaio (h).

O valor médio da profundidade de penetração dos íons cloreto nas amostras a ser utilizado na Equação 2.9 é obtida por meio de medições realizadas conforme mostrado pela Figura 2.13.

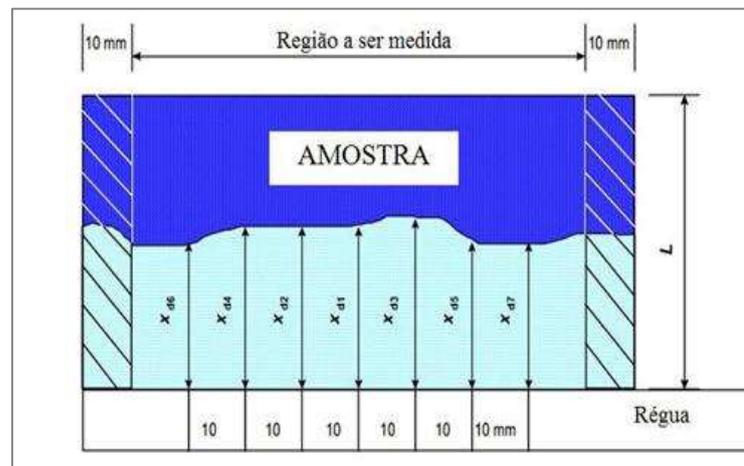


Figura 2.13 - Média das profundidades de penetração
Fonte: NT Build 492 (1999), p. 7.

A Tabela 2.6 apresenta alguns valores de referência para se avaliar a qualidade do concreto ensaiado em função do coeficiente de difusão de cloretos. Os valores apresentados foram obtidos a partir de ensaios de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento, na idade de 28 dias.

Tabela 2.6 - Avaliação da qualidade do concreto ensaiado em função do índice de difusão encontrado

$D_{28} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Resistência à penetração de cloretos
$D \geq 15$	Reduzida
$10 < D < 15$	Moderada
$5 \leq D \leq 10$	Elevada
$2,5 < D \leq 10$	Muito elevada
$D < 2,5$	Ultra elevada

Fonte: Nilsson *et al.* (1998) *apud* Gjörv (2014), p. 114. (adaptado)

2.5.6 ISO 1920 (2013)

A ISO 1920 - *Testing of concrete - Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion*, especifica procedimentos para a determinação de penetração de cloretos unidirecionalmente em estado não-estacionário. Os ensaios propostos buscam avaliar o potencial de misturas de concreto quanto à resistência ao ingresso de cloretos em diversas idades.

O ensaio é executado utilizando-se amostras cilíndricas ou cúbicas, produzidas conforme normatização adotada em cada trabalho e curadas por 28 dias. A amostra é fatiada em duas partes, sendo uma destinada a analisar a amostra na fase inicial de exposição aos cloretos (C_i) e outra para determinação da penetração de cloretos de forma unidirecional. As amostras são submetidas à vácuo e saturadas em água destilada. Posteriormente uma das faces é exposta uma solução de cloretos. O ensaio também pode ser feito sem a etapa do vácuo e esta alteração deverá ser citada na metodologia do ensaio.

A escolha em utilizar nesse trabalho o método prescrito pela NT Build 492 (1999) para a determinação do coeficiente de difusão de cloretos levou em consideração fatores como a confiabilidade do teste, a utilização do mesmo em grandes centros de pesquisa e em bons trabalhos da literatura recente e boa aplicabilidade do mesmo. O método normalmente utilizado, prescrito pela ASTM 1202 C (2017), também é considerado eficaz, porém, a dificuldade em vedação e o aquecimento das células foram fatores determinantes para a opção pelo método da NT Build 492 (1999).

2.6 Aditivos impermeabilizantes para compósitos cimentícios

Na busca por melhor qualidade e desempenho de cimentos, argamassas e concretos, os estudos científicos têm dado enfoque especial ao tema durabilidade e vida útil das estruturas. Entre os fatores que interferem em tais características sabe-se que os compósitos cimentícios, principalmente o concreto armado, têm sérios problemas relacionados à sua rede de poros responsável pelo ingresso de agentes agressivos ao próprio concreto e à armadura de reforço. Por isso, atualmente, há uma busca constante por materiais alternativos que reduzam, de alguma

forma, a permeabilidade e a vulnerabilidade do concreto, ou seja, que tornem o concreto mais resistente e “fechado” aos agentes que possam penetrá-lo.

Dentre os meios de se obter tais melhorias estão as alterações na mistura do concreto sejam elas com adições minerais durante a produção do cimento, na fabricação do concreto ou até mesmo após a aplicação do concreto utilizando-se sistemas de impermeabilizações especiais.

Atualmente, praticamente todas as misturas que contém cimento possuem algum tipo de adição mineral e/ou aditivo químico em sua composição com funções específicas para cada tipo de utilização. Entre os aditivos encontrados no mercado nacional e internacional estão os chamados “bloqueadores de poros” ou “redutores de permeabilidade”, definidos como aditivos químicos que consistem em uma mistura de cimento Portland, sílicas e outras substâncias químicas ativas que, ao reagirem com a umidade do concreto fresco e com os subprodutos da reação de hidratação do cimento, desencadeiam uma reação catalítica formando uma estrutura cristalina insolúvel nos poros e capilares do concreto tornando-se parte integrante do mesmo.

A *ACI - American Concrete Institute Committee - ACI 212.3 R (2016)* classifica diversos tipos de aditivos, suas características, efeitos e benefícios. No grupo dos aditivos impermeabilizantes estão os aditivos redutores de permeabilidade em condições não hidrostáticas (*PRAN - Permeability - reducing admixture: non-hydrostatic conditions*) e os aditivos redutores de permeabilidade em condições hidrostáticas (*PRAH - Permeability-reducing admixture: hydrostatic conditions*). No caso dos aditivos do tipo *PRAH* a redução da permeabilidade ocorre por meio da ação dos chamados cristalizantes a base de polímeros hidrofílicos cristalinos. Comercialmente são classificados como impermeabilizantes por cristalização capilar ou integral.

Segundo Cabral (2012), a formação cristalina desencadeada pelos aditivos redutores de permeabilidade impedem a penetração de água. Porém, o vapor d’água ainda consegue passar pelo material evitando assim a pressão do vapor dentro do concreto, permitindo que o mesmo “respire” mesmo com os cristais formados em sua rede de poros.

Tais aditivos fazem com que a permeabilidade seja reduzida gradativamente em função do tempo de exposição à água. Para uma análise correta dos resultados envolvendo aditivos

redutores de permeabilidade é exigido maior tempo para que todo o processo seja concluído. Caso haja, de alguma forma, a entrada posterior de água através de fissuras, por exemplo, os cristais que estavam estabilizados voltam crescer e o concreto continua sendo protegido.

“O tratamento químico cristalizante define-se como sendo um processo físico-químico que visa preencher as porosidades e capilaridades características da microestrutura do concreto, desencadeando processo catalítico de formação de cristais não solúveis e não tóxicos numa profundidade mínima de 50 mm na estrutura do concreto, de modo a garantir que não haja penetração de água por capilaridade” (TAKAGI, 2004).

A Figuras 2.14 (A) e (B) ilustram o esquema de formação de cristais com a utilização de aditivos redutores de permeabilidade.

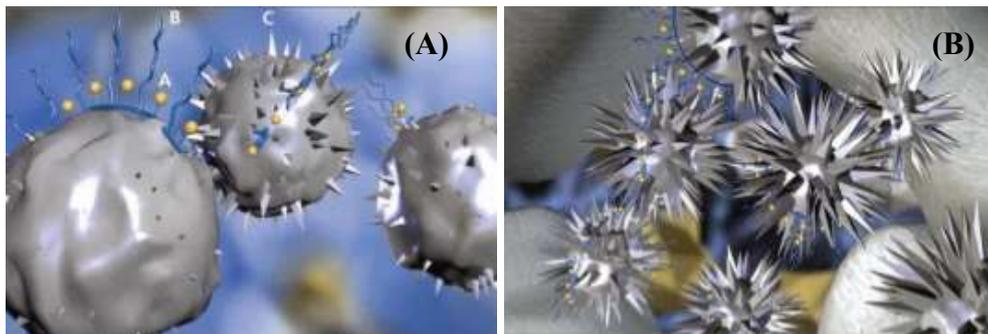


Figura 2.14 (A) e (B) - Formação de cristais com utilização dos aditivos

3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais e métodos utilizados no estudo, a definição dos parâmetros e procedimentos adotados nas caracterizações dos materiais constituintes do concreto, as variáveis analisadas e detalhamento de todos os métodos escolhidos para que os objetivos geral e específico fossem alcançados.

3.1 Materiais utilizados

Os traços dos concretos estudados foram produzidos com cimento Portland CPV ARI FÁCIL (aglomerante), areia natural lavada média (agregado miúdo), brita tipo 1 (agregado graúdo), água potável e dois tipos de aditivos redutores de permeabilidade. As especificações destes materiais são apresentadas a seguir.

3.1.1 Aglomerante

Foi escolhido o cimento Portland CPV ARI FÁCIL, com alta resistência inicial, pelo fato deste cimento apresentar o menor percentual de adições, dentre as opções existentes no mercado nacional. Desta forma, é pretendido minimizar os efeitos destas adições nos resultados.

As Tabelas 3.1 e 3.2 descrevem as propriedades químicas e físicas, respectivamente, do cimento utilizado e os limites estabelecidos pela NBR 5733 (ABNT, 1991).

Tabela 3.1 - Propriedades químicas do cimento CPV ARI FÁCIL utilizado

Determinações químicas	Norma utilizada	Cimento CPV ARI FÁCIL (%)	Limites NBR 5733 (% da massa)
Resíduo insolúvel (RI)	NBR NM 15	0,90	≤ 1
Perda ao fogo 1000°C (PF)	NBR NM 18	3,72	≤ 4,5
Perda ao fogo 500°C (PF)	IT Holcim	0,69	-
Óxido de magnésio (MgO)	NBR 14656:2001	0,75	≤ 6,5
Trióxido de enxofre (SO ₃)	NBR 14656:2001	2,83	≤ 4,5
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	NBR 14656:2001	4,99	-
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	NBR 14656:2001	3,23	-
Óxido de silício (SiO ₂)	NBR 14656:2001	19,08	-
Óxido de cálcio (CaO)	NBR 14656:2001	64,05	-
Óxido de potássio (K ₂ O)	NBR 14656:2001	0,74	-
C ₃ A (teórico)	Equação de Bogue	7,13	-
Anidrido carbônico (CO ₂)	NBR NM 20:2012	2,97	≤ 3,0

Fonte: Relatório de ensaios de cimento fornecido pela assessoria técnica Holcim Lafarge. Amostras datadas entre 19/04/17 a 13/05/17.

Tabela 3.2 - Propriedades físicas do cimento CPV ARI FÁCIL utilizado

Determinações químicas	Norma utilizada	Unidade	Cimento CPV ARI FÁCIL	Limites NBR 5733 (% da massa)
Finura - Blaine: área específica	NBR NM 16372:1998	cm ² /g	4828	≥ 3000
Início de pega	NBR NM 65:2003	Min	116	≥ 60
Fim de pega	NBR NM 65:2003	Min	173	≤ 600
#400	IT Holcim	%	2,1	-
Expansibilidade a quente	NBR NM 11582:2012	mm	-	-
Resistência 1 dia	NBR 7215:1996	MPa	29,9	≥ 14
Resistência 3 dias	NBR 7215:1996	MPa	42,4	≥ 24
Resistência 7 dias	NBR 7215:1996	MPa	47,3	≥ 34
Resistência 28	NBR 7215:1996	MPa	54,7	-

Fonte: Relatório de ensaios de cimento fornecido pela assessoria técnica Holcim Lafarge. Amostras datadas entre 19/04/17 a 13/05/17.

3.1.2 Agregado miúdo

Foi utilizada areia natural lavada média, procedente de areal da cidade de Cachoeira da Prata, Minas Gerais.

A caracterização do material é apresentada na Tabela 3.3, atendendo às normas NBR 7211 (ABNT 2009), NBR NM 52 (ABNT, 2009) e MB 3388 (ABNT, 1991), e sua curva granulométrica é apresentada na Figura 3.1.

Tabela 3.3 - Principais características analisadas do agregado miúdo

Característica - Unidade	Resultado
Massa específica real - g/cm^3	2,488
Densidade relativa máxima - g/cm^3	1,549
Densidade relativa solta - g/cm^3	1,305
Densidade relativa de campo - g/cm^3	1,480
Índice de vazios - g/cm^3	0,68
Compacidade relativa - %	74,9

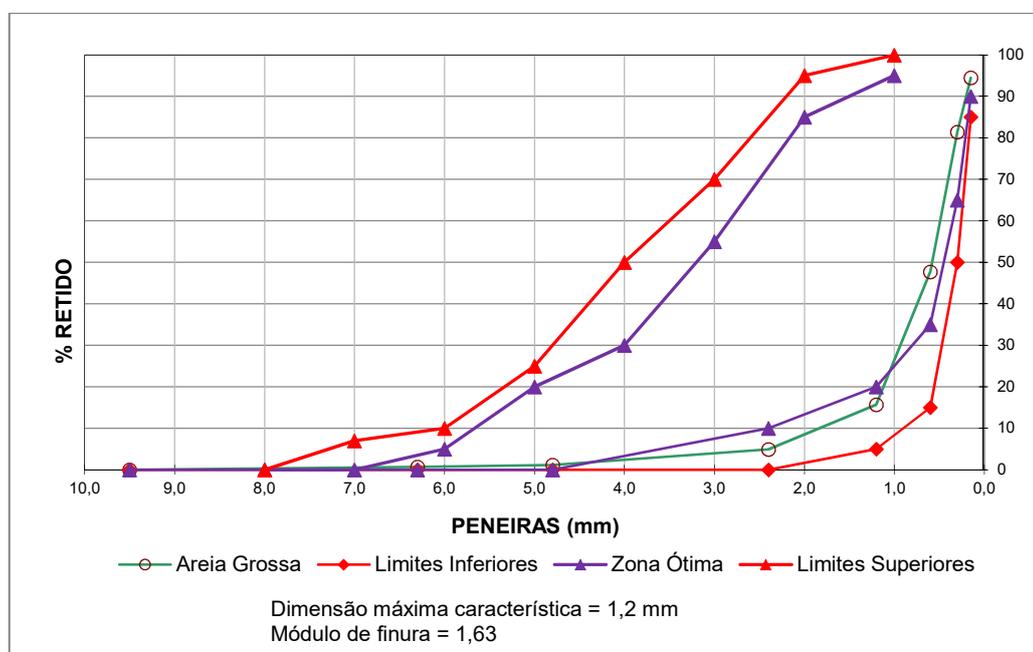


Figura 3.1 - Curva granulométrica agregado miúdo

3.1.3 Agregado graúdo

Foi utilizada a brita gnaisse tipo 1, gnaisse, extraída de jazida localizada na cidade de Pedro Leopoldo, Minas Gerais.

A caracterização do material é apresentada na Tabela 3.4, atendendo às normas NBR 7211 (ABNT, 2009), MB 3388 (ABNT, 1991), e sua curva granulométrica é apresentada na Figura 3.2.

Tabela 3.4 - Principais características analisadas do agregado graúdo

Característica - Unidade	Resultado
Massa específica do agregado seco - g/cm ³	2,760
Massa específica do agregado saturado superfície seca - g/cm ³	2,746
Massa específica aparente - g/cm ³	2,737
Absorção de água - %	0,30
Densidade relativa máxima - g/cm ³	1,614
Densidade relativa solta - g/cm ³	1,322
Densidade relativa de campo - g/cm ³	1,530
Índice de vazios - %	0,79
Compacidade relativa - g/cm ³	75,1

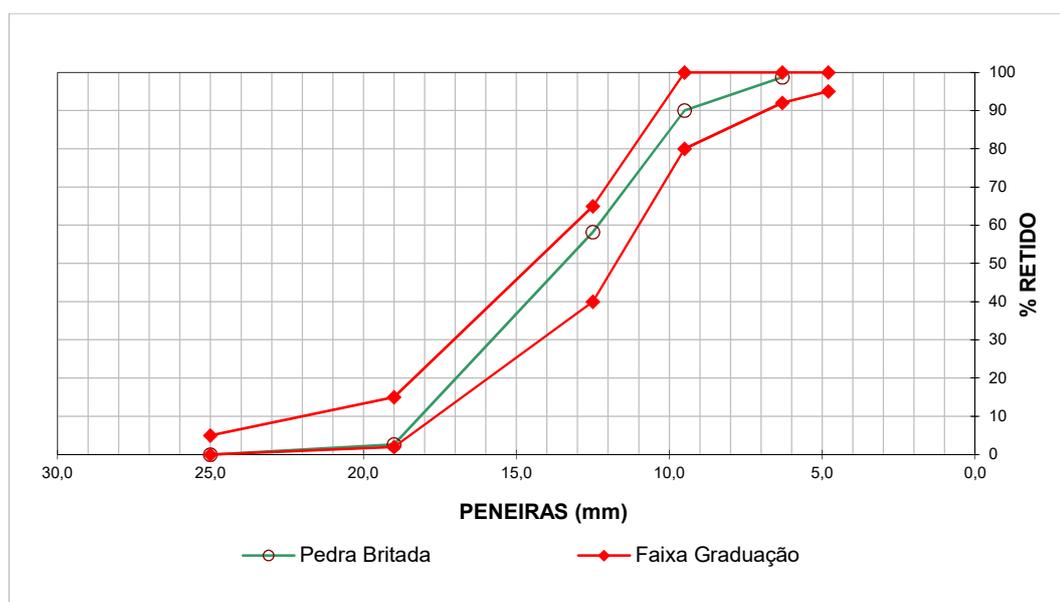


Figura 3.2 - Curva granulométrica agregado graúdo

3.1.4 Aditivo cristalizante

Foram utilizados dois aditivos, de fabricantes distintos, ambos destinados à redução de permeabilidade, por meio de cristalização e neste trabalho serão referenciados como Aditivo 1 e Aditivo 2.

As características físicas e químicas destes produtos, fornecidas pelo fabricante, estão relacionadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Propriedades físicas e químicas dos aditivos

Característica	Especificação ADITIVO 1	Especificação ADITIVO 2
Aspecto	Sólido em pó, cinza	Sólido em pó, cinza
pH	10 a 13 quando em solução	Não disponível
Massa específica aparente (g/cm ³)	-	1,10
Reatividade	Não disponível	Não disponível
Odor	Característico do cimento	Característico do cimento
Ponto de fusão	> 1000° C	Não disponível
Estabilidade química	Estável	Estável
Solubilidade	Em água	Parcialmente em água
Taxa de evaporação	Não aplicável	Não disponível
Ponto de ebulição inicial	Não aplicável	Não disponível
Ponto de congelamento	Não aplicável	Não disponível
Ponto de fulgor	Não aplicável	Não disponível

Fonte: Fichas de Informações de Segurança de Produtos Químicos dos aditivos fornecidos pelos fabricantes.

3.1.4.1 Composição química qualitativa

Para a caracterização química-mineralógica e física dos aditivos foram determinadas através de análise de fluorescência de raios-X em amostra pulverizada ($< 75 \mu\text{m}$), utilizando-se um espectrômetro Philips, modelo PW-2400. Os elementos, determinados qualitativamente, são apresentados a seguir.

Aditivo 1:

Elementos presentes em maior quantidade: Ca, O.

Elementos presentes em quantidades médias: Si, S, Al.

Elementos presentes em menores quantidades: C, Fe, Mg, Na, Sr.

Elementos presentes em quantidades muito pequenas (traços): P, Cl, K, Mn, Ti, Zn.

Aditivo 2:

Elementos presentes em maior quantidade: Ca, Si, O.

Elementos presentes em quantidades médias: S, Al, Mg.

Elementos presentes em menores quantidades: C, Fe, Na, K, Sr.

Elementos presentes em quantidades muito pequenas (traços): P, Cl, Zn, Zr, Mn, Ti, Cr, Cu.

3.1.4.2 Identificação qualitativa das fases cristalinas

Realizou-se uma análise de difração de raios-X em amostra pulverizada ($< 75 \mu\text{m}$), utilizando-se um difratômetro Philips, modelo PW 1830/40, no intuito de estimar a presença das fases cristalinas a partir da intensidade dos picos encontrados nos difratogramas obtidos.

As Figuras 3.3 e 3.4 apresentam, respectivamente, os difratogramas obtidos por meio da análise dos aditivos 1 e 2.

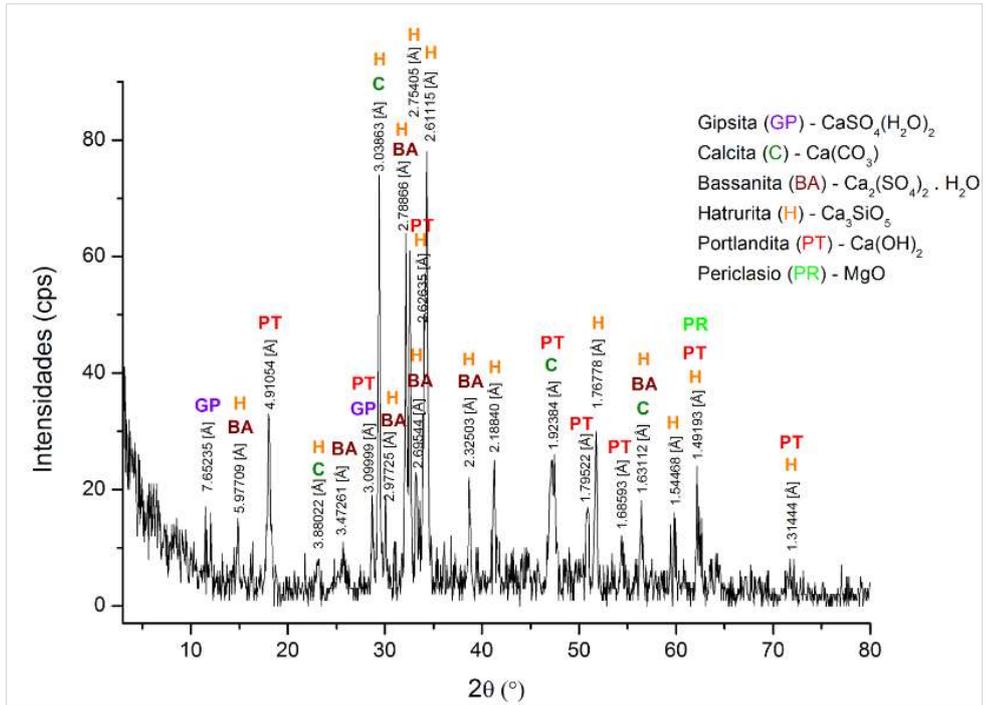


Figura 3.3 - Difratoograma da fração do aditivo 1 pelo método do pó em amostra total passante na peneira #200 (abertura de 75 μm)
 Fonte: CAMPOS, 2018, p. 61.

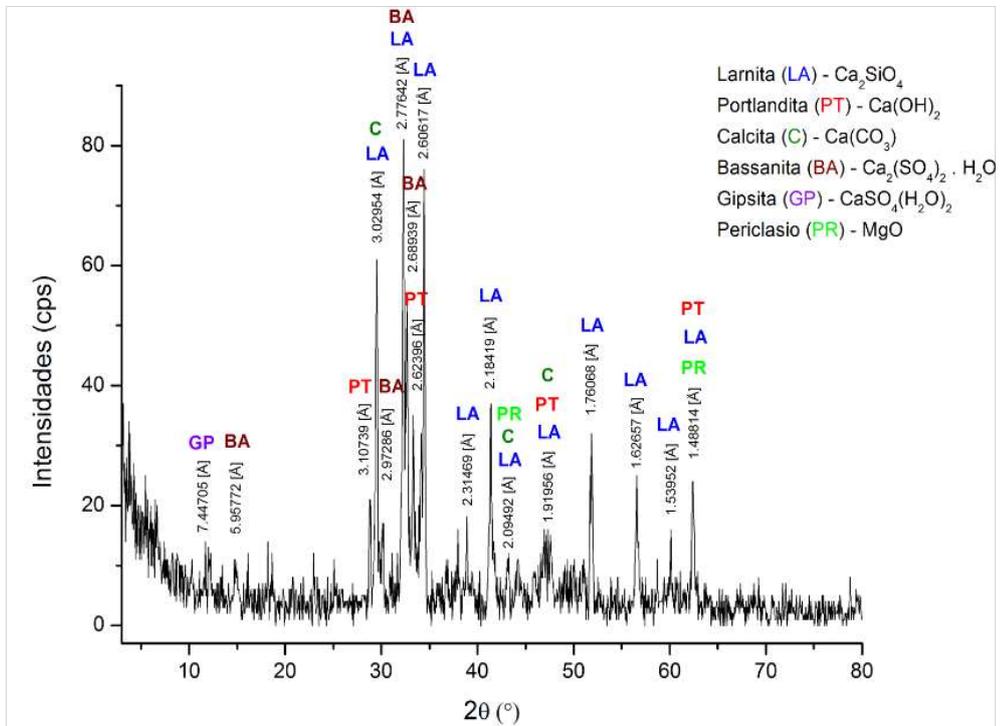


Figura 3.4 - Difratoograma da fração do aditivo 2 pelo método do pó em amostra total passante na peneira #200 (abertura de 75 μm)
 Fonte: CAMPOS, 2018, p. 61.

3.1.4.3 Área superficial específica

Realizou-se uma análise de ASE em amostra pulverizada ($< 75 \mu\text{m}$), utilizando um equipamento Quantachrome, modelo NovaWin, para determinar a área superficial específica dos aditivos em estudo. Os resultados apontaram uma área superficial específica de $1,795 \text{ m}^2/\text{g}$ para o aditivo 1 e de $1,867 \text{ m}^2/\text{g}$ para o aditivo 2.

3.1.4.4 Dimensão granulométrica

Realizou-se uma análise granulométrica a laser dos aditivos 1 e 2 utilizando o equipamento CILAS, modelo 1064 Líquido. Os gráficos obtidos a partir do ensaio podem ser visualizados nas Figuras 3.5 e 3.6.

A partir dos gráficos é possível observar que 50% do material passante apresenta dimensão superior a $5,31 \mu\text{m}$ (aditivo 1) e $6,08 \mu\text{m}$ (aditivo 2). Além disto, apenas uma parcela menor que 10% do material tem dimensões menores que $0,83 \mu\text{m}$ (aditivo 1) e $0,85 \mu\text{m}$ (aditivo 2).

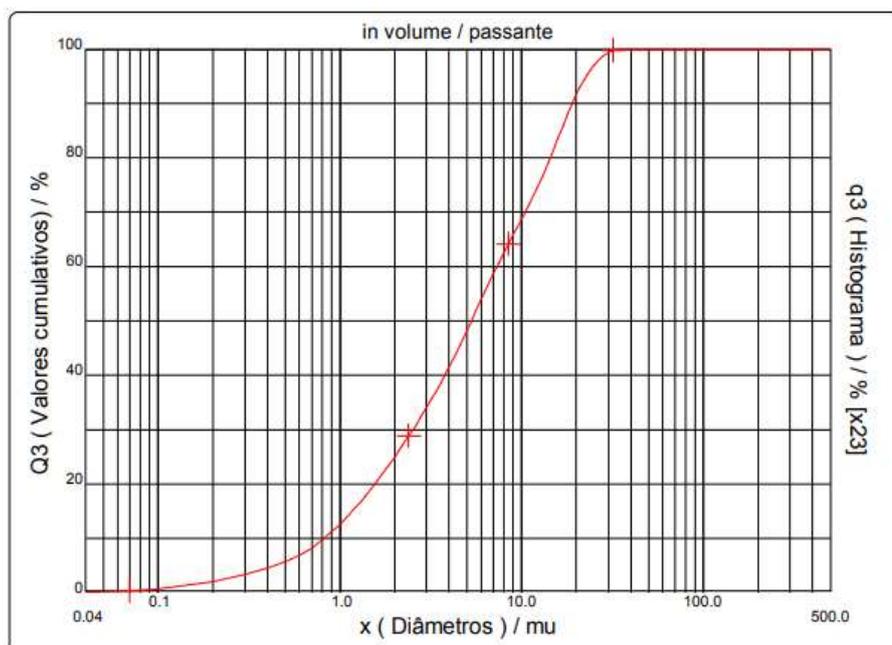


Figura 3.5 - Granulometria a laser do aditivo 1 ($d_{10\%} = 0,83 \mu\text{m}$; $d_{50\%} = 5,31 \mu\text{m}$; $d_{90\%} = 19,08 \mu\text{m}$)

Fonte: CAMPOS, 2018, p. 62.

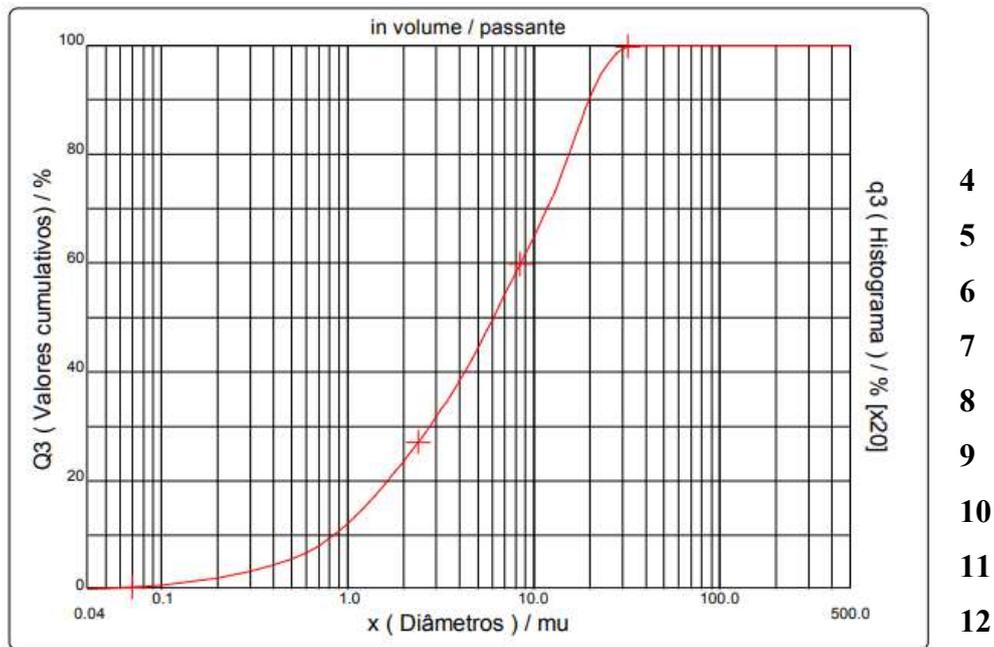


Figura 3.6 - Granulometria a laser do aditivo 2 ($d_{10\%} = 0,85 \mu\text{m}$; $d_{50\%} = 6,08 \mu\text{m}$; $d_{90\%} = 19,87 \mu\text{m}$)
 Fonte: CAMPOS, 2018, p. 63.

3.1.5 Água

Foi utilizada, na mistura do concreto, água potável em temperatura de $(25 \pm 2) ^\circ\text{C}$, conforme especificado na NBR 7215 (ABNT, 1996).

3.2 Plano experimental

Foi estabelecido o seguinte planejamento para execução dos experimentos:

- Ajuste do traço dos concretos a serem estudados;
- Fabricação dos concretos de referência (sem aditivo cristalizante) e concretos com aditivos;
- Ensaio de consistência dos concretos, por meio do abatimento do tronco de cone, conforme descrito pela NBR NM 67 (ABNT, 1998);
- Moldagem dos corpos de prova (CPs);
- Cura dos corpos de prova;
- Preparação CPs para realização dos ensaios;
- Realização dos ensaios nas idades propostas, sendo estes:

- Caracterização mecânica das amostras por ensaio de compressão axial, conforme NBR 5739 (ABNT, 2007);
- Caracterização mecânica das amostras à tração por compressão diametral, conforme NBR 7222 (ABNT, 2010);
- Ensaio para determinação do módulo estático, conforme NBR 8522 (ABNT, 2017);
- Ensaio de absorção de água, índices de vazios e massa específica do concreto endurecido, conforme NBR 9778 (ABNT, 2009);
- Ensaio de absorção de água por capilaridade baseado na NBR 9779 (ABNT, 2012);
- Ensaio de migração de cloretos por meio do método prescrito pela NT Build 492 (1999) e análise do material por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

3.2.1 Dosagem e fabricação dos concretos

Previamente à produção dos concretos, foi realizado estudos para ajuste dos traços. Na dosagem dos concretos, foram adotados os parâmetros estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014), para as classes de agressividade II e III de concretos armados, descritos nas Tabelas 2.1 e 2.2.

Para cada classe de agressividade proposta (C1 e C2), foram dosadas três composições de concreto, sendo: traço de referência (TR), traço com aditivo 1 (TA1) e traço com aditivo 2 (TA2). Desta forma, foram produzidos seis tipos de misturas, cujas nomenclaturas estão descritas na Tabela 3.8.

Na dosagem dos concretos, não foram utilizados aditivos plastificantes, de modo a se evitar interações químicas e físicas com os aditivos redutores de permeabilidade, analisados neste estudo. Foi definido que as medidas de abatimento de tronco de cone (*slump test*), conforme estabelecido pela NBR NM 67 (ABNT, 1998), deveriam estar entre os intervalos de (7 ± 2) cm e (10 ± 2) cm para as classes de agressividade III e II, respectivamente, mantendo-se a relação água/cimento estabelecida pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014), conforme mostrado na Tabela 3.6. A areia e brita utilizadas foram secas ao ar, sob abrigo, armazenadas em sacos em sacos plásticos e acondicionadas dentro de caixotes plásticos.

Tabela 3.6 - Denominação e nomenclatura das misturas

Nomenclatura da mistura	Relação água/aglomerante	Descrição da mistura
TRC2	0,60	Traço de referência Classe II
TA1C2	0,60	Traço com Aditivo 1 Classe II
TA2C2	0,60	Traço com Aditivo 2 Classe II
TRC3	0,55	Traço de referência Classe III
TA1C3	0,55	Traço com Aditivo 1 Classe III
TA2C3	0,55	Traço com Aditivo 2 Classe III

Para a produção dos concretos, foi utilizada a betoneira elétrica CSM, com capacidade de 130 litros, mostrada na Figura 3.3. Foi adotada a seguinte ordem de colocação de materiais na betoneira e execução:

- Agregado graúdo (brita);
- 80% da água total definida ou 100% da água total, quando sem aditivos;
- Execução de mistura durante 3 minutos;
- Aglomerante (cimento);
- Agregado miúdo (areia);
- Execução de mistura durante 3 minutos;
- Para os traços com aditivo, os mesmos foram misturados aos 20% restantes da água definida para cada mistura;
- Execução de mistura durante 3 minutos.

Após a finalização de cada mistura, foram realizadas as medições do *slump test*, conforme mostrado na Figura 3.4.



Figura 3.7 - Betoneira utilizada

Figura 3.8 - *Slump Test*

As composições dos traços estão descritas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Composição dos traços

TRAÇO	A/C	Cimento (kg/m ³)	Agregado miúdo (kg/m ³)	Agregado graúdo (kg/m ³)	Aditivo 1 % em massa de cimento	Aditivo 2 % em massa de cimento	Água (litros)
TRC2	0,60	368	683	1056	-	-	221
TA1C2	0,60	368	683	1056	1%	-	221
TA2C2	0,60	368	683	1056	-	0,8%	221
TRC3	0,55	409	713	975	-	-	225
TA1C3	0,55	409	713	975	1%	-	225
TA2C3	0,55	409	713	975	-	0,8%	225

Conforme orientações de ambos os fabricantes, o percentual de aditivo a ser utilizado seria de 1% da massa de cimento. Contudo, na dosagem utilizando o aditivo 2, foi observado um abatimento no *slump test* extremamente alto. Desta forma, sob orientação do setor técnico de seu fabricante, o percentual foi alterado para 0,8%, sendo atingido o abatimento pré-definido para este estudo.

3.2.2 Moldagem e cura dos corpos de prova

Neste estudo foram utilizados corpos de provas de concreto, cilíndricos, com diâmetro e altura nas dimensões de (150 x 300) mm, destinados ao ensaio de módulo de elasticidade estático, e (100 X 200) mm, para os demais ensaios. As quantidades de CPs utilizadas para cada ensaio estão relacionadas na Tabela 3.8. Para as moldagens dos CPs foram utilizadas fôrmas metálicas padronizadas.

Tabela 3.8 - Quantidade de CPs utilizados e respectivos ensaios

Traço	Compressão (100x200) mm	Tração (100x200) mm	Módulo de elasticidade (150 x 300) mm	Absorção, I.V. e m. específica (100x200) mm	Absorção capilaridade (100x200) mm	Migração NT 492 (100x200) mm
TRC2	09	03	03	02	06	03
TA1C2	09	03	03	02	06	03
TA2C2	09	03	03	02	06	03
TRC3	09	03	03	02	06	03
TA1C3	09	03	03	02	06	03
TA2C3	09	03	03	02	06	03
Por ensaio	54	18	18	12	36	18
Total	138 CPs (100 x 200) mm 18 CPs (150 x 300) mm					

A quantidade de materiais foi calculada para a produção de um volume de concreto capaz de preencher 138 moldes de (100 x 200) mm e 18 moldes de (150 x 300) mm, o que corresponde a um total de 0,32 m³, aproximadamente.

Após a moldagem, os CPs foram mantidos em temperatura ambiente por um período 24 horas, como mostrado na Figura 3.9. Então, foram desmoldados, identificados e submersos em tanque com água potável, como mostrado nas Figura 3.10 (I) e (II), permanecendo em processo de cura durante 28 dias, com exceção dos CPs destinados aos ensaios de compressão axial nas idades de 3 e 7 dias, sendo estes retirados da cura nas mesmas idades citadas.



Figura 3.9 - Moldagem dos CPs



Figura 3.10 - Identificação das amostras para:
I - Moldagem
II - Entrada no tanque de cura

Com base nos procedimentos estabelecidos pela NBR 7215 (ABNT, 1996) foi realizada a moldagem em ambiente com umidade relativa de $(65 \pm 2) \%$ e temperatura a $(26 \pm 1) ^\circ\text{C}$. Foi realizado o adensamento manual, com preenchimento das fôrmas em 2 camadas e com 12 golpes em cada uma delas.

3.2.3 Resistência à compressão axial

Os ensaios de compressão axial foram realizados nas idades de 3, 7 e 28 dias. Para cada idade, foram rompidos três CPs de traço estudado, sendo utilizada prensa eletro-hidráulica para 2000 kN, mostrada na Figura 3.7.

Os ensaios de compressão axial foram realizados nas idades de 3, 7 e 28 dias. Para cada idade, foram rompidos três CPs de cada traço estudado, sendo utilizada prensa eletro-hidráulica marca VIATEST VC 751 para 2000 kN, mostrada na Figura 3.11.

Os CPs foram retirados da cura submersa no momento da preparação para os ensaios. Estes foram retificados, conforme determinações da NBR 5739 (ABNT, 2007), antes da realização dos ensaios.



Figura 3.11 - Prensa utilizada para ensaios mecânicos

3.2.4 Tração por compressão diametral

Para os ensaios de tração por compressão diametral, os CPs foram retirados da cura submersa aos 28 dias e transferidos para câmara úmida, com umidade relativa acima de 95% e com temperatura entre 20°C e 25°C, por 72 horas.

Para cada traço estudado, foram ensaiados três CPs. O equipamento utilizado foi a prensa eletro-hidráulica marca VIATEST modelo VC 751/2000 kN (Figura 3.7) em conjunto com um aparato, mostrado na Figura 3.12, seguindo as diretrizes da NBR 7222 (ABNT, 2010).



Figura 3.12 - Aparato utilizado para ensaio de tração

3.2.5 Módulo de elasticidade estático

Para o ensaio de determinação do módulo de elasticidade foram utilizados CPs com dimensões de (150 x 300) mm que foram retirados da cura submersa aos 28 dias, secos ao ar por 48 horas e então colocados no compressômetro de bases independentes e levados à prensa eletro-hidráulica marca VIATEST modelo VC 751/ 2000 kN como mostrado na Figuras 3.13 e 3.14.



Figura 3.13 - CP no compressômetro



Figura 3.14 - Conjunto posicionado na prensa

Para a determinação do módulo de elasticidade foi utilizado o método estático, conforme procedimentos da NBR 8522 (ABNT, 2017) tendo suas principais parâmetros utilizados listados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Parâmetros de ensaio para determinação do módulo de elasticidade

Característica	Especificação
Idade (em dias)	30
Tipo de cura	Saturada
Método de ensaio	Estático - Tensão σ_a (0,5 MPa)
Características dos CPs	(150 x 300) mm
Medidores	Mecânicos (2 unidades)
Altura da base de medida - mm	150 mm
Capecamento	Retificado
Número de amostras	03

3.2.6 Absorção de água por capilaridade

Para a execução do ensaio de absorção de água por capilaridade, foram seguidas as determinações da NBR 9779 (ABNT, 2012), que consiste em quantificar a capacidade do concreto em absorver água devido à ascensão capilar.

Seis CPs de cada traço foram retirados da cura submersa aos 28 dias, procedendo-se a secagem em estufa pelo período de 96 horas e, após seu resfriamento em temperatura ambiente, foram obtidos os valores de massa seca. Os CPs, então, foram colocados em contato com uma lâmina d'água de (5 ± 1) mm acima de sua face inferior, e realizadas pesagens após os períodos de 6, 24, 48 e 72 horas, contados a partir do primeiro contato dos CPs com a lâmina d'água. A espessura da lâmina d'água foi mantida durante todo o ensaio, completando-se a água, sempre que necessário. As Figuras 3.15 (I) e (II) mostram a execução do ensaio e a Figura 3.16 mostra detalhe da marcação da lâmina d'água de 5 mm.

O valor da absorção por capilaridade (C), expresso em g/cm^2 , foi calculado para cada amostra por meio da razão entre a diferença da massa saturada (M_{sat})¹ pela massa seca (M_s) e área da seção transversal da amostra (S), conforme mostrado na Equação 3.1. Os valores de massa foram expressos em gramas (g) e área da seção transversal, em centímetros quadrados (cm^2). As amostras não foram partidas como sugere a norma.

¹ Massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado.

$$C = \frac{Msat - Ms}{S} \quad \text{Eq. 3.1}$$



Figura 3.15 - Ensaio de capilaridade:
 I - CPs em lâmina d'água.
 II - Manutenção da lâmina d'água



Figura 3.16 - Detalhe da lâmina d'água

3.2.7 Absorção, índice de vazios e massa específica

A determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica das amostras foram obtidas por meio dos ensaios prescritos pela NBR 9778 (ABNT, 2009).

Dois CPs de cada traço foram retirados da cura submersa com a idade de 28 dias, submetidos à secagem em estufa, com temperatura de $(105 \pm 2) ^\circ\text{C}$ pelo período de 96 horas, e, em seguida, pesados, obtendo-se os valores de massa seca (M_s).

Após a pesagem, os CPs foram saturados em água à temperatura de (23 ± 2) °C, por meio de submersão, pelo período de 72 horas. Completada esta etapa, foram levados à ebulição por um período de 5 horas. Durante o processo de fervura, a água foi complementada, sempre que necessário, de modo a manter os CPs sempre submersos. Transcorrido o tempo de fervura, após o resfriamento da água na temperatura de (23 ± 2) °C, foi obtida a massa imersa dos CPs (M_i) com o auxílio de uma balança hidrostática. Então, as amostras foram retiradas da água, secas com pano úmido e registrada sua massa na condição saturada superfície seca (M_{sat}).

O percentual de absorção (A) foi calculado pela razão entre a diferença da massa saturada superfície seca (M_{sat}) pela massa seca (M_s) e valor da massa seca do CP, conforme Equação 3.2. Os valores de massa são expressos em gramas (g).

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad \text{Eq. 3.2}$$

O percentual de índices de vazios (I_v) foi calculado pela razão entre as diferenças da massa saturada superfície seca (M_{sat}) pela massa seca (M_s) e diferença entre a massa saturada superfície seca (M_{sat}) e massa imersa (M_i), conforme Equação 3.3. Os valores de massa são expressos em gramas (g).

$$I_v = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad \text{Eq. 3.3}$$

Para o cálculo da massa específica real (ρ_r), foi utilizada a Equação 3.4:

$$\rho_r = \frac{M_s}{M_s - M_i} \quad \text{Eq. 3.4}$$

3.2.8 Penetração de íons cloreto

Para a execução do ensaio de penetração de cloretos, foram seguidas as determinações da norma NT Build 492 (1999).

Após a cura submersa por 28 dias, os três CPs de cada traço foram retirados do tanque e realizadas as marcações dos pontos de corte, sendo cada CP dividido em 4 partes de (50 ± 2) mm de espessura e 100 mm de diâmetro. Feitos os cortes com serra circular, as fatias provenientes do topo e base foram descartadas, e as duas fatias restantes, foram limpas com água corrente e com o auxílio de escovas de aço e de cerdas, identificadas e marcadas, conforme as posições da sua moldagem. A Figura 3.17 mostra o esquema de corte das amostras e a Figura 3.18 (I e II) apresenta uma amostra preparada para o ensaio.

Desta forma, para cada corpo de prova, foram geradas duas amostras, totalizando 6 amostras por traço a serem ensaiadas.

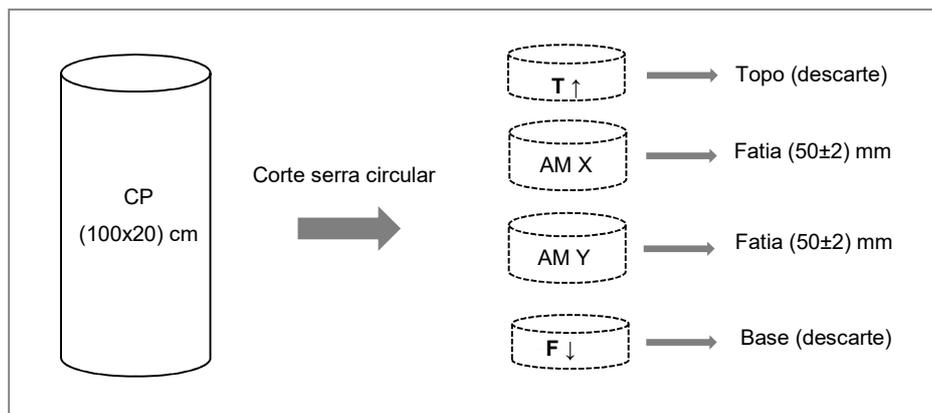


Figura 3.17 - Esquema para corte das amostras para ensaio NT Build 492 (1999).



Figura 3.18 - Amostra preparadas para ensaio:

- I - Identificação da amostra
- II - Face de corte

As amostras foram posicionadas em uma câmara de vácuo e submetidas a vácuo seco durante 3 horas, a uma pressão menor que 50 mBar, como mostrado na Figura 3.19 (I). Ainda em vácuo,

as amostras foram saturadas, por submersão, em solução preparada com 10 litros de água potável e 20 gramas do reagente hidróxido de cálcio equivalente a uma concentração $C \approx 2 \text{ g.L}^{-1}$ com reagente hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) diluído em água potável, permanecendo nesta condição por (18 ± 2) horas, conforme mostrado na Figura 3.19 (II). Após esta etapa, as amostras foram retiradas da câmara de vácuo, lavadas em água corrente e jateadas com ar comprimido, para desobstrução dos poros superficiais.

A Figura 3.20 mostra os equipamentos utilizados para o processo de vácuo. O conjunto é formado por uma câmara de vácuo, bomba de vácuo EDWARDS com potência de 240 W, vácuo máximo de 0,020 mbar com pressão máxima de 200 mbar e ainda, a armadilha gelada CentriVap/ColdTrap que possui função de proteger a bomba de vácuo da umidade.



Figuras 3.19 - Amostras na câmara de vácuo
I - Vácuo seco
II - Vácuo saturado em solução de Ca(OH)_2



Figura 3.20 - Conjunto de vácuo: câmara de vácuo, ColdTrap e bomba de vácuo

Após a etapa de limpeza das amostras, estas foram impermeabilizadas, em toda sua face lateral, com graxa de silicone e acondicionadas em “camisas” de silicone, com fixação por meio de duas abraçadeiras para cada conjunto, conforme mostrado na Figuras 3.21 (I e II). A estanqueidade dos conjuntos (amostra + camisa de silicone + fixação por abraçadeiras) foi testada com água antes do início da próxima etapa como mostrado na Figura 3.22.



Figuras 3.17 - Montagem das amostras nas camisas de silicone
 I - Camisa de silicone com abraçadeira
 II - Corpos de prova acondicionados e fixados na camisa de silicone



Figura 3.22 - Teste de estanqueidade do conjunto

Para a próxima etapa do ensaio, foram preparadas duas soluções, sendo uma anódica e outra catódica. Para a solução catódica, misturou-se 2.234 gramas de cloreto de sódio (NaCl) a 20 litros de água potável e para solução anódica, a mistura foi de 24 gramas de hidróxido de sódio (NaOH) em 2 litros de água potável, equivalentes às concentrações de $C \approx 111,7 \text{ g.L}^{-1}$ com reagente cloreto de sódio (NaCl) diluído em água potável e para solução anódica a concentração equivalente é de $C \approx 12 \text{ g.L}^{-1}$ do reagente hidróxido de sódio (NaOH) também diluído em água potável.

A solução catódica foi despejada em um recipiente plástico, e os conjuntos foram posicionados na caixa, com o auxílio de um aparato, de modo a ficarem inclinados e com a face inferior das amostras das amostras em contato com esta solução. Então, as camisas de silicone foram preenchidas parcialmente com a solução anódica, ficando esta solução em contato com a face superior das amostras, tomando-se o devido cuidado para não haver qualquer respingo de uma solução em outra, conforme mostrado na Figura 3.23.

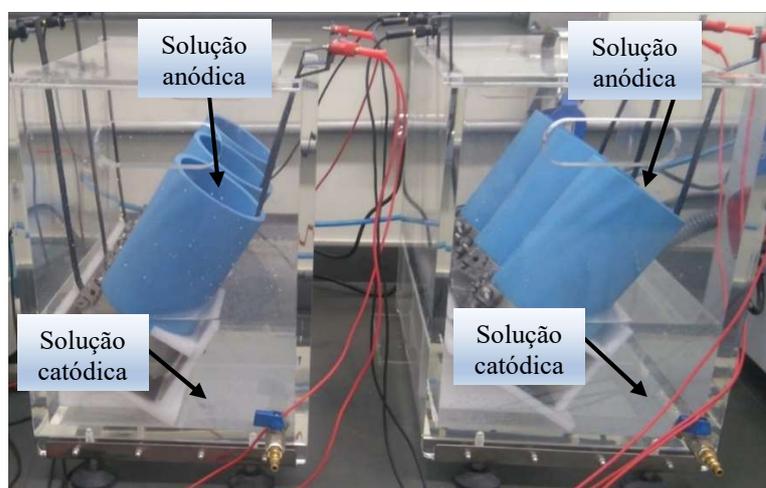


Figura 3.23 - Montagem dos conjuntos dentro das caixas com soluções anódicas e catódicas

Foram posicionados eletrodos interligando as amostras a uma caixa de comutação que, por sua vez, foi ligada a uma fonte de energia, destinada a gerar a voltagem necessária para a realização do ensaio, conforme mostrado na Figura 3.24. Para a leitura das correntes (âmpères) e tensão (volts), conectou-se dois multímetros à caixa de comutação sendo, um como amperímetro marca Fluke modelo 289 TRUE RMS e outro, na função de voltímetro, marca Fluke modelo 117 TRUE RMS . A caixa de comutação permite alternar as leituras entre as seis amostras.

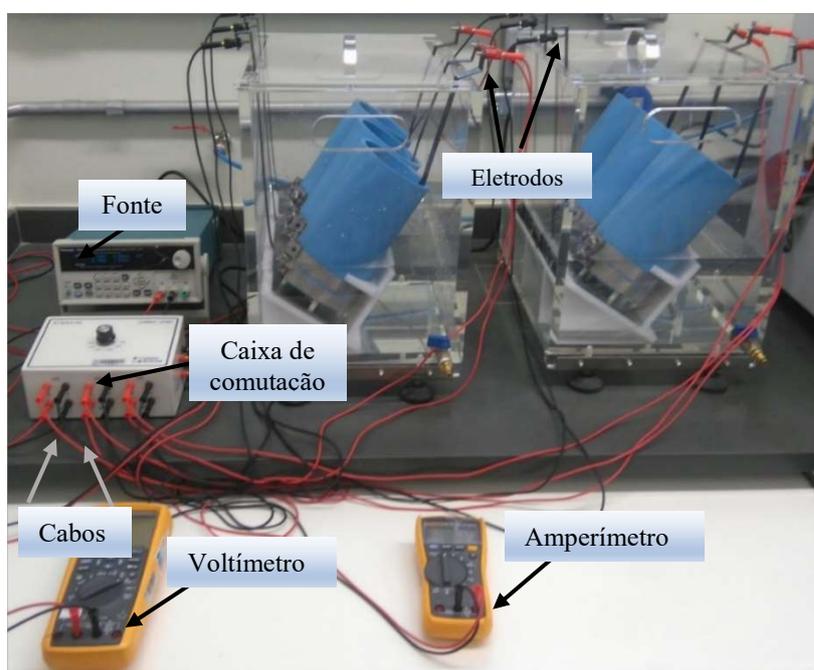


Figura 3.24 - Montagem completa Conjunto do ensaio de migração de cloretos

No primeiro momento, é aplicada uma voltagem de 30 V e feita as leituras das correntes geradas por cada amostra. A partir dos valores de corrente gerados, obteve-se o valor de tensão a ser utilizado no ensaio, conforme Tabela 2.5 da NT Build 492 (1999). Para as amostras estudadas, os valores de corrente inicial (I_{30V}) se apresentaram no intervalo de $90 \leq I_0 \leq 120$ (mA), desta forma, pela referida tabela, a diferença de potencial (após ajuste) foi de 20 V.

Uma tensão de 20 V foi aplicada às amostras, sendo realizadas novas leituras de corrente para verificar se os valores de “Nova corrente inicial admissível”, foram compatíveis com os apresentados na tabela, ou seja, encontram-se no intervalo de $60 \leq I_0 \leq 80$ (mA). Desta forma, foram definidos os parâmetros de ensaio, sendo a sua duração de 24 horas.

Concluído o tempo de ensaio foram realizadas as medidas finais de corrente e verificada a temperatura das amostras, utilizando termômetro digital marca Testo, modelo 735. As amostras, então, foram retiradas das camisas de silicone, lavadas em água corrente, secas superficialmente com toalhas de papel e seccionadas, diametralmente, com o auxílio de uma prensa marca EMIC/2000 kN, conforme demonstrado na Figura 3.25.



Figura 3.25 - Amostras antes (I), durante (II) e depois (III) do seccionamento diametral

Na face de ruptura das amostras, foi aspergida uma solução composta por 1,70 gramas de nitrato de prata (AgNO_3) para 100 mililitros de água potável, equivalente à concentração $C \approx 17 \text{ g.L}^{-1}$ com reagente nitrato de prata (AgNO_3) diluído em água potável. Após 3 minutos aproximadamente da aplicação, foram feitas as medições da penetração dos íons cloreto, evidenciada pela aparência esbranquiçada que a solução promove ao reagir com estes íons. Foram tomadas as medidas em 7 pontos de cada amostra, para cálculo da profundidade média. As Figuras 3.26 (I e II) e 3.27 mostram alguns detalhes da execução desta etapa.



Figura 3.26 - Amostras:

I - Logo após ao seccionamento

II - Após a aplicação do nitrato de prata



Figuras 3.27 - Marcações para medição das profundidades de penetração dos íons cloreto

A partir dos valores médio de profundidade de penetração, os coeficientes de migração no estado não estacionário (D_{nssm}) foram calculados utilizando-se a Equação 2.9.

3.2.9 Ensaio no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Após os ensaios de penetração de íons cloreto, apenas para o traço da classe de agressividade III, foram retiradas amostras para análise por meio de microscópio eletrônico de varredura (MEV), utilizando um microscópio modelo FEI Quanta 3D FEG, de elétrons secundários, tensão 20 kV, Spot 4,5 e distância de trabalho de 10mm. As leituras foram realizadas no Centro de Microscopia da UFMG.

As amostras foram extraídas de uma das metades (seccionadas diametralmente), após o procedimento de aspersão de nitrato de prata. Estas foram cortadas com auxílio de máquina de corte a base de água da marca AROTEC modelo COR 250 (FIGURA 3.28), com medidas aproximadas de (25 x 30) mm e retificadas pelo mesmo equipamento, conforme mostrado na Figura 3.29. Para a leitura com o MEV, as amostras foram limpas e cobertas com 20 nanômetros de carbono.



Figura 3.28 - Máquina de corte



Figura 3.29 - Amostras cortadas e retificadas para ensaio do MEV e detalhe da amostra

4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados oriundos dos ensaios especificados no capítulo 3, bem como suas análises.

São comparados o desempenho dos traços, com e sem aditivos redutores de permeabilidade, produzidos conforme características das Classes de Agressividade II e III estabelecidas na NBR 6118 (ABNT, 2014).

Para as análises das propriedades mecânicas dos concretos produzidos, foram utilizados os resultados obtidos dos ensaios de resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. A absorção, o índice de vazios, a absorção por capilaridade e a resistência à penetração de cloretos, por meio de ensaio acelerado no estado não estacionário, avaliaram os concretos frente aos mecanismos de transporte de massa e penetração de substâncias pela mistura endurecida.

Os ensaios foram realizados em CPs com dimensões de (150 x 300) mm para a determinação de módulo de elasticidade e em CPs com dimensões de (100 x 200) mm para todos os outros ensaios no estado endurecido.

4.1 Abatimento de tronco de cone

Como descrito no item 3.2.1 do Capítulo 3, foram realizados ensaios de consistência pelo abatimento do tronco de cone, conforme estabelecido pela NBR NM 67 (ABNT, 1998), medidos e verificados para cada mistura em seu estado fresco, antes da moldagem dos CPs, como mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios de consistência pelo abatimento de tronco de cone

Traço	Relação Água/Aglomerante	Abatimento de cone
TRC2	0,60	9,0 ± 0,5 cm
TA1C2	0,60	10,0 ± 0,5 cm
TA2C2	0,60	11,0 ± 0,5 cm
TRC3	0,55	7,5 ± 0,5 cm
TA1C3	0,55	8,0 ± 0,5 cm
TA2C3	0,55	7,5 ± 0,5 cm

Observa-se que todos os traços apresentaram consistência dentro dos limites estabelecidos para este trabalho.

4.2 Resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade

Para a caracterização e análise do comportamento mecânico dos concretos no estado endurecido foram feitos ensaios para determinação da resistência à compressão axial, conforme prescrito na NBR 5739 (ABNT, 2007), e para a resistência à tração por compressão diametral, conforme prescrito na NBR 7222 (ABNT, 2010). Além de confirmar a classe de resistência do concreto, os ensaios mecânicos tiveram o objetivo de verificar a influência dos aditivos cristalizantes nas propriedades analisadas.

Os resultados apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3 equivalem à média das medidas encontradas nos ensaios de compressão axial, realizados nas idades de 3, 7 e 28 dias, e nos ensaios de tração por compressão diametral realizados aos 28 dias.

Tabela 4.2 - Resistência média à compressão dos CPs (100 x 200) mm

Traço	f_c - 3 dias (MPa)	f_c - 7 dias (MPa)	f_c - 28 dias (MPa)
TRC2	19,8 ± 0,2	22,6 ± 0,6	38,2 ± 0,6
TA1C2	25,9 ± 0,8	32 ± 1	37,1 ± 0,5
TA2C2	25 ± 2	32 ± 1	35,8 ± 0,7
TRC3	29 ± 1	33 ± 2	40 ± 2
TA1C3	32,9 ± 0,9	34 ± 1	43 ± 2
TA2C3	31 ± 2	36,2 ± 0,9	42 ± 1

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam gráficos com os resultados de resistência à compressão dos CPs, por classe de resistência. A lista com a numeração completa de todos os CPs moldados e seus respectivos ensaios estão na Tabela A1 do Apêndice A.

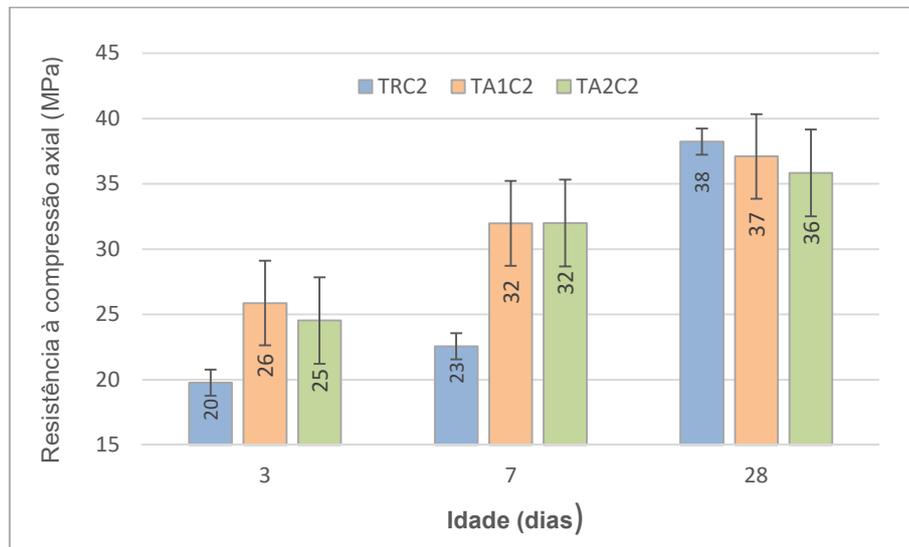


Figura 4.1 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão - Classe II

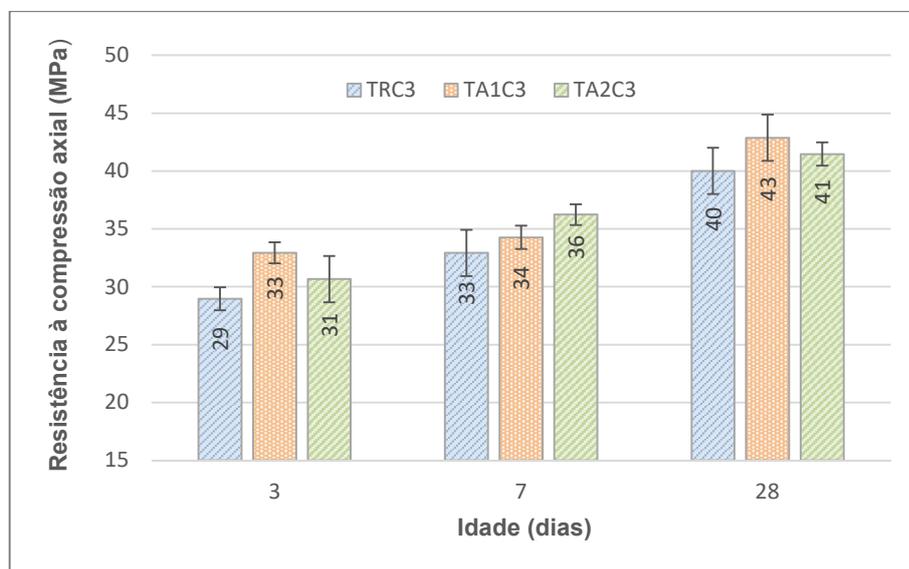


Figura 4.2 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão - Classe III

Analisando de forma individual o desempenho das misturas da classe de agressividade II, o concreto de referência (TRC2) apresentou resistência média à compressão 23% menor nas idades de 3 e 7 dias quando comparados aos concretos com aditivos (TA1C2 e TA2C2).

Já a resistência aos 28 dias do concreto de referência, considerando os desvios obtidos, com relação à mistura com aditivo 1 (TA1C2) e em 3% com relação ao concreto com aditivo 2 (TA2C2), sugerindo que os aditivos promovem uma melhora no desempenho nesta classe apenas nas primeiras idades dos concretos.

Nos concretos pertencentes à classe de agressividade III os melhores desempenhos foram observados nos concretos produzidos com os aditivos sem, no entanto, demonstrar um ganho tão significativo nas primeiras idades, como os encontrados na classe de agressividade II.

Aos 3 dias, o concreto com aditivo 1 (TA1C3) obteve resistência 13% superior em relação ao concreto de referência (TRC3), enquanto o concreto com aditivo 2 (TA2C3) apresentou resultado 7% maior.

Na idade de 7 dias, verificou-se que o melhor desempenho ocorreu no concreto produzido com o aditivo 2 (TA2C3), apresentando uma resistência 10% superior, quando comparado ao concreto de referência (TRC3). Já o concreto com aditivo 1 (TA1C3) obteve resistência igual que o concreto de referência (TRC3).

A Figura 4.3 mostra as resistências médias à compressão de todas as misturas. De um modo geral, o efeito do uso dos aditivos, quando se analisa esta propriedade específica dos concretos ensaiados, se faz mais presente nas primeiras idades, não trazendo ganhos representativos aos 28 dias.

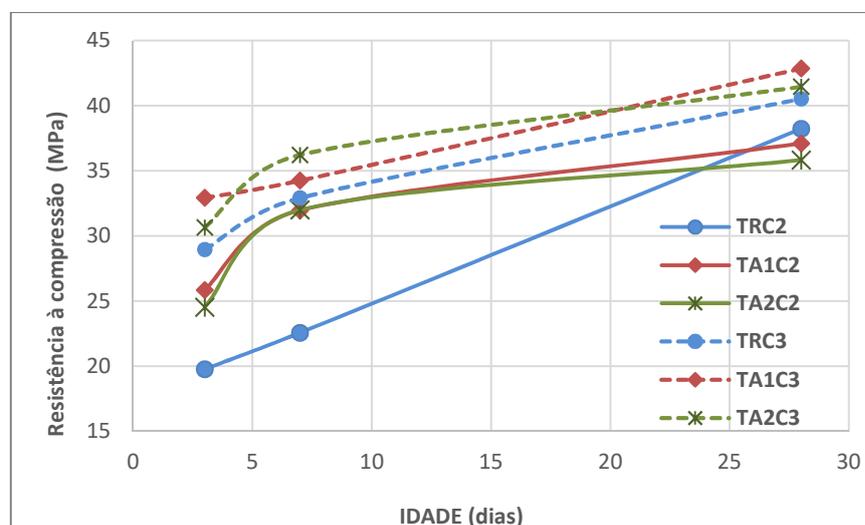


Figura 4.3 - Comparativo entre todas as misturas: resistência à compressão

O comportamento geral dos concretos seguiu em conformidade à Lei de Abrams (TUTIKIAN, 2011) uma vez que o aumento da relação a/c reduziu sua resistência à compressão axial. Os concretos produzidos segundo os critérios estabelecido para a classe de agressividade II ($a/c = 0,60$) apresentaram resultados consideravelmente inferiores aos da classe III ($a/c = 0,55$). Segundo Metha e Monteiro (1994) isto pode ser explicado como uma consequência natural do progressivo enfraquecimento da pasta de cimento hidratada devido ao crescimento da porosidade gerada pelo aumento da relação a/c.

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, também conhecido como ensaio de tração indireta, são apresentados na Tabela 4.3 e a na Figura 4.4.

Tabela 4.3 - Resistência média à tração dos CPs (100 x 200) mm

Traço	f_c - 28 dias (MPa)
TRC2	3,6 ± 0,3
TA1C2	3,4 ± 0,4
TA2C2	4 ± 1
TRC3	4,1 ± 0,7
TA1C3	4 ± 1
TA2C3	2,8 ± 0,4

Observa-se que as resistências à tração correspondem a cerca de 10% dos valores obtidos para as resistências à compressão axial. Tal constatação vai de encontro aos resultados apresentados em estudos semelhantes. Apenas os resultados obtidos para o traço TA2C3 destoam do esperado, atingindo apenas 6,83% do percentual de sua resistência à compressão aos 28 dias. Não se pode descartar a possibilidade de um problema na moldagem dos corpos de prova utilizados, ou no posicionamento dos mesmos no aparato utilizado para a realização dos ensaios, uma vez que nenhuma outra justificativa se apresenta para explicar a obtenção de tal resultado experimental.

Levando-se em consideração a incerteza das medidas, não foi possível verificar nenhuma contribuição dada pelos aditivos a resistência à tração dos corpos de prova, independentemente do traço analisado.

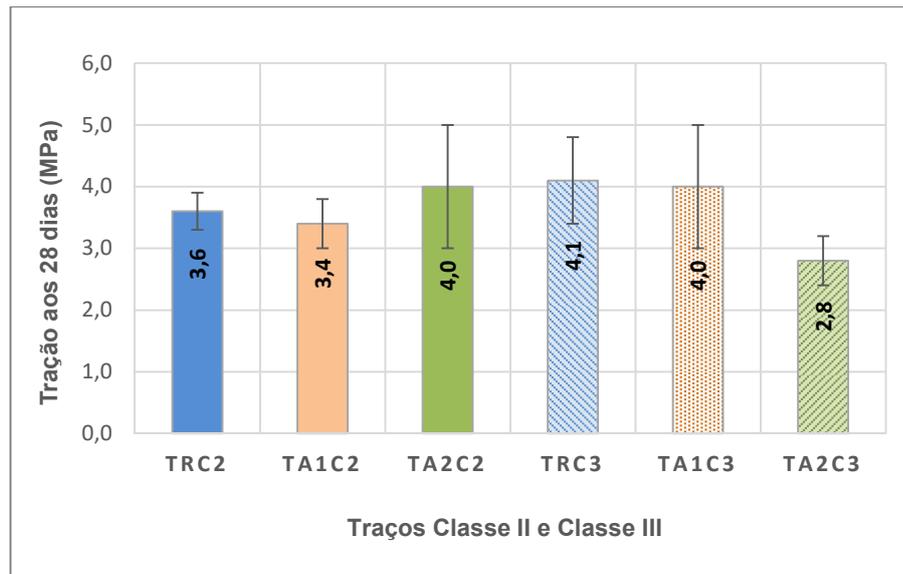


Figura 4.4 - Resultados dos ensaios de resistência à tração

Os valores médios obtidos para o módulo de elasticidade (E_c) de todos os traços analisados são apresentados na Tabela 4.4. Novamente não foi possível verificar nenhuma modificação dada pelos aditivos a esta propriedade.

Tabela 4.4 - Valores médios do Módulo de Elasticidade dos CP (150 x 300) mm

Traço	E_c - 30 dias (GPa)
TRC2	28,6 ± 0,1
TA1C2	30,1 ± 0,1
TA2C2	27,9 ± 0,2
TRC3	28,3 ± 0,1
TA1C3	29,3 ± 0,3
TA2C3	28,1 ± 0,2

4.3 Absorção por capilaridade

De acordo com a NBR 9779 (ABNT, 2012), os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade representam a quantidade de massa de água absorvida por unidade de área, em função do tempo de contato da amostra com esta. Foram utilizados CPs com dimensões de (100 x 200) mm e os ensaios iniciados aos 28 dias de idade.

As pesagens dos CPs foram realizadas nos intervalos de tempo de 6, 24, 48 e 72 horas a partir do momento em que a amostra entrou em contato com a água. Os resultados médios são apresentados na Tabela 4.5 e na Figura 4.5. Os resultados individuais obtidos para todos os CPs, nos respectivos intervalos de medição, são apresentados na Tabela A2 do Apêndice A.

Tabela 4.5 - Média dos resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade estabelecido pela NBR 9779 (ABNT, 2012)

Traço	a/c	Após 6 h (g/cm ²)	Após 24 h (g/cm ²)	Após 48 h (g/cm ²)	Após 72 h (g/cm ²)
TRC2	0,60	0,51 ± 0,03	0,93 ± 0,05	1,25 ± 0,06	1,52 ± 0,07
TA1C2	0,60	0,48 ± 0,02	0,88 ± 0,02	1,23 ± 0,03	1,42 ± 0,03
TA2C2	0,60	0,48 ± 0,02	0,89 ± 0,06	1,17 ± 0,07	1,39 ± 0,08
TRC3	0,55	0,39 ± 0,07	0,74 ± 0,03	1,05 ± 0,03	1,25 ± 0,04
TA1C3	0,55	0,45 ± 0,05	0,95 ± 0,08	1,25 ± 0,09	1,39 ± 0,09
TA2C3	0,55	0,36 ± 0,02	0,77 ± 0,04	1,08 ± 0,04	1,28 ± 0,05

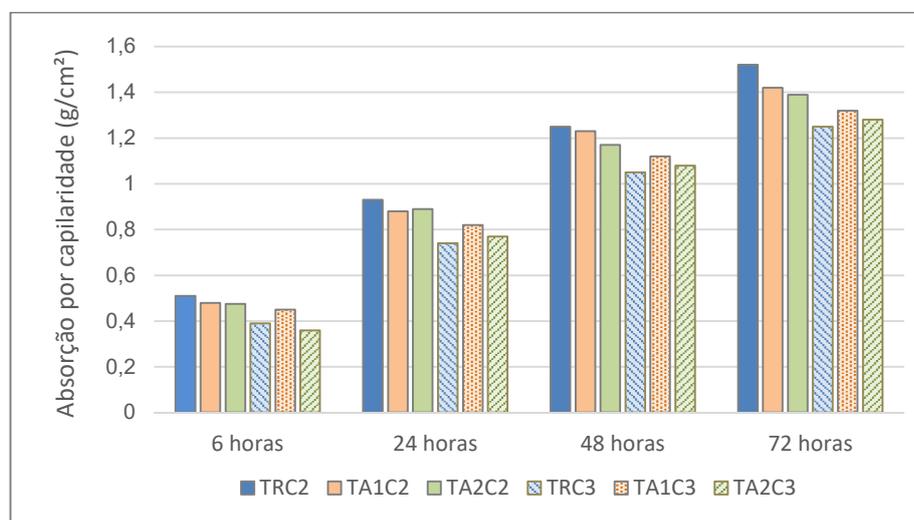


Figura 4.5 - Resultados obtidos pelo ensaio de absorção de água por capilaridade

Os resultados indicam que os efeitos produzidos pela redução da relação água/cimento (a/c) de 0,60, utilizada nos traços da classe II, para 0,55, utilizada na classe III, foram muito maiores do que os resultantes do uso dos aditivos redutores de permeabilidade utilizados neste estudo. Em particular, para o traço da classe III, os menores valores médios obtidos para a absorção de água por capilaridade foram encontrados justamente no traço de referência.

No caso dos traços da classe II, supostamente com uma maior estrutura de vazios em função da sua maior relação a/c, os aditivos, aparentemente, produziram uma pequena melhoria de desempenho no respectivo aspecto em análise (5% a 6% de redução nos valores médios de absorção).

Quando analisados os resultados das misturas da classe de agressividade II, os menores índices de absorção, como esperado, foram verificados nos concretos com aditivos, quando comparados ao concreto de referência (TRC2),

4.4 Absorção, índice de vazios e massa específica

Os valores médios para o percentual de absorção, o índice de vazios e a massa específica, obtidos segundo as recomendações da NBR 9778 (ABNT, 2005), são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Valores médios do índice de absorção de água, do índice de vazios e da massa específica dos CPs, obtidos segundo as recomendações da NBR 9778 (ABNT, 2005)

Traço	Índice de Absorção (%)	Índice de vazios (%)	Massa Específica (g/cm ³)
TRC2	6,5 ± 0,3	14,5 ± 0,5	2,61 ± 0,01
TA1C2	6,5 ± 0,2	14,1 ± 0,5	2,52 ± 0,02
TA2C2	6,27 ± 0,05	14,03 ± 0,06	2,60 ± 0,01
TRC3	6,08 ± 0,04	15,0 ± 0,1	2,90 ± 0,01
TA1C3	6 ± 1	14 ± 1	2,79 ± 0,1
TA2C3	6,0 ± 0,2	14,0 ± 0,3	2,71 ± 0,01

Os resultados obtidos indicam que os corpos de prova pertencentes ao traço da classe III apresentaram densidades superiores aos da classe II. Tais resultados levam a crer que o aumento constatado na densidade dos CPs da classe III está relacionado a um menor percentual total de vazios, produzindo, deste modo, uma estrutura mais densa. Esta expectativa já foi anteriormente atendida por meio dos resultados encontrados nos ensaios de compressão axial e absorção por

capilaridade. No entanto, os resultados agora apresentados para o índice de vazios não contribuem para validar tal afirmação, uma vez que são semelhantes aos da classe II, se levarmos em consideração as incertezas das medidas. O que se pode inferir, é que os mesmos só trazem informações relativas aos poros abertos do material, não computando o percentual de poros fechados presentes em cada corpo de prova. Deste modo, pode-se afirmar que a mudança na relação a/c e no uso dos aditivos nos traços analisados, não trouxe diferenças para o índice de vazios, que buscou avaliar a estrutura de poros abertos segundo o método estabelecido pela NBR 9778 (ABNT, 2005). Cabe ressaltar que o percentual de vazios abertos estimado por tal índice, não fornece nenhuma indicação da morfologia dos mesmos.

O índice de absorção apresenta valores ligeiramente inferiores na classe III, sendo condizentes com os resultados do teste de absorção por capilaridade apresentados na Tabela 4.5.

4.5 Determinação do coeficiente de difusão pela NT Build 492

A determinação do coeficiente de difusão de íons cloretos através da amostra de concreto foi realizada por meio do ensaio acelerado de migração no estado não estacionário prescrito pela norma finlandesa NT Build 492 (1999).

A Figura 4.6 mostra a face de ruptura de algumas das amostras ensaiadas, após aspersão de uma solução composta por 1,70 gramas de nitrato de prata (AgNO_3) para 100 mililitros de água potável equivalente à concentração $C \approx 17 \text{ g.L}^{-1}$ com reagente nitrato de prata (AgNO_3) diluído em água potável. onde foram feitas as medições da penetração dos íons cloreto, evidenciada pela aparência esbranquiçada que a solução promove ao reagir com estes íons.

Os coeficientes de migração no estado não estacionário (D_{nssm}) foram calculados utilizando-se os valores médios da profundidade de penetração encontrados a partir das medidas realizadas em 7 pontos de cada amostra, conforme mostrado na Figura 3.23 do capítulo anterior. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.7.

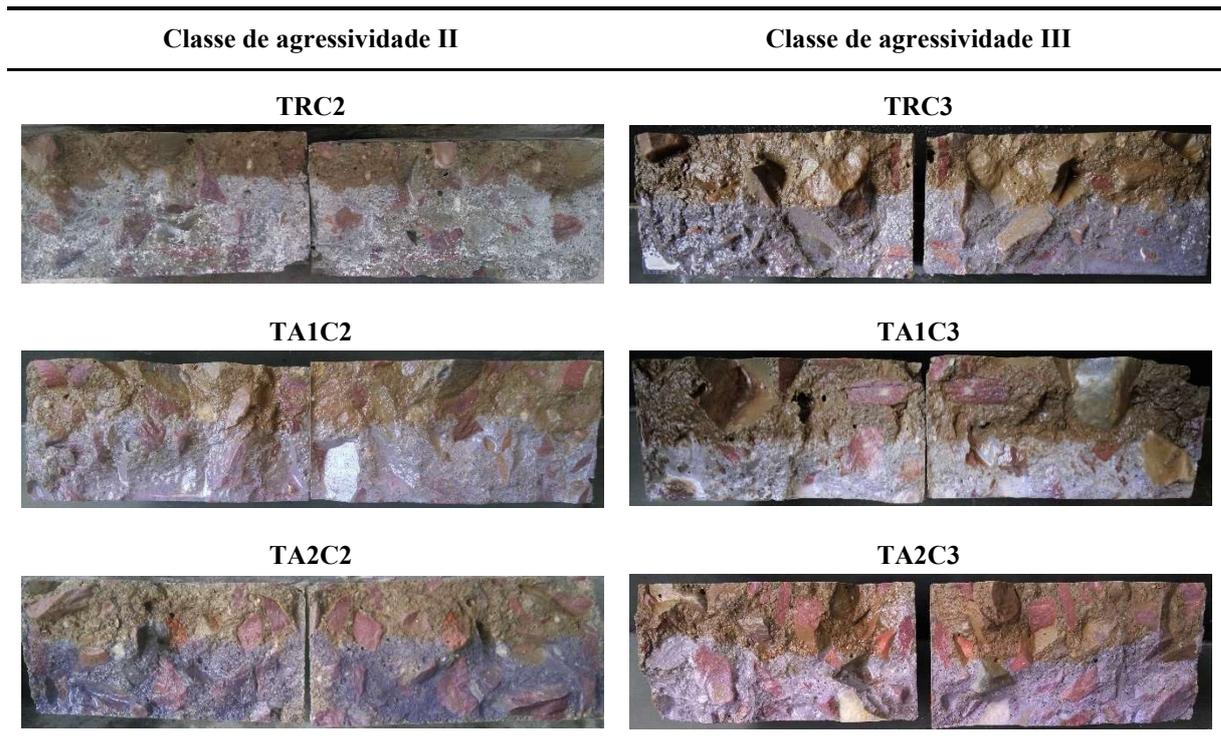


Figura 4.6 - Visualização da penetração de íons cloreto nas amostras dos diversos traços, evidenciada pela aspensão de nitrato de prata

Tabela 4.7 - Valores médios do coeficiente de difusão de íons de cloretos obtidos segundo os procedimentos estabelecidos na norma NT Build 492 (1999)

Traço	a/c	Aditivo 1	Aditivo 2	Coefficiente de Difusão (x 10 ⁻¹² m ² /s)
TRC2	0,60	0	0	23,6 ± 0,8
TA1C2	0,60	1%	0	20 ± 1
TA2C2	0,60	0	0,8%	20 ± 1
TRC3	0,55	0	0	20 ± 1
TA1C3	0,55	1%	0	17 ± 1
TA2C3	0,55	0	0,8%	18 ± 1

O primeiro efeito a ser observado é o aumento, em aproximadamente 18%, da resistência a penetração dos íons cloreto no traço de referência TRC3 em relação ao traço de referência TRC2, decorrente exclusivamente da redução da relação a/c de 0,60 para 0,55.

Os aditivos redutores de permeabilidade utilizados se mostraram eficientes, nos traços pertencentes a ambas as classes de agressividade, quanto a redução à penetração dos íons cloretos. Os traços da classe II tiveram uma redução de 15% no coeficiente de difusão, quando foram empregados tais aditivos. Nos traços da classe III, essa redução foi de 15% para o aditivo 1 e de 10% para o aditivo 2.

É importante observar que somente uma boa resistência à compressão não garante a boa durabilidade de um concreto. Tomamos como exemplo o concreto de referência da classe de agressividade II, que obteve a maior resistência à compressão axial de sua classe aos 28 dias (38 MPa) e, no entanto, apresentou uma resistência à penetração de cloretos menor do que a encontrada nos traços da mesma classe que utilizaram aditivos.

A classificação sugerida por Nilsson *et al.* (1998) *apud* Gjörv (2014), apresentada na Tabela 2.4 indica que os concretos ensaiados neste estudo, independente do traço analisado, possuem uma resistência reduzida à penetração de cloretos, uma vez que todos os coeficientes de difusão obtidos apresentaram valores superiores a $15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Tal desempenho já era esperado em decorrência do tipo de cimento utilizado (CP V). Estudos realizados por Årskog *et al.* (2007) *apud* Gjörv (2014), mostram que, para a idade de 28 dias, coeficientes superiores a $20 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ são esperados para concretos produzidos com tal tipo de cimento. Observa-se, entretanto, que o uso de aditivos redutores de permeabilidade, apesar de aumentarem a resistência à penetração de cloretos em todos os traços, não foram capazes de produzir uma melhoria que os mudasse para uma classe de resistência ao menos moderada $(10 - 15) \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

4.6 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas em um microscópio modelo FEI Quanta 3D FEG, de elétrons secundários, tensão 20 kV, Spot 4,5 e distância de trabalho de 10mm.

Foram obtidas micrografias para o traço da classe de agressividade III, tanto na região onde não foi detectada a penetração de íons cloreto quanto na região onde estes não foram detectados pela solução de nitrato de prata, onde foi possível observar aspectos gerais da estrutura do concreto e da morfologia dos produtos de hidratação.

Na Figura 4.7, são apresentadas imagens ampliadas 2.500 vezes, de uma seção próxima a borda da amostra, na região onde não foi detectada a penetração de íons cloreto.

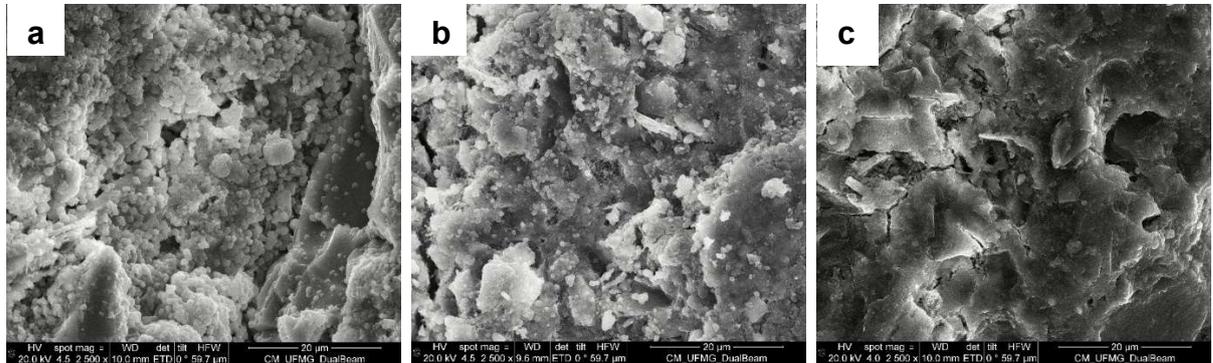


Figura 4.7 - Imagens geradas por MEV do traço da classe de agressividade III, com aumento de 2500x, na região onde não foi detectada a penetração de íons cloreto:
(a) Traço TRC3; (b) Traço TA1C3; (c) Traço TA2C3

Observa-se a presença de microfissuras nas três amostras analisadas. As imagens sugerem uma estrutura menos densa para o traço de referência TRC3.

Na Figura 4.8, são apresentadas imagens ampliadas 2.500 vezes, de uma seção próxima a borda da amostra, na região onde foi medida a profundidade de penetração de íons cloreto.

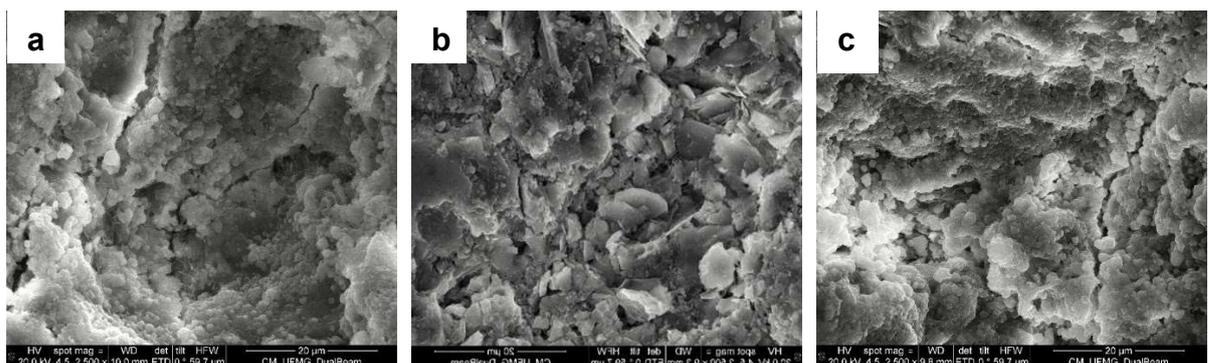


Figura 4.8 - Imagens geradas por MEV do traço da classe de agressividade III, com aumento de 2500x, na região onde foram medidas a profundidade de penetração de íons cloretos:
(a) Traço TRC3; (b) Traço TA1C3; (c) Traço TA2C3

Observa-se novamente a presença de microfissuras nas três amostras analisadas. Tal presença constatada em todas as imagens, tanto da Figura 4.7, quanto da Figura 4.8, provavelmente pode ter sido produzida no momento em que os corpos de prova foram seccionados diametralmente por esforço de tração provocada por compressão diametral, para posterior aspensão de solução

de nitrato de prata. Como todas as amostras ensaiadas no MEV foram preparadas a partir dessas seções rompidas, elas trazem consigo os efeitos dos esforços a que foram submetidas.

Nesta sequência de imagens, com uma ampliação de 2500 vezes, não foi possível identificar com clareza uma grande diferença de densificação. A Figura 4.9 traz novas imagens dessa região, agora com uma ampliação de 25000 vezes.

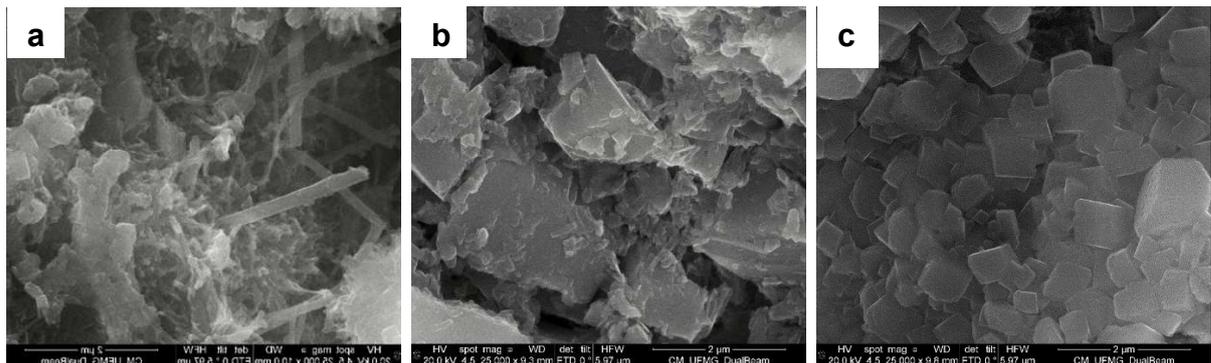


Figura 4.9 - Imagens geradas por MEV do traço da classe de agressividade III, com aumento de 25000x, na região onde foram medidas a profundidade de penetração de íons cloretos: (a) Traço TRC3; (b) Traço TA1C3; (c) Traço TA2C3

Nesta nova sequência de imagens, ampliadas 25000 vezes, observa-se estruturas morfológicas distintas para a matriz de C-S-H. As imagens sugerem uma estrutura menos densa para o traço de referência TRC3.

Neste trabalho, não se conseguiu identificar, por meio das imagens mostradas, nenhuma formação específica resultante do efeito de cristalização capilar promovido pelos aditivos redutores de permeabilidade nos vazios presentes na matriz dos compósitos cimentícios. Os menores coeficientes de difusão, obtidos nos traços em que estes foram utilizados, levam a crer, entretanto, que seu uso contribuiu para a redução da migração dos íons cloreto nos concretos analisados.

5

CONCLUSÕES

No que diz respeito ao efeito do uso de aditivos redutores de permeabilidade nas propriedades mecânicas dos concretos ensaiados, observou-se uma similaridade de comportamento independentemente da classe de agressividade a qual o traço analisado pertencia.

A consistência dos concretos produzidos ficou dentro dos intervalos estabelecidos para esse trabalho. Como não foram utilizados aditivos plastificantes, os traços pertencentes à classe de agressividade II, por possuírem uma relação a/c mais alta ($a/c = 0,60$), apresentaram maiores abatimentos de tronco de cone que os da classe de agressividade III ($a/c = 0,55$). Não se observou, para os concretos pertencentes a uma mesma classe de agressividade, nenhum efeito oriundo do uso dos aditivos redutores de permeabilidade.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial sugerem que o efeito do uso dos aditivos redutores de permeabilidade promoveu uma melhoria nas resistências dos concretos apenas nas primeiras idades (3 e 7 dias) não trazendo ganhos na idade de 28 dias.

Nenhum efeito foi observado na resistência à tração por compressão diametral em decorrência do uso dos aditivos. Observou-se que os resultados da maioria dos corpos de prova ensaiados corresponderam a 10% dos valores de compressão axial aos 28 dias, o que corresponde a valores usualmente encontrados neste tipo de ensaio.

Para os resultados do módulo de elasticidade dos concretos também não foi identificada nenhuma melhoria com a utilização dos aditivos.

Desta forma, a única variação observada nas propriedades mecânicas analisadas neste trabalho, em decorrência do uso dos aditivos redutores de permeabilidade, foi o aumento da resistência à compressão axial nas idades de 3 e 7 dias. Todas as demais mantiveram-se inalteradas.

Ao se analisar o comportamento dos concretos quanto a resistência à penetração de água, os resultados indicam que os efeitos produzidos pela redução da relação água/cimento (a/c) de 0,60, utilizada nos traços da classe II, para 0,55, utilizada na classe III, foram muito maiores do que os resultantes do uso dos aditivos redutores de permeabilidade utilizados neste estudo.

No caso dos traços da classe II, supostamente com uma maior estrutura de vazios em função de sua maior relação a/c , os aditivos, aparentemente, produziram uma pequena melhoria de desempenho quanto a absorção de água por capilaridade (5% a 6% de redução nos valores médios de absorção). Já para os traços da classe III, os aditivos, aparentemente, não foram úteis, uma vez que os melhores resultados foram encontrados no traço de referência TRC3.

As maiores densidades, como esperado, foram encontradas nos traços da classe III, uma vez que sua menor relação a/c contribuiu para produzir uma matriz cimentícia com um menor percentual de vazios. Tal resultado se mostra coerente com os encontrados nos ensaios de compressão axial e de absorção de água por capilaridade. No entanto, os índices de vazios obtidos destoam desta análise, possivelmente por levarem em consideração apenas a porosidade aberta do material.

Quanto a resistência a migração de cloretos, o primeiro efeito a ser observado é seu aumento, em aproximadamente 18%, no traço de referência TRC3 em relação ao traço de referência TRC2, decorrente exclusivamente da redução da relação a/c de 0,60 para 0,55. Neste caso, entretanto, observou-se também, que os aditivos redutores de permeabilidade utilizados se mostraram eficientes, nos traços pertencentes a ambas as classes de agressividade. Os traços da classe II tiveram uma redução de 15% no coeficiente de difusão, enquanto nos traços da classe III, essa redução foi de 15% para o aditivo 1 e de 10% para o aditivo 2.

Os concretos analisados, independentemente do traço, apresentaram uma baixa resistência à penetração de cloretos, uma vez que todos os coeficientes de difusão obtidos alcançaram valores superiores a $15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Tal desempenho já era esperado em decorrência do tipo de cimento utilizado (CP V). Observa-se, entretanto, que o uso de aditivos redutores de permeabilidade, apesar de aumentarem a resistência à penetração de cloretos em todos os traços, não foram capazes de produzir uma melhoria que os mudasse para uma classe de resistência ao menos moderada $(10 - 15) \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

Neste trabalho, não se conseguiu identificar, por meio das imagens mostradas ensaiadas no MEV, nenhuma formação específica resultante do efeito de cristalização capilar promovido pelos aditivos redutores de permeabilidade nos vazios presentes na matriz dos compósitos cimentícios, mas foi possível observar que a estrutura menos densa pertencia ao traço de referência TRC3. Os menores coeficientes de difusão, obtidos nos traços com aditivos, levam a crer, entretanto, que seu uso contribuiu para a redução da migração dos íons cloreto nos concretos analisados.

6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo: Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: Agregado graúdo: Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 5733 /EB-2: *Cimento Portland de alta resistência inicial*. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova de prova. Rio de Janeiro, 2016

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: *Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7211: *Agregado para concreto – Especificação*. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7212: *Execução de concreto dosado em central — Procedimento*. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7214: *Areia normal para ensaio de cimento - Especificação*. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215 (Incorpora a Errata nº 1 de 1997): Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222 (Incorpora a Emenda nº 1 de 2011): *Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522: *Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão..* Rio de Janeiro, 2017.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778 (Incorpora a Errata nº 1 de 2009): *Argamassa e concretos endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779: *Argamassa e concretos endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: *Concreto de cimento Portland – preparo, controle e recebimento – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14724: *Informação e documentação - Trabalhos acadêmicos - Apresentações*. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14931: *Execução de estruturas de concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2004.

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS: *Standard Method of Test for Resistance of Concrete Chloride Ion Penetration (AASHTO T 259)*. Whashington. D. C., 2002.

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS: *Standard Method of Test for Resistance of Concrete Chloride Ability to Resist Chloride Ion Penetration (AASHTO T 277)*. Whashington. D. C., 2015.

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE - 212.3 R-2016. *Report on Chemical Admixtures for Concrete Published by American Concrete Institute*. 2016. p. 46-49.

ASTM C 1202, *Standard Test Method for Electrical Indication of concrete's Ability to resist Chloride Ion Penetration*. ASTM International, Philadelphia, 2017.

ANDRADE, C. Calculation of Chloride Diffusion Coeficients Concrete from Ionic Migration Measurements. *Cement and Concrete Research*, USA, v.23, p. 724-740, 1993.

ANDRADE, C. Quantification of Durability of reinforcing steel - Methods and calculation procedures. In: *Design for durability: the Great Belt Link*. RILEM. London: 12. Published by Taylor & Francis, 1995, p. 157-172.

ANDRADE, M. C.; PAGE, C. L. Pore solution chemistry and corrosion in hydrated cement systems containing chloride salts: a study of cation specific effect. *British Corrosion Journal*, v. 21, n. 1, 1996, p. 49-54.

ARSKOG, V.; FERREIRA, M.; LIV, G.; GJØRV, O.E. Effect of Cement Type on the Resistance of Concrete against Chloride Penetration. In TOUTLEMONT, F.; SAKAI, K.; GJØRV, O. E.; BANTHIA, N. *Proceedings, Fifth International Conference on Concrete under Severe Conditions - Environment and Loading*, vol. 1, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 2007, p. 367-374.

BAKKER, R. F. M. Initiation period. In Schiessl, P. - Corrosion of steel in concrete: *RILEN/Chapman and Hall*, New York, 1988, p. 22-55.

BROUWERS, H. J. H.; SPIESZ, P. *Study on the chloride Diffusion Coefficient in Concrete Obtained in Electrically Accelerated Test*. In: ANDRADE, C. et al. (eds) *Durability of Reinforced Concrete from Composition to Protection*, Madrid, 2013, p. 169-170.

BOGAS, J, A.; GOMES, A. No-steady-state accelerated chloride penetration resistance of structural lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, Lisboa, v.60, 2015, p. 111-222.

BSI - BRITISH STANDARD INSTITUTION. *Testing hardened concrete - Part 1: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion*. (BSI 8110). London, UK, 2010.

CABRAL, A. E. B.; TORRES, J. R.; OURIVES C. N. *Avaliação do uso de aditivo para impermeabilização por cristalização no concreto*. Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto. Maceió: IBRACON, 2012, p. 24-32.

CASCUDO, O. O controle da corrosão de armaduras de concreto: Inspeção e técnicas eletroquímicas. São Paulo: Pini, 1997, p. 237.

CHIA, K. S.; ZHANG, M-H. Water permeability and chloride penetrability of high-strength lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, Singapura, v.32, 2002, p. 639-645.

FEDUMENTI, M. B. *Avaliação da influência da cinza de casca de arroz no comportamento de concretos com agregado reciclado de concreto em relação a propriedades mecânicas e de durabilidade, com ênfase no transporte de íons de cloretos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo. 2013.

FERREIRA, R. M. *Avaliação dos ensaios de durabilidade do betão*. Dissertação de Mestrado em Construção Civil, Escola de Engenharia do Minho, Guimarães, Portugal, 2000, p.135.

FELIU, S. Princípios de corrosión electroquímica y tipos de ataque. In: *Teoría y practica de la lucha contra corrosión*. FERNADEZ, J. A. G. Madrid: CSIC, cap. 1, 1984, p. 35.

FIGUEIREDO, E. P.; MEIRA, G. R. Corrosão nas armaduras das estruturas. In ISAIA, G. C.: *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: IBRACON, Vol. 2, 2011, p. 904 e 907.

FIB - FEDERATION INTERNACIONALE DU BETON. Fib Bulletin 55: Model Code 2010, First complete draft, v. 1, 2010.

GJØRV, O. E. Probability of steel corrosion. In: *Durability Design of concrete structures in Severe Environments*. London and New York. Published by Taylor & Francis, Second Edition, chapter 8, 2014, p. 114.

CAMPOS, C. A. *Estudo da carbonatação em compósitos cimentícios produzidos com o emprego de aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2018.

HELENE, P. R. L. *Contribuição ao estudo de corrosão em armaduras de concreto armado*. Teses de Livre docência em Engenharia, EPUSP - Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 1993, p. 119-128.

HILSDORF, H. K. Introduction and problem statement. In: KROPP, J. and HILSDORF, H. K. *Performance Criteria for Concrete Durability. RILEM REPORT*. London: 12. Published by Taylor & Francis, chapter 1, 1995, p. 2-4.

ISAIA, G. C. *CONCRETO. Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, vol. 1 e 2, 2011.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1920-11:2013: *Testing of concrete - Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion*. Geneva, Switzerland, 2013.

KHIARA, Y.; CENTURIONE, S. L. O cimento Portland. In: *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005, v. 1, cap. 10, p. 295-322.

KROOP, J.; HILSDORF, H. K.; GRUBE, H.; ANDRADE, C.; NILSSON, L. O. *Transport mechanisms and definitions, RILEM - Technical Committee 116-PCD - Performance Criteria for concrete durability*. Report 12. Ed. J. Kropp; H. K. Hilsdorf. Londres. Bagnaux, 1995, p.4-14.

LIBERATI, E. A. P.; LEONEL, E. D.; NOGUEIRA, C. G. Influência da corrosão da armadura na capacidade resistência à flexão de vigas em concreto armado: uma abordagem via teoria da confiabilidade estrutural. *Revista IBRACON*, v. 7, n° 3, Junho, 2014.

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil: Betões. *Determinação da resistência à penetração de cloretos (LNEC E 390)*. Lisboa, Portugal, 1993.

MEDEIROS, M.H.F; HOPPE FILHO, J.; HELENE, P. Influence of the slice position on Chloride Migration tests for concrete in marine conditions, *Marine Structures*, 2008, v. 22, n.2, p. 128-141.

MEDEIROS, M.H.F et al., Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In ISAIA, G. C. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1, capítulo 22, p.774-788.

MEDEIROS, M.H.F. et al., Previsão da vida útil de concreto armado de alta resistência com adição de metacaulim e sílica ativa em ambientes. *Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, 2013.

MENDES, M. V. A. S. *Avaliação das propriedades de transporte de massa em concretos contendo adições minerais*. Dissertação. Mestrado em Geotecnia e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiania. 2009, p. 42-44.

NEPOMUCENO, A.A. Mecanismo de Transporte de Fluidos no Concreto. In ISAIA, G. C. *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. G.C Isaia. São Paulo: IBRACON, v. 2, 2005, p.793, 794, 795, 823

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Tecnologia do Concreto*. 2ª edição. Bookman, São Paulo, 2013, p.261.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. Tradução Ruy Alberto Gremonini. 5ª edição. São Paulo: Bookman, São Paulo, 2016, p. 504.

NGUYEN, T. N.; VU, H. Q. A. Simple Approach to Modeling Chloride Diffusion into Cracked Reinforced Concrete Structures. *Journal of Civil Engineering Research*, v.5, 2015, p. 99.

NILSSON, L.; Ngo, M.H.; GJØRV, O.E. High-Performance Repair Materials for Concrete Structures in the Port of Gothenburg. In: GJØRV, O. E. et al. editors. *Proceedings, Second International Conference on Concrete under Severe Conditions - Environment and Loading*, vol. 2, London, 1998, 1193-1198 *apud* GJØRV, O. E. Probability of steel corrosion. In: *Durability Design of concrete structures in Severe Environments*. London and New York. Published by Taylor & Francis, Second Edition, chapter 8, 2014, p. 114.

NT BUILD 492 – NORDTEST METHOD: *Concrete, Mortar and Cement – Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient From Non-Steady Migration Experiments*. Finlândia, 1999.

OLLIVIER, J. P.; TORRENTI, J. M. A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte. In: OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. *Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*. Tradução Oswaldo Cascudo e Helena Carasek. 1º Edição. São Paulo: IBRACON, 2014. p. 43

OSBORNE, G. The durability of lightweight aggregate concrete after 10 years in marine and acid water environments. In Holand et al., editors. International symposium on structural lightweight aggregate concrete. Sanderfjord, Norway: 20-24, 1995, p. 590-603.

PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; EL TARRAS, A. Diffusion of Chloride ions in hardened Cement pastes. *Cement Concrete Research*. v.11, 1981, p. 397-403.

RIBEIRO, D. V. Estrutura dos poros e mecanismos de transporte no concreto. In: RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; SOUZA, C. A. C.; ALMEIDA, F. C. R.; CUNHA, M. P. T.; LOURENÇO, M. Z.; HELENE, P. *Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de análises*. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2014, p. 77-78.

SALTA, M.M; GONÇALVES, A. Métodos de caracterização da resistência de betões em ambientes agressivos. In: *Seminário: Prevenção da corrosão no betão armado. Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC*, Lisboa, 1997.

SILVA, F. G. da. *Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos*. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006, p. 48-50.

SILVA, T, J. L. Durabilidade e Vida útil das Estruturas de Concreto. In ISAIA, G. C.: *Concreto: Ciência e Tecnologia*. IBRACON, Vol. 1, 2011.

SOUSA, C. A. C. DE. Princípios da corrosão eletroquímica. In: *Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise*. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2014, p. 13-15.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto armado. São Paulo: Editora PINI, 1998, p. 20.

STANISH, K. D.; HOOTON, R. D. THOMSD, M. D. A. *Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review*. FHWA Contract DTFH61, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada, 1997, p.4.

TANG, L.; NILSON, L. O. Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field. *ACI Materials Journal*, v. 1, 89, 1992, p. 49-53.

TAYLOR, H. F. W. *Cement Chemistry*, 2nd. Edition, London: Thomas Telford, 1997, p. 356-361.

TAKAGI, E. M.; JUNIOR, W. A.; OLIVEIRA, F. S. *Tratamento químico cristalizante para impermeabilização e proteção de estruturas de concreto armado*. Anais do 46^o Congresso Brasileiro do Concreto. Florianópolis: IBRACON, 2004.

TUTIKIAN, B. F., HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland. In: ISAIA, G. C. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo, IBRACON, cap. 12, 435-446.

VERAS, D.; CUNHA, M. T. Deterioração das estruturas de concreto armado. In: *Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise*. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2014, p. 95.

VIVAS, E.; BOYD, A; HAMILTON, H. R. *Permeability of concrete – Comparison of conductivity and diffusion methods*. University of Florida - Departament of Civil & Costal Engineering, Gainesville, Florida, 2007, p.???

WHITING, D. *Rapid Measurement of the Chloride Permeability of concrete*. Public Roads, v. 45, n. 3, 1981, p. 101-102.

APÊNDICE A

Traço	A/C	Resistência	Resistência	Resistência	Média	Média	Média	Média	Média	Média
		compressão	compressão	compressão				3 dias	7 dias	28 dias
		axial	axial	axial					Incertezas	
		3 dias	7 dias	28 dias						
TRC2	0,60	20,0	21,6	39,0	19,8	22,6	38,2	0,23	0,97	0,77
		19,4	23,2	38,4				0,37	0,63	0,17
		19,9	22,9	37,3				0,13	0,33	0,93
								0,2	0,6	0,6
TA1C2	0,60	27,1	31,7	37,2	25,9	32,0	37,1	1,2	0,3	0,1
		25,4	33,1	36,4				0,5	1,1	0,7
		25,1	31,1	37,7				0,8	0,9	0,6
								0,8	0,8	0,5
TA2C2	0,60	22,3	31,7	35,4	24,5	32,0	35,8	2,2	0,3	0,4
		25,5	33,3	35,2				1,0	1,3	0,6
		25,8	31,0	36,9				1,3	1,0	1,1
								1,5	0,9	0,7
TRC3	0,55	30,3	35,9	38,5	29,0	32,9	40,5	1,3	3,0	2,0
		27,6	33,4	42,8				1,4	0,5	2,3
		29,0	29,5	40,3				0,0	3,4	0,2
								0,9	2,3	1,5
TA1C3	0,55	34,3	33,2	45,6	32,9	34,3	42,9	1,4	1,1	2,7
		32,3	33,9	39,2				0,6	0,4	3,7
		32,2	35,7	43,8				0,7	1,4	0,9
								0,9	1,0	2,4
TA2C3	0,55	28,3	37,4	39,8	30,7	36,2	41,5	2,4	1,2	1,7
		33,0	34,9	42,1				2,3	1,3	0,6
		30,7	36,4	42,5				0,0	0,2	1,0
								1,6	0,9	1,1

APÊNDICE B

Traço	CP	Capilaridade 6 horas (g/cm ²)	Capilaridade 24 horas (g/cm ²)	Capilaridade 48 horas (g/cm ²)	Capilaridade 72 horas (g/cm ²)
TRC2	13	0,52	0,97	1,32	1,60
	14	0,55	0,97	1,30	1,57
	15	0,42	0,82	1,11	1,36
	16	0,53	0,95	1,27	1,54
	17	0,53	0,98	1,30	1,58
	18	0,49	0,90	1,20	1,45
	Média	0,51	0,93	1,25	1,52
TA1C2	52	0,48	0,90	1,24	1,43
	53	0,46	0,90	1,26	1,45
	54	0,51	0,89	1,24	1,44
	55	0,47	0,83	1,17	1,35
	56	0,46	0,90	1,27	1,46
	58	0,49	0,86	1,20	1,40
	Média	0,48	0,88	1,23	1,42
TA2C2	91	0,49	0,92	1,20	1,43
	92	0,45	0,82	1,09	1,30
	93	0,45	1,00	1,26	1,47
	94	0,52	0,94	1,24	1,51
	95	0,49	0,83	1,09	1,29
	96	0,48	0,86	1,13	1,35
	Média	0,48	0,89	1,17	1,39

APÊNDICE C

Traço	CP	Capilaridade 6 horas (g/cm ²)	Capilaridade 24 horas (g/cm ²)	Capilaridade 48 horas (g/cm ²)	Capilaridade 72 horas (g/cm ²)
TRC3	130	0,43	0,74	1,03	1,22
	131	0,39	0,70	0,99	1,18
	132	0,35	0,74	1,06	1,26
	133	0,37	0,71	1,06	1,27
	134	0,40	0,81	0,12	1,32
	135	0,42	0,72	1,02	1,21
	<i>Média</i>	0,39	0,74	1,05	1,25
TA1C3	169	0,47	0,92	1,19	1,33
	170	0,31	0,88	1,17	1,32
	171	0,45	0,94	1,25	1,40
	172	0,45	0,90	1,19	1,32
	173	0,52	1,19	1,51	1,65
	174	0,51	0,89	1,17	1,30
	<i>Média</i>	0,45	0,95	1,25	1,39
TA2C3	208	0,38	0,79	1,10	1,31
	209	0,32	0,74	1,05	1,25
	210	0,36	0,75	1,06	1,24
	211	0,39	0,81	1,11	1,32
	212	0,41	0,82	1,14	1,35
	213	0,32	0,70	0,99	1,18
	<i>Média</i>	0,36	0,77	1,08	1,28

APÊNDICE D

Valores médios obtidos ao longo dos ensaios de migração ions de cloretos

Traço	Relação a/c	Idade	Corrente inicial I₃₀ (mA)	Voltagem elétrica (V)	Profundidade de penetração (mm)
TRC2	0,60	28 dias	109 ± 6	20	34 ± 1
TA1C2	0,60	28 dias	107 ± 6	20	28 ± 2
TA2C2	0,60	28 dias	96 ± 5	20	29 ± 1
TRC3	0,55	28 dias	105 ± 5	20	29 ± 2
TA1C3	0,55	28 dias	94 ± 6	20	24 ± 1
TA2C3	0,55	28 dias	96 ± 5	20	27 ± 2