

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia**

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES RELATIVAS À  
DURABILIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM  
AGENTES DE CURA INTERNA SUBMETIDOS À AÇÃO DE  
CLORETOS**

**JÚLIA GIORDANI BERTON**

**Porto Alegre**  
**2022**

**JÚLIA GIORDANI BERTON**

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES RELATIVAS À  
DURABILIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM  
AGENTES DE CURA INTERNA SUBMETIDOS À AÇÃO DE  
CLORETOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia.

Porto Alegre  
2022

**JÚLIA GIORDANI BERTON**

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE CONCRETOS  
PRODUZIDOS COM AGENTES DE CURA INTERNA  
SUBMETIDOS À AÇÃO DE CLORETOS**

Essa dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, Estruturas, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 28 de dezembro de 2022.

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho  
Dr. Pela Universidade de Leeds, Inglaterra  
Orientador

Prof. Lucas Festugato  
Coordenador PPGEC/ UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Mauro de Vasconcellos Real (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

**Prof. Alexandre Rodrigues Pacheco (UFRGS)**  
Dr. pela Pennsylvania State University, PSU, Estados Unidos

**Prof. Mauricio Mancio (UNISINOS)**  
Dr. pela University of California, Berkeley, UCB, Estados Unidos

**Prof. João Calmon Nogueira da Gama (UFES)**  
Dr. pela Universitat Politècnica de Catalunya, Espanha

*Dedico este trabalho a minha Família pela compreensão e apoio durante o seu desenvolvimento.*

## **AGRADECIMENTOS**

A minha família, meus pais Cleomenes e Marinilce, por todo apoio e auxílio. Muito obrigada  
Agradeço a minha família por todo apoio prestado.

Aos meus Pais, Cleomenes e Marinilce, por estarem sempre ao meu lado e permitirem que este sonho se tornasse realidade. Essa conquista é de vocês.

Ao meu amor Rafael, por toda a compreensão e por dividir este sonho comigo.

Ao Professor Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, meu orientador! Obrigada por acreditar no meu potencial e por todo o suporte para a realização deste trabalho.

A minha amiga Débora P. Righi Köhler, muito obrigada por sempre acreditar no meu potencial e estar comigo em todos os momentos. Sou muito grata por toda a tua ajuda, tu és uma pessoa única.

A todos os integrantes do LEME e aos bolsistas por todo o apoio e dedicação para a realização deste trabalho.

Ao CNPQ pelo auxílio que me possibilitou dedicação a esta pesquisa.

Obrigado a UFRGS pela oportunidade.

## RESUMO

BERTON, J. G. **Avaliação de propriedades relativas à durabilidade de concretos produzidos com agentes de cura interna submetidos à ação de cloretos**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Cada vez mais busca-se o desenvolvimento de concretos com elevada resistência mecânica. Frente a isso, dadas as vantagens já conhecidas destes concretos, encontra-se o problema relativo à maior possibilidade de fissuração nas primeiras idades destes concretos, oriundas do fenômeno da retração. O procedimento de promoção da cura interna é uma das estratégias para mitigar o processo de retração de concretos de elevadas resistências e baixas relações água/cimento. Diversos materiais vêm sendo utilizados como agentes de cura, como concretos reciclados, polímeros e materiais porosos provenientes das indústrias, os quais devem atender os parâmetros mínimos definidos na normativa ASTM C1761. Outra grande preocupação ligada diretamente aos avanços tecnológicos dos concretos é relativa à durabilidade das estruturas. Dado que o Brasil possui grande número de cidades localizadas na zona costeira, sujeitas a ação das marés, a corrosão das armaduras é considerada uma das principais formas de degradação das estruturas. Este trabalho avaliou questões relativas a durabilidade de concretos com e sem adição de casca cerâmica de microfusão e de argila expandida como agentes de cura interna ao comparado com concretos convencionais, através de ensaios de estrutura de poros, resistência à compressão e módulo de elasticidade, absorção de cloretos e corrosão acelerada por imersão modificada, ensaio que permitiu também a avaliação da perda de massa da armadura que compõem os corpos de prova. Com base nos resultados encontrados dentro das condições avaliadas neste estudo é possível verificar que os agregados de cura interna, em especial a casca cerâmica de microfusão, apresentam-se como uma solução para ambientes com elevada exposição a agentes agressivos, permitindo ainda uma melhoria nas propriedades mecânicas dos concretos.

Palavras-chave: Cura interna; Materiais porosos; Ação de cloretos; Durabilidade.

## ABSTRACT

BERTON, J. G. **Avaliação de propriedades relativas à durabilidade de concretos produzidos com agentes de cura interna submetidos à ação de cloretos**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

More and more people are looking for the development of concretes with high mechanical resistance. Faced with this, given the already known advantages of these concretes, there is the problem related to the greater possibility of cracking in the early ages of these concretes, arising from the phenomenon of shrinkage. The procedure to promote internal curing is one of the strategies to mitigate the shrinkage process of high strength concrete with low water/cement ratio. Several materials have been used as curing agents, such as recycled concrete, polymers and porous materials from industries, which must meet the minimum parameters defined in ASTM C1761. Another major concern directly linked to technological advances in concrete is related to the durability of structures. Given that Brazil has a large number of cities located in the coastal zone, subject to tidal action, reinforcement corrosion is considered one of the main forms of degradation of structures. This work evaluated questions related to the durability of concretes with and without the addition of microfusion ceramic shell and expanded clay as internal curing agents when compared to conventional concretes, through tests of pore structure, resistance to compression and modulus of elasticity, absorption of chlorides and accelerated corrosion by modified immersion, a test that also allowed the evaluation of the loss of mass of the reinforcement that composes the specimens. Based on the results found within the conditions evaluated in this study, it is possible to verify that the internal curing aggregates, in particular the microfusion ceramic shell, present themselves as a solution for environments with high exposure to aggressive agents, allowing even an improvement in the properties concrete mechanics.

Key-word: palavra-chave: Internal curing; Porous materials; Chlorides action; Durability

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma da pesquisa .....	22
Figura 2 - Relação entre durabilidade e desempenho.....	27
Figura 3 - Evolução dos projetos de estruturas de concreto .....	29
Figura 4 - Ciclo de vida de edificações .....	30
Figura 5 - Célula de corrosão .....	34
Figura 6 - Processo de corrosão das armaduras.....	35
Figura 7 - Mecanismos de transporte .....	37
Figura 8 – Cura externa e cura interna de concretos .....	41
Figura 9 - Distribuição volumétrica das fases da pasta de cimento.....	44
Figura 10 - Quantidade de água de cura interna em função da relação a/c sílica ativa adicionada.....	45
Figura 11 - Esquema do programa experimental .....	50
Figura 12 - Casca cerâmica utilizada.....	55
Figura 13 - Argila expandida utilizada.....	57
Figura 14 - Materiais, argamassadeira e corpos de prova em cura úmida.....	61
Figura 15 - Procedimentos do ensaio de absorvidade .....	64
Figura 16 - Etapas de realização do ensaio de absorção e índice de vazios .....	64
Figura 17 - Ensaio de resistência à compressão .....	66
Figura 18 - Ensaio de módulo de elasticidade.....	66
Figura 19 - Esquema de realização do ensaio de penetração de cloretos .....	67
Figura 20 - Camadas utilizadas dos corpos de prova ensaiados.....	67
Figura 21 - Ensaio de penetração de cloretos .....	68
Figura 22 - Esquema de ligação corpo de prova – fonte .....	70
Figura 23 - Esquema de ligação dos corpos de prova em série.....	71
Figura 24 - Relação tempo x grau de corrosão conforme a Lei de Faraday.....	71
Figura 25 - Ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada realizado .....	72
Figura 26 - Barras após a remoção do interior do concreto.....	73
Figura 27 - Procedimento de limpeza das barras.....	73
Figura 28 - Valores médios de ganho de massa em função do tempo - grupo referência.....	76
Figura 29 - Valores médios de ganho de massa em função do tempo - grupo casca cerâmica	76



Figura 30 - Valores médios de ganho de massa em função do tempo - grupo argila expandida .....	76
Figura 31 - Valores médios de nick point dos grupos analisados .....	77
Figura 32 - Valores médios de absorção e índice de vazios .....	80
Figura 33 - Resistência a compressão por idade .....	82
Figura 34 - Evolução da resistência a compressão para os microconcretos, valores médios...	83
Figura 35 - Resultados módulo de elasticidade por grupo .....	86
Figura 36 - Correntes médias obtidas no ensaio – tempo total.....	88
Figura 37 - Correntes médias obtidas durante 4 horas de ensaio .....	88
Figura 38 - Resultados médios de carga passante durante as 4 horas de ensaio .....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros mínimos do concreto .....	29
Tabela 2 - Caracterização química e física do cimento.....	51
Tabela 3 - Caracterização da areia.....	52
Tabela 4 - Caracterização da areia conforme a ASTM C1761 (2015).....	53
Tabela 5 - Caracterização da casca cerâmica .....	55
Tabela 6 - Caracterização da casca cerâmica conforme ASTM C1761 (2015).....	56
Tabela 7 - Composição granulométrica da argila expandida .....	57
Tabela 8 - Caracterização da argila expandida conforme ASTM C1761 (2015).....	58
Tabela 9 - Quantitativo de materiais conforme RILEM 225 - SAP .....	59
Tabela 10 - Quantitativo de substituição do agregado poroso.....	60
Tabela 11 - Nomenclatura utilizada para os traços.....	61
Tabela 12 - Quantitativo de corpos de prova por ensaio .....	62
Tabela 13 - Classificação quanto ao risco de penetração de íons cloretos .....	69
Tabela 14 - Resultado taxa de absorção e resistência capilar .....	78
Tabela 15 - ANOVA da influência do uso de materiais como agentes de cura interna na produção de concretos quanto a absorção e índice de vazios.....	81
Tabela 16 - ANOVA da influência do uso de materiais como agentes de cura interna na produção de concretos quanto a resistência à compressão .....	85
Tabela 17 - ANOVA da influência do uso de materiais como agentes de cura interna na produção de concretos quanto ao módulo de elasticidade.....	87
Tabela 18 - Cargas médias passantes e classificação de penetrabilidade.....	89
Tabela 19 - Perda de massa das barras .....	92

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Características dos mecanismos de deterioração do concreto .....	32
---	----

## LISTA DE EQUAÇÕES

(Equação 1).....	44
(Equação 2).....	44
(Equação 3).....	68
(Equação 4).....	68
(Equação 5).....	71
(Equação 6).....	72
(Equação 7).....	74

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS

a/c: Relação água cimento

a/c<sub>ef</sub>: Relação água cimento efetiva

A: Unidade de medida de corrente em Ampere

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI: *American Concrete Institute* – Instituto Americano de Concreto

ASTM: *American Society for Testing and Materials* – Sociedade Americana para teste e materiais

C: Unidade de medida em Coulombs

°C: Unidade de temperatura em grau Celcius

CAIM: Corrosão Acelerada por Imersão Modificada

CEB: Comitê europeu para concreto

Cm: Unidade de medida em centímetros

CO<sub>2</sub>: Dióxido de carbono – elemento químico

CP V ARI: Cimento Portland classe cinco de alta resistência inicial

CP: Cimento Portland

cp: Corpo de prova

FIB – *Fédération Internationale Du Béton* – Federação Internacional do Concreto

g/l: Unidade de medida em gramas por litro

g/cm<sup>3</sup>: Unidade de medida em gramas por centímetros cúbicos

g/mm<sup>3</sup>: Unidade de medida em gramas por milímetros cúbicos

g: Unidade de medida em gramas

h: Unidade de medida em horas

ISO: *International Organization for Standardization* - Organização Internacional de Normatização

kg/m<sup>3</sup>: Unidade de medida em gramas por metros cúbicos

kg: Unidade de medida em quilogramas

kN: Unidade de medida em quilonewtons

L: Unidade de medida em litros

LEME: Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais – UFRGS

LVDT: *Linear Variable Differential Transformer* – Transformador diferencial variável linear

MPa: Unidade de medida em megapascal

MPa/s: Unidade de medida em megapascal por segundo

mm: Unidade de medida em milímetros

ml: Unidade de medida em mililitros

NaCl: Cloreto de Sódio – elemento químico

NaOH: Hidróxido de sódio – elemento químico

NO<sub>2</sub>: Dióxido de nitrogênio – elemento químico

NBR: Norma Brasileira Regulamentadora

NM: Norma do Mercosul

O<sub>2</sub>: Oxigênio – elemento químico

pH: Unidade de medida em escala de acidez

RCD – Resíduo da Construção Civil

SAP: Polímero superabsorvente

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

V: Unidade de tensão elétrica Volt

% : Unidade de razão em porcentagem

µm: Unidade de medida em micrômetros

>: Símbolo maior que

< Símbolo menor que

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>17</b>
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>1.1 OBJETIVOS</b> .....	19
1.1.1 Objetivo Geral .....	19
1.1.2 Objetivos Específicos.....	20
<b>1.2 ORIGINALIDADE</b> .....	20
<b>1.3 DELINEAMENTO DA PESQUISA</b> .....	21
<b>1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO</b> .....	22
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>24</b>
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>24</b>
<b>2.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE DURABILIDADE E DEGRADAÇÃO DAS ESTRUTURAS</b> .....	24
2.1.1 Durabilidade E Vida Útil Das Estruturas De Concreto.....	24
2.1.2 Corrosão das armaduras e ação de cloretos.....	32
<b>2.2 PRINCÍPIOS DA HIDRATAÇÃO EM CONCRETOS E O PAPEL DA CURA INTERNA</b> .....	38
2.2.1 Considerações Iniciais .....	38
2.2.2 Hidratação De Matrizes Cimentícias .....	39
2.2.3 Cura Interna .....	40
2.2.3.1 Os Mecanismos que Envolvem a Cura Interna .....	42
2.2.3.2 O modelo de Powers aplicado à Cura Interna.....	43
2.2.4 Materiais Utilizados Como Agentes De Cura Interna .....	45
2.2.5 Cura Interna E Durabilidade .....	47
2.2.6 Síntese do capítulo .....	48
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>50</b>
<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>50</b>
<b>3.1 MATERIAIS</b> .....	51
3.1.1 Cimento Portland .....	51
3.1.2 Água de amassamento .....	52
3.1.3 Agregado miúdo.....	52
3.1.4 Aditivos e Adições.....	53
3.1.5 Materiais porosos.....	54

3.1.5.1	Resíduo britado da casca cerâmica para microfusão .....	54
3.1.5.2	Argila expandida .....	56
3.2	PROCEDIMENTO DE DOSAGEM, MOLDAGEM E CURA.....	58
3.2.1	Determinação do traço .....	58
3.2.2	Determinação da quantidade de água utilizada para Cura Interna.....	60
3.2.3	Saturação do agregado, moldagem e cura .....	60
3.3	ESTRUTURA DE POROS E DURABILIDADE .....	62
3.3.1	Absortividade.....	62
3.3.2	Absorção e índice de vazios .....	64
3.3.3	Resistência à compressão .....	65
3.3.4	Módulo de elasticidade.....	66
3.3.5	Penetração de cloretos.....	67
3.3.6	Corrosão acelerada por imersão modificada – CAIM.....	69
3.3.7	Determinação da perda de massa da armadura.....	72
CAPÍTULO 4.....		75
RESULTADOS E DISCUSSÕES .....		75
4.1	ESTRUTURA DE POROS .....	75
4.1.1	Absortividade.....	75
4.1.2	Absorção e índice de vazios .....	79
4.2	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA .....	81
4.2.1	Resistência à compressão .....	82
4.2.2	Módulo de elasticidade.....	85
4.3	AÇÃO DE CLORETOS.....	87
4.3.1	Penetração de cloretos.....	87
4.3.2	Perda de massa da armadura.....	91
CAPÍTULO 5.....		94
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....		94
5.1	CONCLUSÕES.....	94
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		97



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Cada vez mais, vê-se a aceleração da indústria impactando em uma grande geração de resíduos. Com a construção civil não vem sendo diferente, os avanços, mudanças e as tecnologias presentes vem mudando tanto a forma de construir quanto diversos conceitos relacionados à área. Na literatura nacional e internacional, muito se fala sobre as propriedades das estruturas de concreto armado, durabilidade, as patologias relacionadas ao ambiente e ao uso, bem como os estudos que reúnem os conceitos acima descritos aliados ao uso de materiais provenientes das indústrias ou da própria construção civil.

As manifestações patológicas dizem respeito a área da medicina que trata as origens, sintomas e as causas das doenças. Na engenharia ocorre da mesma forma, esta área estuda as lesões que ocorrem nas estruturas e causam a degradação das mesmas e por consequência a redução da vida útil das estruturas. O pleno entendimento sobre os materiais que compõem a estrutura, o ambiente ao qual esta será exposta e os esforços aos quais esta será submetida permitem a realização do melhor dimensionamento, possibilitando ainda o uso de materiais que contribuam com a durabilidade e vida útil desta estrutura. Conforme Pereira da Costa (2015), apesar dos crescentes avanços na engenharia civil a falta de durabilidade das estruturas de concreto tem sido constatada com uma assiduidade elevada, sendo em geral danos oriundos do comportamento de interação entre estrutura e ambiente, reatividade entre componentes e da ação de agentes agressivos a estrutura.

Com os atuais avanços das tecnologias para projeto e concepção de estruturas de concreto armado cada vez mais esbeltas, inovações no ramo de projetos e materiais e o melhor entendimento das manifestações patológicas que possam aparecer estão diretamente interligadas entre si. Frente a isso, a consolidação do cimento Portland como aglomerante, o surgimento de concretos de ultra resistência, a incorporação de aditivos e adições aos concretos, a redução da quantidade de água incorporada às misturas e os concretos de alta resistência veem permitido cada vez mais a modelagem de distintas estruturas. A diversidade de produtos que podem ser utilizados e até mesmo incorporados às estruturas de concreto armado vem sendo ampliadas a cada dia.

Avaliação de propriedades relativas à durabilidade de concretos produzidos com agentes de cura interna submetidos a ação de cloretos.

Segundo exposto por Caetano (2019), as respostas ao uso de concretos com elevadas resistências e relações de água cimento (a/c) reduzidas foram excelentes. Entretanto, este tipo de concreto se mostrava mais suscetível à ocorrência de fissuras nas primeiras idades, estando esta ocorrência relacionada ao fenômeno de retração autógena. Ainda, de acordo com a autora, a ocorrência da retração é dada pela menor quantidade de água presente, não havendo uma quantidade suficiente para gerar uma rede capilar ampla e aberta, o que em alguns casos, pode levar a auto dessecação, que consiste no consumo de água presente nos capilares para a abastecer as reações de hidratação dos concretos. A ocorrência destes fenômenos que leva ao aparecimento de fissuras podem reduzir a vida útil das estruturas, causando impacto na durabilidade por facilitar a entrada de agentes agressivos por meio da rede de fissuras geradas.

Conforme Cordeiro de Souza *et al.* (2020), a água possui papel extremamente importante no processo de pega e endurecimento do concreto, no qual a perda ou a falta desta água pode vir a provocar vazios, ocasionando assim a retração. Logo, a disponibilidade hídrica durante a cura dos concretos é parâmetro essencial para obter-se materiais com baixa permeabilidade e absorção de água com boa resistência e de durabilidade satisfatória. Entretanto, em alguns concretos apenas a água de amassamento e a cura úmida tradicional não são capazes de promover a água necessária para durante o procedimento de cura, fazendo necessário o uso de outras alternativas para mitigar a ocorrência de fenômenos nocivos à estrutura.

Estudos relacionados ao uso de aditivos químicos, fibras e controle de cura vêm sendo estudados com foco em reduzir a ocorrência da retração autógena. Dentre as formas que buscam a redução da retração autógena está a cura interna, método que vem sendo estudado por diversos pesquisadores, como Bentur (2010), Kovler e Jaensen (2007), Caetano (2019) e Souza *et al.* (2020). A cura interna consiste na promoção de reservatórios internos de água que supram a demanda hídrica ao longo do processo de hidratação do concreto. Diversos são os materiais que quando introduzidos no concreto promovem este feito, como agregado tradicional saturado, agregados reciclados da construção civil, conhecidos como RCD, materiais porosos ou polímeros superabsorventes (PSA), sendo estes dois últimos detentores dos melhores resultados.

Para Caetano (2019), o custo ligado ao PSA é um dos grandes limitadores de seu uso em larga escala. Contudo, os materiais porosos, principalmente os provenientes do descarte de processos industriais, vem ganhando cada vez mais espaço. Estes materiais, de fácil aquisição

já vem sendo utilizados para produção de concretos leves, melhorias quanto a durabilidade em ambientes de grande exposição a cloretos, por exemplo. Os requisitos mínimos para os materiais utilizados para a cura interna são definidos pela Normativa ASTM C1706, que aborda sobre as características físicas e químicas destes materiais.

Dentre os estudos encontrados, pouco se fala sobre o emprego desses materiais porosos como agentes de cura interna e de durabilidade dos concretos. No Brasil, dado o elevado número de cidades litorâneas, a ação de cloretos nas estruturas de concreto armado pode ser considerada, conforme estudos, uma das maiores causas da redução da durabilidade e consequentemente redução do desempenho e da vida útil das estruturas. O estudo realizado por Caetano (2019), avalia o uso de diferentes materiais porosos provenientes da indústria como agentes de cura interna para concretos e quanto a ação dos cloretos em seu interior. Porém, nada foi proposto frente a corrosão das armaduras.

Assim, a presente pesquisa busca avaliar a utilização de casca cerâmica e argila expandida como agentes de cura interna em concretos submetidos à ação direta de cloretos por meio de ensaios acelerados. Desta forma, além da utilização destes materiais como agentes de cura, será avaliada sua eficácia quanto a durabilidade de concretos expostos a ambientes altamente agressivos.

## **1.1 OBJETIVOS**

Neste item são apresentados os objetivos para este trabalho, estando divididos em objetivo geral, que apresenta o foco principal da pesquisa e em objetivos específicos, no qual são apresentados os pontos ênfase do estudo.

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar a potencialidade de uso do resíduo britado da casca cerâmica para micro fusão e da argila expandida como agentes de cura interna em concretos com baixa relação água/cimento, quando sujeitos à ação de cloretos.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Definido o objetivo principal deste estudo, foram definidos os objetivos específicos do trabalho que delimitam um conjunto de fatores elencados para atender ao objetivo principal deste estudo, que são:

- a) avaliar a influência da casca cerâmica para micro fusão e da argila expandida, na forma de agregado miúdo nos concretos estudados, visando a cura interna;
- b) avaliar a estrutura de poros frente a permeabilidade dos concretos produzidos com adição de agregado para a cura interna;
- c) verificar o potencial de ingresso de cloretos aos concretos produzidos com os agentes de cura interna;
- d) avaliar a influência dos materiais utilizados como agentes de cura interna sobre as propriedades mecânicas dos concretos produzidos;
- e) verificar a durabilidade dos concretos produzidos com agentes de cura interna quando expostos ao ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada – CAIM;
- f) avaliar a durabilidade e o potencial de corrosão dos concretos produzidos com os agentes de cura interna;
- g) verificar a perda de massa da armadura dos concretos com agentes de cura interna após ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada.

## 1.2 ORIGINALIDADE

Conforme já mencionado neste capítulo, cada vez mais a construção civil busca o desenvolvimento de estruturas duráveis, com boas estimativas de desempenho e vida útil. Assim, o estudo das manifestações patológicas sofridas pelas estruturas são uma das grandes áreas de estudo da engenharia civil. O Brasil possui uma extensa costa litorânea, composta por cerca de 280 cidades, frente a isso, o estudo da interação entre ambiente marinho (altamente nocivo às estruturas) e a durabilidade das estruturas neste ambiente ganham cada vez mais espaço.

A penetração de agentes agressivos nas estruturas de concreto vem sendo descrita como uma das piores formas de degradação das estruturas, atacando desde o concreto até a armadura que o compõem. A produção de concretos de elevada resistência e relações a/c reduzidas apresentam um problema ao serem expostas a este tipo de ambiente. As baixas concentrações de água utilizadas na mistura, podem promover os fenômenos relacionados à retração e auto dessecção destes concretos, que tem como característica o aparecimento de fissuras nas primeiras idades dos concretos. Entretanto, estudos como o de Caetano (2019) e Senisse (2015), desenvolvidos na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, visam estudar a utilização da cura interna como método de reduzir ambos os fenômenos. As autoras utilizam distintos materiais para a confecção de concretos, nos quais ambas obtiveram bons resultados.

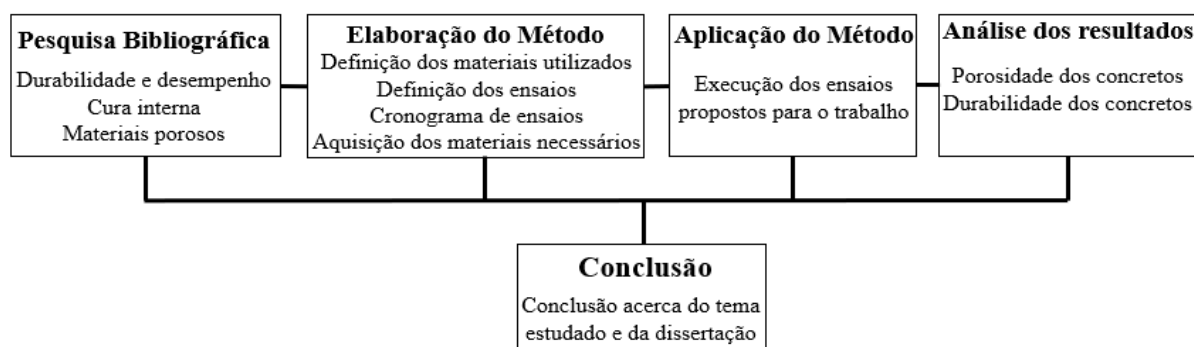
Entretanto, pouco se fala sobre a influência destes materiais quanto à durabilidade dos concretos. Alguns estudos avaliam o potencial de ingresso de agentes agressivos aos concretos, porém não avaliam a sua influência quando a estrutura de concreto armado como um todo é exposta a meios corrosivos. Este estudo, visa a utilização de dois dos materiais estudados por Caetano (2019), a casca cerâmica de micro fusão e argila expandida, como agentes de cura interna, a casca cerâmica para micro fusão e da argila expandida, em concretos submetidos a ensaios acelerados de ação de cloretos, nos quais será avaliado o potencial de penetração dos cloretos no concreto e a corrosão das armaduras que os compõem.

Além de promover a maior durabilidade das estruturas, o trabalho vai ao encontro também com a sustentabilidade, dado o potencial de reuso de materiais reciclados encontrados em grandes quantidades no estado do Rio Grande do Sul como agentes de cura interna.

### **1.3 DELINEAMENTO DA PESQUISA**

Este trabalho foi desenvolvido conforme as etapas definidas no fluxograma apresentado a seguir, na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma da pesquisa



Fonte: Autoria Própria.

A etapa de pesquisa **bibliográfica** objetiva contribuir para os conhecimentos técnicos relacionados ao tema de pesquisa, permitindo um melhor entendimento do mesmo, essencial para as definições relacionadas às variáveis da pesquisa e interpretação dos resultados. Esta etapa encontra-se presente durante toda a execução da pesquisa.

A definição dos materiais a serem utilizados e as porcentagens de substituição nos traços a serem executados, bem como a escolha dos ensaios a serem realizados encontram-se descritas na segunda etapa, denominada **elaboração do método**.

A terceira etapa, **aplicação do método**, consiste na execução do método, ou seja, a realização da moldagem e cura dos corpos de prova, bem como a realização dos ensaios descritos.

A etapa denominada **análise dos resultados e discussões**, constitui-se pelas análises qualitativas e quantitativas dos ensaios realizados no estudo. A quinta e última etapa apresenta as **conclusões** obtidas com base nos resultados da pesquisa.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos. O Capítulo 1 aborda uma contextualização do tema e a justificativa da pesquisa, acompanhado dos objetivos gerais e específicos deste estudo.

O Capítulo 2 aborda aspectos gerais sobre a durabilidade e degradação das estruturas. Neste são abordados conceitos acerca da durabilidade, vida útil e desempenho das estruturas, bem como as normativas que norteiam estes conceitos. Os conceitos sobre a degradação das estruturas, com foco na corrosão das armaduras e os ataques por cloretos, também são abordados neste capítulo. Além disso, neste capítulo são discutidos também os conceitos relativos à cura interna de concretos, sendo abordados os conceitos relacionados à hidratação dos concretos bem como sobre a retração. O capítulo traz um breve histórico sobre o uso de agentes de cura interna em concretos, os materiais que vêm sendo empregados e os benefícios deste método de cura em questões de durabilidade.

No Capítulo 3 é apresentado o programa experimental desta pesquisa, incluindo a descrição dos materiais utilizados. São especificados os procedimentos de dosagem, moldagem e cura, bem como todos os ensaios a serem realizados para a análise da durabilidade dos concretos com agentes de cura interna.

Já o capítulo 4, apresenta todos os resultados e análises realizadas com base nos fundamentos teóricos descritos nos Capítulos 2, 3 e 4. Com base nos resultados, obtendo as respostas para as perguntas listadas no item 1.1, deste capítulo.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais e as conclusões sobre o estudo realizado. Este capítulo discute ainda as sugestões para trabalhos futuros, visando a continuação dos estudos nesta área.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE DURABILIDADE E DEGRADAÇÃO DAS ESTRUTURAS

Neste capítulo, apresenta-se uma revisão sobre conceitos fundamentais relativos ao tema da pesquisa. Em um primeiro momento, são abordados conceitos acerca da durabilidade, vida útil e degradação das estruturas de concreto. Além disso, são apresentados os conceitos relacionados à corrosão das armaduras e à ação dos cloretos nestas.

##### 2.1.1 Durabilidade E Vida Útil Das Estruturas De Concreto

Os conceitos voltados para o desempenho e a durabilidade das estruturas de concreto, assim como a busca da melhor otimização destas estruturas são uma tendência mundial. Até a década de 80 pouco falava-se sobre o tema, segundo Possan (2010) as primeiras estruturas de concreto eram projetadas conforme o bom senso e a experiência dos profissionais de engenharia envolvidos no processo, tendo como característica controlada a resistência à compressão. Entretanto, com as novas tecnologias e avanços na construção civil os conceitos acerca da durabilidade de vida útil das estruturas vêm sendo difundidos, sendo possível hoje encontrar diversas referências sobre o assunto na literatura para engenharia.

Dada a evolução dos materiais de construção, dos métodos de cálculo, aliados ainda as distintas formas de exposição das estruturas e a criação de diversos documentos internacionais como ASTM E 623 (*Standard Practice for Developing Accelerated Test to Aid Prediction to the Service Life of Building Component and Materials*) em 1982, CEB-FIP *Model Code 90*, NBR 6118 (Projeto de estruturas de concreto – Procedimento) em 2014 e NBR 15575 (Edificações habitacionais – Desempenho) em 2013, e dos diversos estudos publicados, os conceitos voltados para a defesa e a preocupação com a durabilidade e o aumento da vida útil passaram a tomar ênfase no ramo da construção civil (MEDEIROS *et al.*, 2011).



A preocupação com a durabilidade e a vida útil das edificações de concreto armado vem instigando a comunidade técnico-científica a desenvolver soluções que minimizem tanto o processo de degradação quanto os danos decorrentes. Comitês técnicos de organizações como a Federação Internacional do Concreto Estrutural – *fib* (*Fédération Internationale Du Béton*), o Instituto Americano de Concreto – ACI (*American Concrete Institute*) e o Comité Euro-Internacional do Concreto – CEB (*Comité Euro-International du Béton*), tem desenvolvido relatórios e práticas recomendadas acerca destes problemas relacionados a durabilidade e vida útil das estruturas. Os primeiros roteiros destinavam-se à durabilidade do concreto, como o ACI 201 (1992) intitulado “*Guide to Durable Concrete*”, o CEB 183 (1992) – “*Durable concrete Structures*” e o CEB 238 (1997) que apresenta sobre a corrosão nas estruturas – “*New approach to durability design: an example for carbonation induced corrosion.*”

Conforme Dal Molin *et al.* (2016) a Norma de Desempenho NBR 15575 lançada em 2013, é o principal documento normativo voltado ao desempenho das edificações, buscando ainda a melhoria na qualidade disponível no Brasil. Além disso, a referida norma leva em conta a durabilidade e a vida útil das estruturas em suas seções, sugerindo a modelagem matemática como um instrumento para realizar tanto a análise de desempenho como a estimativa de vida útil das estruturas, apesar de não apresentar modelos de aplicação prática para tal. Ainda conforme a autora, os códigos e normas internacionais como ACI, *fib* e ISO fundamentam-se em modelos matemáticos que buscam descrever esses mecanismos de degradação incorporando conhecimento de diversas áreas. Os dados levantados em inspeções, manutenções e nos reparos dessas estruturas, conhecimento de especialistas além de ensaios acelerados são utilizados para identificar e calibrar parâmetros de entrada dessas informações, o que permite uma estimativa aproximada da vida útil de estruturas de concreto.

A durabilidade pode ser definida como o resultado da interação entre a estrutura de concreto, o ambiente no qual está inserida e as condições de uso, operação e manutenção que esta encontra-se sujeita. Desta forma, a durabilidade não pode ser definida como uma propriedade intrínseca à estrutura, à armadura ou ao concreto (MEDEIROS *et al.*, 2011). Segundo Stein (2019), a durabilidade é a capacidade que a estrutura tem de desempenhar as funções para as quais foi prevista durante o tempo, desta forma, é considerado durável o concreto capaz de resistir aos processos de degradação devidos ao meio no qual este se encontra inserido sem a necessidade de manutenções.

A NBR 6118 (ABNT, 2014 p. 13), norma regulamentadora que define os critérios que norteiam o projeto de estruturas de concreto, apresenta a durabilidade das estruturas em concreto armado como a:

[...] capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto.

Bem como, a NBR 6118 (ABNT, 2014 p. 15) define que:

“As estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil.”

Metha e Monteiro (2014), definem a durabilidade de concretos à base de cimento Portland como a capacidade de resistir ao intemperismo, abrasão, ataque de químicos ou qualquer outro processo de deterioração no qual a estrutura encontra-se exposta mantendo as suas propriedades originais, qualidade e capacidade de serviço. Segundo os autores, a durabilidade relaciona as características da estrutura com suas condições de exposição e uso, sendo a durabilidade sinônimo de uma vida útil longa.

Para Ribeiro e Cascudo (2018), um concreto pode ser considerável durável quando é capaz de desempenhar as funções que lhe foram atribuídas, mantendo a sua resistência e utilidade durante o período de tempo previsto. Entretanto, um concreto durável não é garantia de uma estrutura durável, dado que outros fatores também influenciam na durabilidade.

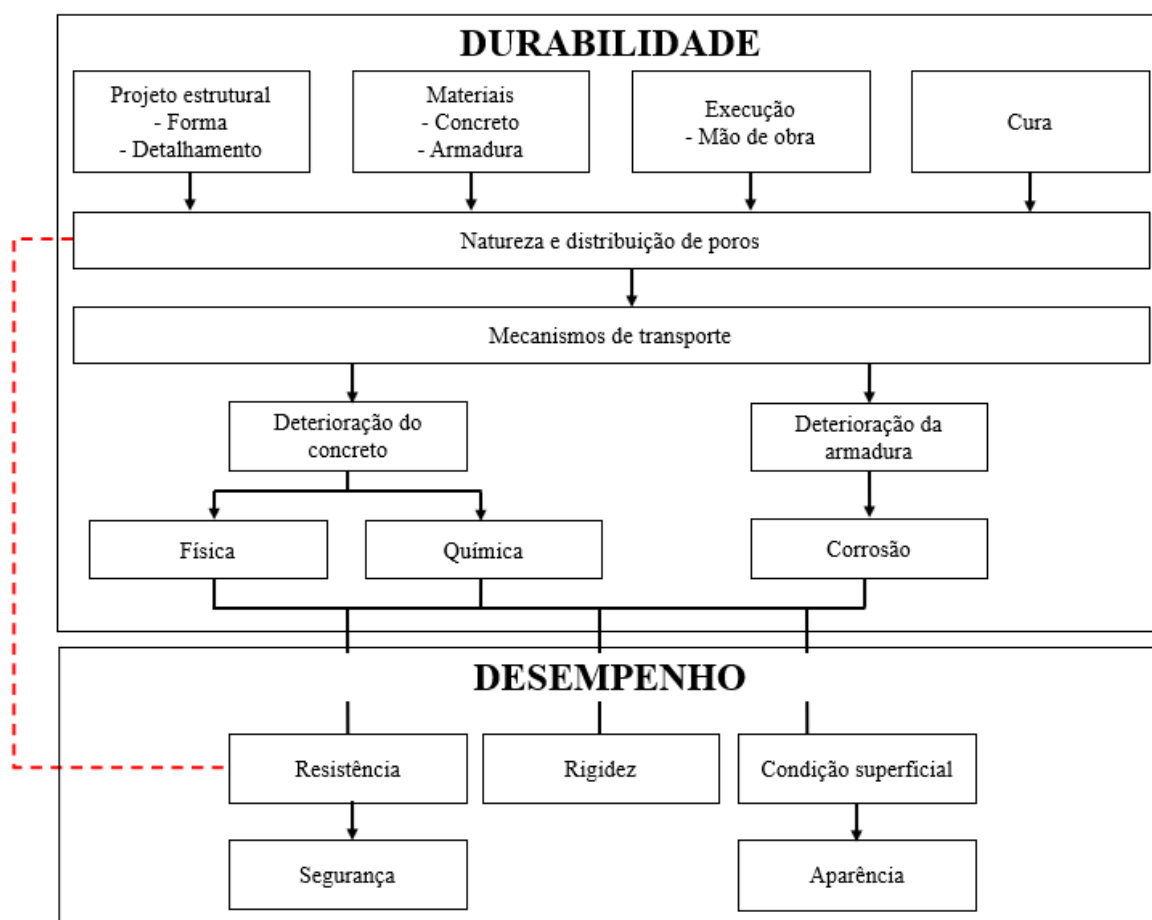
Conforme Graeff (2007), os conceitos sobre a definição de durabilidade encontrados na literatura não divergem entre si, porém ainda é encontrada uma subjetividade elevada na definição do conceito, não sendo encontrados parâmetros sobre o que é uma durabilidade elevada, tendo a classificação dependente da comparação com elementos da natureza ou alternativos de mesma função. Assim, a autora admite que a durabilidade é dada pela capacidade de uma edificação satisfazer as condições estabelecidas na sua concepção, incluindo segurança, resistência e as exigências do usuário, sendo estas mantidas por um período.

Conforme Bolina, Tutikian e Helene (2019), a durabilidade pode ser definida como o desempenho ao longo do tempo expressado quantitativamente por meio da vida útil, sendo que uma elevada vida útil pode ser considerada como sinônimo de durabilidade da estrutura. Conforme as normas NBR 15575 (2021), NBR 6118 (ABNT, 2014) e ASTM E632-81 (ASTM,

1981), a vida útil pode ser conceituada como o período de tempo no qual são mantidas as características da estrutura, sem que ocorram intervenções significativas, atendendo aos requisitos de uso, manutenção e reparos prescritos pelo projetista e construtor, sendo aplicável a todas as partes que compõem a estrutura.

No texto publicado por CEB (1992) apresenta-se uma relação entre a durabilidade e o desempenho das estruturas de concreto armado, apresentados no fluxograma, apresentado na Figura 2. Assim, com base na figura percebe-se que a redução da durabilidade das estruturas de concreto armado está diretamente relacionada ao desempenho, dado que as propriedades que garantem um desempenho adequado podem ser prejudicadas pelos processos que envolvem a deterioração. É possível compreender também que a combinação de fatores ambientais, como a temperatura, vento, umidade e agressividade do ambiente, transportados para o interior do concreto, constituem os principais elementos da caracterização da durabilidade da estrutura.

Figura 2 - Relação entre durabilidade e desempenho.



Fonte: Adaptado pelo autor com base em CEB (1992).

Stein (2019) menciona que as características da estrutura ou edificações e as condições de exposição e uso nas quais estas encontram-se submetidas estão relacionadas. Segundo Medeiros, Andrade e Helene (2011), o total conhecimento do ambiente no qual a estrutura será inserida, das características que compõe os materiais e as particularidades regionais e de uso interferem diretamente na previsão de comportamento e durabilidade dela, sendo um meio de prevenir a ocorrência de certas manifestações patológicas e na economia.

Em seu texto, Helene (2011), apresenta que a durabilidade das estruturas de concreto é dependente de 4Cs:

- a) Composição ou traço do concreto;
- b) Compactação ou adensamento efetivo do concreto na estrutura;
- c) Cura efetiva do concreto na estrutura;
- d) Cobrimento da armadura.

No Brasil, diferente de outros países que na década de 90 já preocupavam-se com as questões relativas a projetar estruturas visando a durabilidade, apenas em 2003 quando uma nova versão da NBR 6118 (ABNT, 2014) é publicada passa-se a regulamentar a necessidade de projetar visando a durabilidade, definindo classes de agressividade para os ambientes de exposição. Desta forma, a referida norma estabelece os parâmetros mínimos de qualidade a serem empregados, estabelecendo tipo de concreto, relação água-cimento e cobertura nominal da estrutura para cada tipo de elemento, considerando quatro classes distintas de agressividades do meio. A Tabela 1, apresentada a seguir, adaptada com base nas tabelas dispostas na NBR 6118 (ABNT, 2014), apresenta estes parâmetros mínimos.

Segundo Bolina, Tutikian e Helene (2019) a durabilidade está diretamente ligada a uma série de condicionantes que vão desde as etapas de elaboração até as condições de uso e operação da estrutura. Para a NBR 6118 (ABNT, 2014), a durabilidade das estruturas de concreto é diretamente dependente de fatores como: a resistência mecânica, densidade e permeabilidade do concreto, a relação água-cimento (a/c) utilizada, o local de execução e a agressividade do meio na qual será construída.

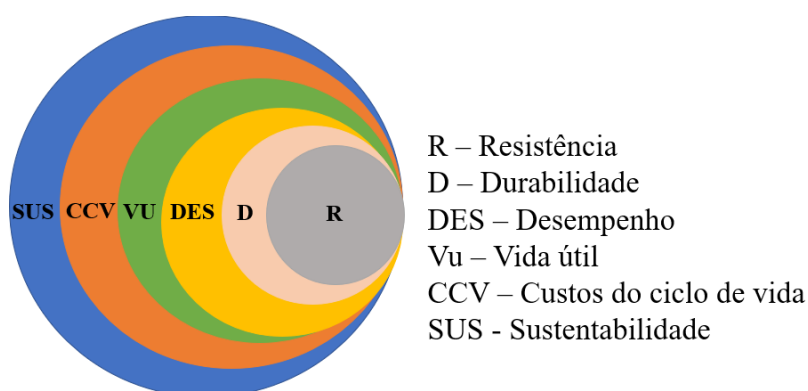
Tabela 1 – Parâmetros mínimos do concreto

Classe de agressividade ambiental		I	II	III	IV
Agressividade		Fraca	Moderada	Forte	Muito forte
Ambiente de projeto		Rural Submersa	Urbana	Marinha Industrial	Industrial Respingos de maré
Risco de deterioração da estrutura		Insignificante	Pequeno	Grande	Elevado
Relação água-cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$
Cobrimento nominal mínimo por componente (mm)	Laje	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo	25	25	40	50

Fonte: Adaptado da norma Brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014).

Questões ligadas a durabilidade e exploração dos recursos naturais, passaram a receber uma maior atenção a partir dos avanços ligados aos critérios de dimensionamento e de projeto de estruturas de concreto armado. Possan (2010) apresenta que os conceitos como desempenho, durabilidade, vida útil, ciclo de vida, foram inseridos como variáveis importantes no projeto, o que tornou possível estudos estimativos de manutenção e custos, tornando ainda os projetos voltados à sustentabilidade (Figura 3).

Figura 3 - Evolução dos projetos de estruturas de concreto



Fonte: POSSAN (2010).

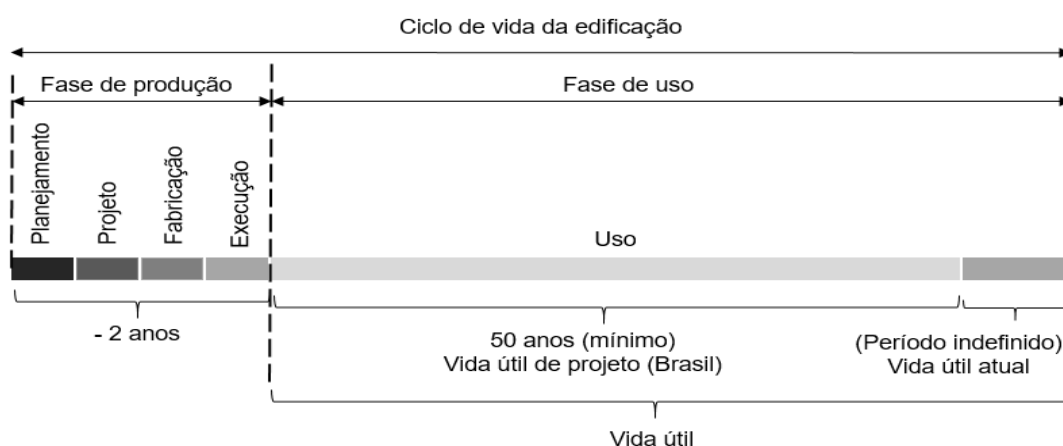
A durabilidade inadequada das estruturas manifesta-se através da deterioração (NEVILLE 2016). Apesar de todo o desenvolvimento dos conceitos acerca de durabilidade e

vida útil das estruturas, ainda é possível verificar a degradação precoce de estruturas, caracterizadas por manifestações patológicas.

Segundo Pereira da Costa (2015), às manifestações patológicas em estruturas de concreto decorrem devido a erros de projeto, execução inadequada, uso, mudanças no ambiente, materiais empregados, ou pode proceder de um conjunto destes fatores. Pesquisadores afirmam que grande parte destas manifestações são resultado de falhas de projeto e/ou execução, o que pode ser devido a desconsideração do meio no qual a estrutura estará inserida, negligência de ações ou até mesmo ao não conhecimento dos processos degenerativos existentes.

Conforme Bolina, Tutikian e Helene (2019) o surgimento de manifestações patológicas em edificações pode provir de inúmeros fatores e de diversas fontes, sendo produzidos por meio de causas simples ou combinadas. Esses problemas podem ser oriundos de falhas ocorridas em uma das cinco etapas do ciclo de vida da edificação: planejamento, projeto executivo, fabricação fora do canteiro, execução e uso, conforme apresenta a Figura 4.

Figura 4 - Ciclo de vida de edificações



Fonte: BOLINA, TUTIKIAN e HELENE (2019).

Conforme Helene (2007), cerca de 90% das origens dos problemas diagnosticados na etapa de uso é consequência de processos originados durante a fase de produção das edificações. Conforme Bolina, Tutikian e Helene (2019), diversos são os fatores que podem levar a problemas futuros, como estoques excessivos e em locais inadequados e aço vulnerável ao tempo. Da mesma forma, nas etapas de projeto e fabricação, a análise do local de construção da obra e dos resultados apresentados no programa estrutural, além dos materiais empregados, problemas com adensamento e cura podem trazer severos problemas para a estrutura.

Conforme Nepomuceno (2005), a degradação destas estruturas é dada devido a penetração de líquidos, gases e vapores, por meio dos poros ou fissuras que estão presentes na estrutura. Umidade, variações de temperaturas, presença de substâncias agressivas no meio, a porosidade do concreto e os materiais que o compõem exercem influência na interação entre o concreto e o meio ambiente.

A porosidade do concreto está diretamente ligada ao transporte de agentes agressivos no concreto. A porosidade aberta refere-se a poros abertos e interligados, que permitem desta forma o transporte de agentes agressivos no material. De acordo com CEB (1992) e Metha e Monteiro (2014), os poros que afetam o transporte de agentes agressivos no concreto são os poros capilares, que são formados devido a evaporação de água durante os processos de hidratação e cura, e os macroporos. Para Silva (2011), a conexão entre estes poros e a tortuosidade são propriedades fundamentais para a determinação da sua estrutura, sendo que somente poros interconectados participam do processo de transporte de substâncias.

De acordo com Pereira da Costa (2015), propriedades como a resistência, a durabilidade, retração e a permeabilidade são diretamente influenciados e controlados pelo número, tipo, tamanho e distribuição dos poros presentes na pasta do concreto, além dos agregados e componentes da interface matriz-agregado. Os principais fatores que influenciam na distribuição dos poros são os relacionados à cura, relação água/cimento, uso de aditivos e adições.

Para Santos (2012), a permeabilidade do concreto está ligada diretamente a vulnerabilidade da estrutura a agentes externos, ou seja, quanto mais permeável for o concreto, maior será a sua vulnerabilidade. A permeabilidade é dependente da porosidade do concreto, da forma, distribuição e dimensões dos materiais que o compõem, além do caminho que o fluido corre entre os poros. Assim, a impermeabilidade do concreto deve ser apresentada como a primeira forma de defesa a agentes externos que propiciam a degradação (NEVILLE, 1997).

Para Poggiali (2009, p. 17 e 18) entre os principais agentes de degradação das estruturas estão:

“[...] as temperaturas; a água em todos os seus estados; agentes provenientes do ar; gases (como, por exemplo, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>); agentes químicos (cloretos e sulfatos); ação de sobrecargas na estrutura, abrasão, entre outros. É importante destacar que mais de um agente de deterioração pode atuar simultaneamente no concreto. A análise em separado de cada fenômeno de deterioração impede a percepção da interação desses fenômenos na estrutura, o que pode levar a um erro de diagnóstico da patologia.”

Os mecanismos que promovem a deterioração do material, ou seja, levam a degradação das estruturas, podem ser de cunho eletroquímico, químico, físico, biológico ou mecânico. O Quadro 1 reúne as principais características de cada um desses mecanismos, baseado nas afirmações de Santos (2012) e Bolina, Tutikian e Helene (2019).

Quadro 1 – Características dos mecanismos de deterioração do concreto

Mecanismo de deterioração	Características
Eletroquímico	Corrosão das armaduras e do concreto
Químico	Alterações na aparência e composição química da estrutura, surgimento de fissuras e destacamentos de concreto
Físico	Causado por variações volumétricas, como gelo e degelo. Formação de fissuras ou perda de aderência entre partes
Biológico	Expansão dos elementos provocando fissuras, trincas e rachaduras na estrutura
Mecânico	São devidas as solicitações sofridas pela estrutura, como impactos explosões e sismos. Além de reduzir a resistência, geram fissuras.

Fonte: Adaptado com base em Santos (2012) e Bolina, Tutikian e Helene (2019).

Dentre as causas de degradação apresentadas, as relacionadas à corrosão das armaduras que compõem as estruturas merecem uma atenção especial, por tratar-se da forma de manifestação patológica mais comum na construção civil, que apresentam ainda elevado risco de colapso da estrutura. Conforme estudos realizados no final do século XX por Dal Molin (1988) e Oliveira (1999), dentre as manifestações patológicas encontradas em edificações, pontes e viadutos, as relacionadas à corrosão das armaduras apresentam a maior incidência. Desta forma, no próximo item discute-se sobre as causas relacionadas à corrosão das armaduras e os efeitos da ação de cloretos nas estruturas de concreto armado.

### 2.1.2 Corrosão das armaduras e ação de cloretos

Segundo Ribeiro (2020), a corrosão das armaduras é um processo espontâneo que pode ser definida como o processo de deterioração do material devido a ação química ou eletroquímica do meio ambiente, tendo como consequência a perda de massa do material. Conforme apresentado por Helene (1993), a corrosão das armaduras é uma das principais causas de deterioração das estruturas de concreto armado, levando ao aparecimento de falhas estruturais que podem vir a ocasionar o colapso total ou parcial da estrutura.

Dentre as formas de deterioração das armaduras, apresentadas no capítulo anterior, destacam-se as causas químicas, diretamente ligadas aos casos de corrosão das armaduras,



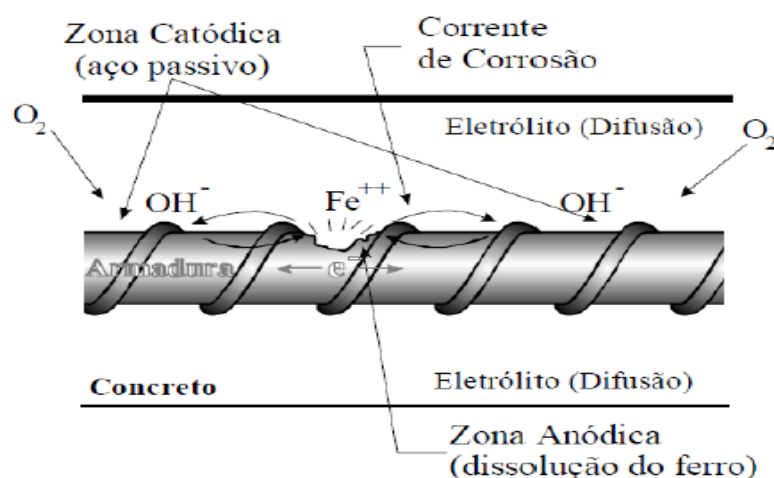
podendo ocorrer tanto na pasta de cimento, quanto nos agregados que a compõem. Este tipo de deterioração caracteriza-se comumente pela fragilização da matriz devido a transformações decorrentes de processos compostos expansivos. As causas encontram-se geralmente ligadas à exposição das estruturas de concreto a ambientes com agentes de elevada agressividade, como ácidos e bases fortes, ou ainda pelo processo da reação álcali-agregado (GRAEFF, 2007). Segundo Torres (2011), pode-se definir a corrosão das armaduras como um processo eletroquímico que tem como principal consequência a deterioração do aço, levando a perda da sua funcionalidade.

O processo corrosivo é estabelecido nas estruturas em duas etapas distintas: a iniciação e a propagação. A primeira etapa, iniciação, é a etapa na qual os agentes agressivos penetram no concreto e avançam até chegar na armadura, ou seja, é etapa em que ocorre a despassivação da armadura. Esta primeira etapa apresenta potencial de dano reduzido, devido a intensidade de corrosão ser baixa. Entretanto, durante a segunda fase, conhecida como propagação, o fenômeno é mais agressivo, começando o aparecimento de fissuras no concreto e a redução da aderência entre o concreto (TUUTTI, 1982).

Conforme apresentado por Stein (2019), o concreto, de forma geral pode-se dizer que atua como protetor das barras de aço, dada a sua elevada alcalinidade. Com o passar do tempo, os agentes agressivos vão sendo depositados pelas ações do ambiente na superfície do concreto, penetrando na estrutura por meios dos poros e fissuras presentes. Uma vez que saturados, os íons destes elementos reduzem o pH do ambiente desestabilizando a camada protetora das barras de aço, iniciando desta forma a despassivação da armadura. Ocorrida despassivação, a armadura passa a sofrer a corrosão eletroquímica.

Para que a corrosão das armaduras ocorra, é necessária a presença de três fatores: oxigênio, umidade e diferença de potencial entre dois pontos da barra de aço ou do concreto. A Figura 5 apresenta a formação das células de corrosão. O resultado do processo é um maior volume da camada de óxidos original do concreto, provocando o aparecimento de elevadas tensões de tração no concreto, o que causa fissuração e deslocamento do cobrimento do concreto.

Figura 5 - Célula de corrosão



Fonte: Cascudo (1977).

Além dos processos apresentados acima a corrosão das armaduras pode gerar também a diminuição da seção transversal das barras de aço que compõem a estrutura, ocasionando conseqüentemente a redução da aderência entre armadura e concreto. Desta forma a transferência dos esforços também é danificada, podendo levar a estrutura ao colapso (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

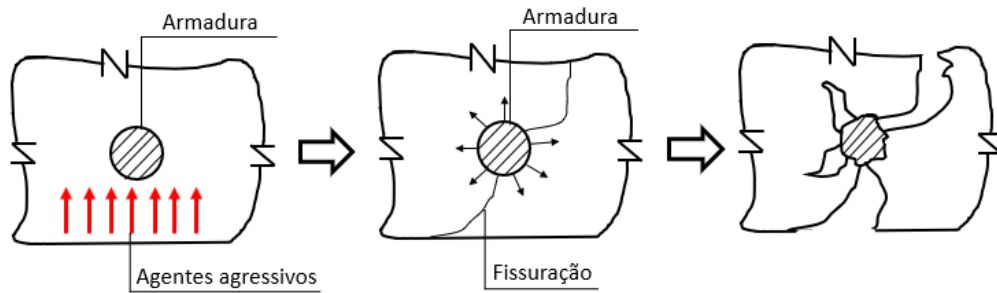
Conforme Fialho *et al.* (2019), em concordância com diversos pesquisadores sobre a corrosão das armaduras e conseqüente redução da seção transversal das barras, o elevado pH do concreto é uma das principais barreiras contra os agentes oxidantes que podem atuar na armadura. Contudo, quando ocorre a redução do pH do concreto o mesmo torna-se vulnerável ao processo corrosivo, devida a dissolução da película protetora do aço. Aliado a este fator a presença de umidade no interior da peça, diferença de potencial ou agentes agressivos presentes, tem-se a ocorrência da corrosão propriamente dita da armadura.

Em seu texto Helene (1986), com o aumento das tensões internas, surge a fissuração em direção paralela a armadura corroída, facilitando desta forma o surgimento da carbonatação e a penetração dos agentes nocivos ao concreto, podendo levar ainda ao lascamento do concreto. Ocorrido isso, os agentes agressivos passam a atacar a armadura, promovendo a sua despassivação e conseqüentemente a redução de seção das barras que compõem a armadura. A Figura 6, apresentada na seqüência, apresenta o processo descrito.

Autores como Andrade (1992), já apresentavam em seus estudos que os principais agentes agressivos que podem promover a despassivação das armaduras no interior do concreto

são a presença de cloretos e a carbonatação do concreto, apesar de que outros mecanismos como a elevada fissuração, presença de fungos e reações expansivas também possam atuar. Neste trabalho o foco será apenas na despassivação ocasionada por íons de cloreto.

Figura 6 - Processo de corrosão das armaduras



Fonte: Adaptado pelo autor com base em Helene (1986).

Conforme diversos autores, a corrosão causada pelo ataque de íons cloretos é uma das formas mais agressivas de deterioração do concreto armado. Conforme Cascudo (1997), no Brasil a importância desta forma de degradação é de grande importância, dado o considerável número de cidades situadas na faixa litorânea. Segundo Kim e Bumadian (2017), o impacto socioeconômico gerado pelos danos induzidos pelos cloretos é significativo, das as quantidades de intervenções de manutenção e reparo de elementos estruturais deteriorados pelo fenômeno.

A contaminação dos concretos por cloretos pode ocorrer devido a contaminação dos materiais constituintes do concreto, como a areia ou água ou devido ao uso de aditivos que em sua formulação contenham cloretos. Entretanto para esta forma de contaminação existem normativas internacionais que sugerem valores máximos de cloretos admissíveis na massa do concreto enquanto fresco, visando a redução do risco de despassivação da armadura. Outra forma de ocorrência de contaminação dos concretos por cloretos é devido ao ambiente no qual a estrutura encontra-se inserida, como ocorre em ambientes marinhos.

Segundo Graeff (2007), em sua forma cristalina os cloretos não ameaçam a estrutura, devido aos seus cristais apresentarem dimensões maiores que a dos poros do concreto. Entretanto, o problema surge quando estes cristais depositados na superfície das estruturas são diluídos pela água e entram em solução, permitindo assim a migração para o interior do concreto através da sua estrutura de poros. Ainda conforme a autora esta última situação é a mais comumente encontrada, principalmente em ambientes marinhos ou em locais de clima frio, onde é necessária a utilização de sais para o degelo. Com o passar do tempo, o acúmulo desses

íons de cloreto em torno das barras da armadura passam a provocar a despassivação da armadura.

Conforme estudos realizados por Uji *et al.* (1990) Stanish *et al.* (1997) e Basheer *et al.* (2001), o transporte dos cloretos no concreto é complexo, incluindo mecanismos como a permeabilidade, difusão e absorção, podendo estes ocorrer de forma isolada ou em combinação dos três. Para a permeabilidade, é necessária a presença de um gradiente de pressão. No caso da absorção, a penetração é dada pela sucção capilar dos poros, sendo este o mecanismo de transporte mais comum para concretos não saturados. No caso dos concretos saturados, a difusão é o processo estudado, sendo que ao exposto a uma solução de cloretos um gradiente de concentração é criado entre a superfície do concreto e a solução de poros.

Gojrv (2015), afirma que a penetração de cloretos em estruturas de concreto submetidas a ambientes com elevado teor de concreto pode ocorrer de maneira diferente. No concreto sem fissuras, por exemplo, a penetração ocorre principalmente por absorção capilar e difusão. Em estruturas sujeitas ambientes de elevada agressividade, a difusão iônica é o mecanismo de transporte mais comum, dada a elevada espessura da camada de cobrimento que leva a teores de umidade elevados.

Para autores como Mota *et al.* (2012), Figueiredo e Meira (2013), Neville (2015) e Meira (2017), os íons cloretos penetram nos poros do concreto e chegam nas proximidades da armadura em conjunto com a água e o oxigênio, desestabilizando pontualmente a capa passivadora, propiciando assim a instauração do processo corrosivo. As principais teorias que buscam explicar a ocorrência deste fenômeno consideram que a ruptura da camada passiva do concreto seja algo dinâmico, com ciclos de despassivação e repassivação, até que ocorra de forma definitiva. Da mesma forma é considerado que este efeito ocorra de forma pontual.

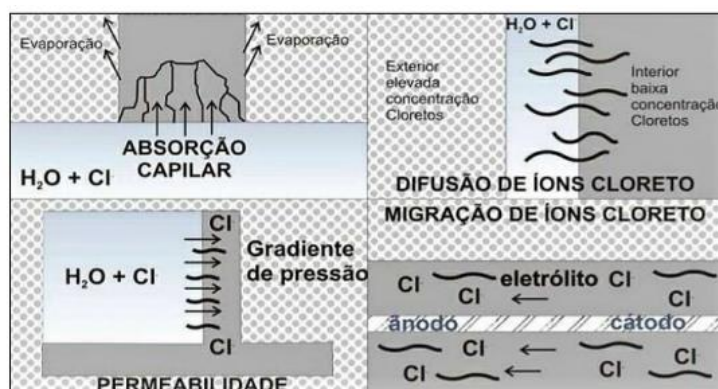
Fatores como o fluxo da substância e sua concentração total, o tipo de estrutura, o ambiente e a velocidade de renovação dos agentes agressivos, a distribuição, conectividade e tortuosidade dos poros, abertura de microfissuras e o grau de saturação do sistema poroso são os principais mecanismos que envolvem o transporte das substâncias agressivas no concreto (SILVA 2011). Entretanto, conforme Cascudo (1997), as características da estrutura porosa da pasta de cimento na sua forma endurecida é o mecanismo que exerce maior influência no transporte dos agentes agressivos no concreto.

O transporte de íons agressivos ao concreto pode ocorrer por mais de um fenômeno, sendo conforme FIB (1999):

- Permeabilidade: fenômeno relacionado com a existência de uma pressão interna. Ocorre quando o concreto apresenta diferença de pressão em distintas zonas do concreto, sendo que os cloretos buscam as zonas com a menor pressão hidráulica;
- Difusão: relacionada com um gradiente de concentração. Ocorrem diferenças de concentração dos agentes em diferentes zonas do concreto;
- Absorção capilar: gerada sob a presença de uma pressão interna. Ocorre devido a diferença de teor de umidade, visto que os cloretos sempre deslocam-se para as zonas com menor teor de umidade;
- Migração: relacionada com o efeito de um campo elétrico. Os íons negativos migram em direção ao anodo, zona de menor potencial elétrico;

A Figura 7 apresenta os principais mecanismos que envolvem o transporte dos íons cloretos em estruturas de concreto armado.

Figura 7 - Mecanismos de transporte



Fonte: Helene (1993).

Frente ao exposto, diversas são as alternativas que vêm sendo estudadas buscando reduzir a ação destes agentes nocivos a estruturas de concreto armado. A Universidade Federal do Rio Grande do Sul, detém diversos destes estudos, como o desenvolvido por Pereira da Costa (2015), que avalia o ingresso de cloretos em concreto com o uso de fibras, e o de Caetano (2019), que busca avaliar a aplicabilidade de agregados de cura interna para concretos. Desta

forma, este estudo estudará o uso de agentes de cura interna visando a redução deste ingresso de cloretos na estrutura e buscando uma redução da corrosão das armaduras que compõem o concreto armado.

## **2.2 PRINCÍPIOS DA HIDRATAÇÃO EM CONCRETOS E O PAPEL DA CURA INTERNA**

Neste item serão abordados os fundamentos relacionados à hidratação de concretos, bem como relacionados à retração. O capítulo aborda também a técnica de cura interna, bem como revisados de forma breve, alguns dos conceitos e mecanismos que envolvem o processo de liberação de água para misturas cimentícias durante a hidratação para concretos com relação água/cimento reduzida. Além disso, será apresentado um breve histórico sobre os materiais empregados como agentes de cura interna.

### **2.2.1 Considerações Iniciais**

Conforme estudos realizados no início do século XX, hoje conhecida como a Lei de Abrams, estabeleceu-se uma relação direta e significativa entre a resistência à compressão e a relação água/cimento, ou seja, a quantidade de água incorporada no concreto influencia no seu desempenho quando endurecido.

Caetano (2019), afirma com base em diversas bibliografias clássicas que a partir destes estudos compreendeu-se que o excesso de água utilizado para obter uma trabalhabilidade adequada, ocasionava repercussões negativas no concreto, afetando por exemplo a formação de poros e conseqüentemente a sua resistência e durabilidade. Uma saída foi a tentativa da redução da relação a/c utilizada, que proporcionou impactos positivos em termos de resistência e durabilidade, porém acarretou em dificuldades na sua trabalhabilidade.

As abordagens acerca dos fatores que influenciam diretamente no processo de hidratação das misturas cimentícias são amplamente abordados, ficando claro que tanto para o estado fluido quanto para o estado endurecido do concreto que a disponibilidade hídrica tem importante influência no desempenho destes concretos. O teor de umidade da mistura tem papel fundamental em fatores como a velocidade de hidratação e na estrutura de poros, por exemplo..

Hover (2011), afirma que a quantidade de água na mistura fresca influencia diretamente na porosidade apresentada por concretos no estado endurecido, podendo afetar em fatores como na resistência, durabilidade e na deformação lenta do concreto. O autor apresenta ainda que a quantidade de água é responsável por boa parcela da retração e pela trabalhabilidade das misturas.

### **2.2.2 Hidratação De Matrizes Cimentícias**

A hidratação do concreto é dada como as reações entre o cimento e a água disponibilizada que ocorrem com o passar do tempo, originando uma matriz resistente. Desde o início do século XX, pesquisadores preocupam-se com a relação água/cimento utilizadas em matrizes cimentícias. A Lei de Abrams, desenvolvida na época, estabelece o princípio entre a relação direta e significativa entre relação  $a/c$  e resistência à compressão. Posteriormente, com os avanços tecnológicos e novos estudos na área foi possível perceber que a água utilizada para obter trabalhabilidade ocasionava em certas situações reações negativas à durabilidade e à resistência de concretos.

Como forma de mitigar os problemas relacionados à resistência e durabilidade, tentou-se reduzir gradativamente a relação  $a/c$  presentes nas misturas, fazendo com que além da dificuldade de trabalhabilidade os pesquisadores se deparassem com problemas relacionados a auto dessecação na matriz e, conseqüentemente, à retração autógena dos concretos. Segundo Kovler e Jensen (2007), enquanto para concretos tradicionais a retração autógena pode ser desconsiderada, para os concretos com baixa relação  $a/c$  e elevada resistência o mecanismo pode ser responsável por cerca de 50% da retração sofrida pela mistura. Lura (2003), explica ainda que a demanda hídrica decorrente das reações químicas de hidratação do concreto aumenta durante o processo. Na ausência de água disponível ocorre o consumo de água de canais cada vez mais estreitos, acarretando a auto dessecação.

O excesso ou a falta de água em uma mistura reflete em mudanças volumétricas, que podem influenciar na estruturação da rede de poros da mistura, como no surgimento de fissuras, que são a porta de entrada para agentes nocivos à estrutura. Pode-se apresentar uma distinta gama de formas de variação volumétrica, como a retração autógena.

Em sua pesquisa, Bentz (2002), ressalta que em misturas com disponibilidade hídrica reduzida, onde os teores de umidade relativa reduzem fortemente com o avanço das reações de

hidratação pode ocorrer escassez de água livre, ocasionando a interrupção da hidratação. Desta forma, muitos dos grãos de cimento não encontram umidade para realizar o processo de hidratação, resultando assim em um quadro de hidratação incompleta, típico de misturas com teores de água/cimento reduzidos.

Ao reduzir a relação água/cimento, os poros capilares e abertos também reduzem, o que pode levar a uma diferença na permeabilidade de aproximadamente 10 vezes em relação a concretos com altos fatores água/cimento, sendo que a cura também exerce um papel fundamental no transporte de massa do concreto. A permeabilidade é evidente quando realiza-se cura úmida ao invés da cura ao ar, visto que a úmida pode levar a retração do concreto, e conseqüentemente o ingresso de agentes agressivos.

Segundo Caetano (2019), a cura interna é uma das alternativas que vêm sendo propostas e investigadas para viabilizar o uso de relações água-cimento reduzidas, sem que sejam gerados efeitos negativos à mistura. O uso desta alternativa permite efetuar uma melhor gestão da quantidade de água disponível durante o processo de hidratação do concreto, buscando favorecer a criação de concretos de alta resistência com menor probabilidade de ocorrência de fissuras.

### **2.2.3 Cura Interna**

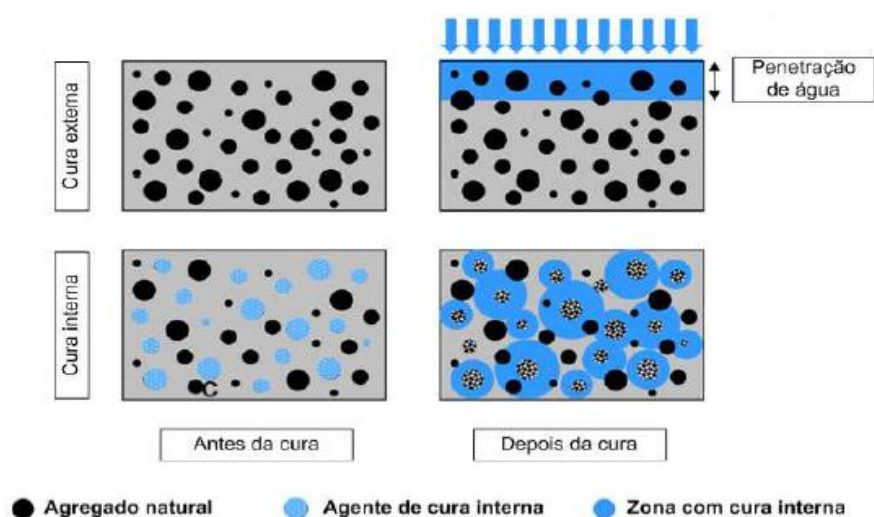
Conforme Bentur (2000), os procedimentos convencionais de cura são capazes de atingir apenas as camadas mais superficiais da estrutura, cerca de 5 milímetros (mm), não sendo o suficiente para promover a hidratação de pastas com relações a/c reduzidos. Assim a ideia da cura interna é promover pequenos reservatórios de água no interior do concreto que em um primeiro momento são capazes de reter água, que será liberada quando a umidade relativa interna da mistura reduzir, evitando que sejam consumidas as parcelas de água dos capilares mais finos, que provocariam efeitos de retração.

A técnica de cura interna consiste em introduzir à mistura os chamados agentes de cura interna, que são materiais capazes de atuar como reservatórios de água, que atuam como reguladores a fim de manter a umidade relativa interna elevada, e por consequência podem prevenir ou até mesmo reduzir os efeitos causados pela auto dessecação. Esses agentes de cura interna, são normalmente materiais porosos com capacidade de armazenar e liberar água rapidamente (CAETANO, 2019).



O Instituto Americano de concreto – ACI, define como cura interna o fornecimento de água por meio de uma mistura de cimento que fornece reservatórios de água por meio de agregados leves pré-umedecidos que fazem essa liberação de água conforme o necessário para a hidratação ou para repor a umidade perdida durante os processos de cura. Conforme Senisse (2015), o procedimento de cura externa é menos eficiente que o realizado através da cura interna, devido a água ser capaz de penetrar somente alguns milímetros (mm) na superfície do concreto. O mesmo não ocorre na cura interna, devido a água ser capaz de manter-se distribuída de forma uniforme na matriz cimentícia. A Figura 8 apresenta esta diferenciação entre os procedimentos de cura interna e externa de concretos.

Figura 8 – Cura externa e cura interna de concretos



Fonte: Adaptado com base em CASTRO *et al.* (2011)

A cura interna surgiu como uma nova tecnologia para a produção de concretos visando uma maior resistência à fissuração precoce e maior durabilidade no início do século 21. Desde então diversos pesquisadores vêm evidenciando que o uso destes reservatórios de água, apresentando resultados satisfatórios quanto ao fenômeno de retração e durabilidade, além de outros benefícios. Uma das referências mais importantes voltadas ao tema é a Norma ASTM C 1761 (2017), que define as especificações para os padrões de agregados leves usados para cura interna do concreto, sendo elaborada com base nos resultados das principais pesquisas elaboradas até a data.

### 2.2.3.1 Os Mecanismos que Envolvem a Cura Interna

Para Jensen e Lura (2007), os materiais empregados como agentes de cura interna podem apresentar princípios de funcionamento físico-químicos diferentes. Os autores apresentam que estes materiais funcionam seguindo quatro princípios, sendo eles: água quimicamente combinada, água absorvida, água capilar e água livre.

A água quimicamente combinada ocorre quando os agentes aplicados possuem água ligada quimicamente a sua estrutura molecular, sendo mantidas por ligações químicas. A água absorvida corresponde aos materiais que são capazes de absorver grandes quantidades de água entre a sua superfície, como é o caso dos polímeros superabsorventes. Já a água capilar diz respeito aos agentes de cura interna que possuem uma estrutura interna de poros significativa, tendo a água armazenada nestes poros, como é o caso de agregados leves e agregados reciclados. A cura interna está associada ao princípio da água livre, relaciona-se a técnica de micrencapsulação, sendo a água o material encapsulado que é liberado pela ruptura da parede da cápsula (CAETANO, 2019).

Conforme salientado por Jensen (2007), a água armazenada nos agentes de cura interna é a questão central para o apropriado funcionamento da cura interna. Conforme o autor esta água pode ser classificada de três formas distintas, sendo elas a quantidade total de água, disponibilidade termodinâmica de água e a disponibilidade cinética de água:

- a) quantidade total de água: é dependente da composição da mistura, das condições de cura externa e dos objetivos da realização da cura interna;
- b) disponibilidade termodinâmica de água: refere-se à maior ou menor facilidade de liberação de água pelo agente de cura interna utilizado;
- c) disponibilidade cinética: diz respeito ao alcance da água de cura interna na matriz cimentícia, ou seja, a distância entre o transporte da água do local do seu armazenamento até os pontos com risco de autodessecação.

Sabe-se ainda que as características da matriz cimentícia também impactam significativamente no transporte da água. Matrizes mais compactas, por exemplo, com reduzida quantidade de poros, limitam o alcance da água de cura interna. A granulometria e a dispersão dos materiais utilizados devem ser tratados como questão especial ao usar-se a cura interna.

A parcela de água adicionada a cada sistema segue as suas particularidades. A próxima seção aborda sobre o modelo de Powers aplicado a cura interna, modelo este que permite a determinação da quantidade de água adicional a massa cimentícia.

### **2.2.3.2 O modelo de Powers aplicado à Cura Interna**

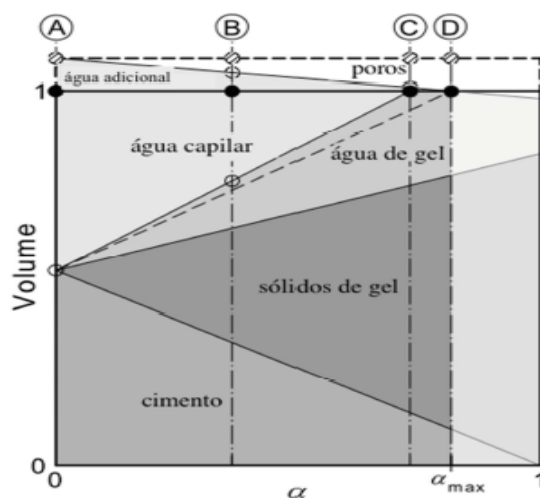
Na década de 40, os pesquisadores Powers e Bronwnyard, apresentaram as bases de um modelo para a estrutura de concreto que se tornou um clássico, sendo utilizado até hoje, apresentando eventuais adaptações, por ser o primeiro e praticamente o único que possibilita a realização de aproximações quantitativas dos volumes das fases geradas em uma mistura cimentícia hidratada. O modelo criado pelos autores não fazia distinção entre os produtos de hidratação, classificando a água presente na pasta de cimento endurecida em água capilar, água de gel e água quimicamente combinada.

A água capilar ou água livre, é definida como o volume de água livre da influência das forças de atração exercidas pela superfície sólida, estando disponível para a hidratação do cimento. As movimentações de água capilar podem gerar deformações do tipo expansão ou retração na matriz cimentícia (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Conforme Lopes, (2011) a água de gel, também conhecida como água absorvida é definida como a água absorvida em camadas moleculares sobre a superfície sólida dos poros. O autor define ainda como água quimicamente combinada, ou água não evaporável, a parcela de água consumida pelas reações de hidratação, que está combinada com os compostos hidratados.

Conforme Ordóñez (2013), o modelo de Powers é flexível, podendo ser adaptado para situações distintas, sendo utilizado tanto para a cura externa quanto para a cura interna. Sob o ponto de vista deste método, os agentes de cura interna incrementam uma quantidade de água necessária para o desenvolvimento do processo de hidratação, evitando que ocorra a auto dessecação.

A Figura 9 apresenta a distribuição de fase de uma pasta de cimento com relação  $a/c$  de 0,30 e uma adição de água de cura interna de 0,5 o que totaliza uma relação  $a/c$  de 0,35.

Figura 9 - Distribuição volumétrica das fases da pasta de cimento



Fonte: RILEM (2007).

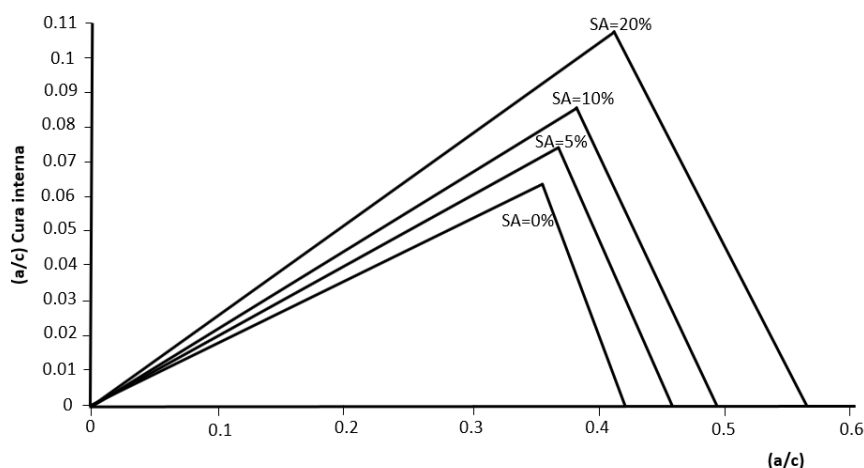
As formulações que permitem estimar a quantidade de água necessária para a cura interna estão amplamente descritas na literatura, como no trabalho de Senisse (2015). Conforme apresentado por Caetano (2019), de forma resumida, as relações entre a quantidade de água a ser incorporada e a relação  $a/c$  determinadas através das equações propostas pelo modelo de Powers são as seguintes:

$$a/c_{ic} = 0,18 \text{ para } a/c < 0,36 \text{ (Equação 1)}$$

$$a/c_{ic} = 0,064 \text{ para } a/c > 0,42 \text{ (Equação 2)}$$

Entretanto, para concretos que possuem a adição de aglomerantes secundários, como sílica ativa, este conjunto de fórmulas que permitiu chegar aos valores expostos acima precisa ser alterado. Lura (2013), propôs em seu trabalho uma nova formulação para esta condição. A Figura 10 apresenta de forma gráfica a quantidade de água que deve ser adicionada quando utilizada a Cura interna, em função da água utilizada e da quantidade de sílica ativa incorporada à mistura.

Figura 10 - Quantidade de água de cura interna em função da relação a/c sílica ativa adicionada



Fonte: Lura (2003).

## 2.2.4 Materiais Utilizados Como Agentes De Cura Interna

Segundo apresentado por Holm (1980), o uso de agregados leves para o concreto teve início nas primeiras décadas do século XIX, na qual buscava-se construir navios com uma massa total menor. Nesta época, pesquisadores procuravam reduzir a massa específica do concreto para valores na ordem de  $1750 \text{ kg/m}^3$ , mantendo a resistência em pelo menos 35 MPa. Com essa utilização a redução na carga submersa podia chegar a 50%.

Conforme Caetano (2019) a Segunda Guerra Mundial trouxe diversos avanços para a construção, ocorrendo também um grande aumento na demanda por uso de concreto leve, dado pela busca de edificar construções mais leves, que resultam em menores cargas permanentes e melhores características termoacústicas. Entretanto, foi na década de 80 que os estudos se aprofundaram, sendo que os resultados apresentados em 1992 mostraram que é possível produzir concretos com agregados leves com elevada resistência.

Deste ponto em diante abriram-se novas possibilidades para a aplicação deste tipo de construção, como no emprego destes agregados como reservatórios de água internos ao concreto. Ainda na década de 1980 Holm retomou os estudos de agregados leves para concreto estrutural utilizado em ambiente marinho, verificando um excelente desempenho ao intemperismo da zona marítima. Este comportamento satisfatório foi dado pela resistência à microfissuração do concreto, baixa permeabilidade e a combinação de um maior consumo de

cimento e de água disponível no agregado leve, ocorrendo desta forma uma cura interna no elemento.

Conforme Philleo (1991), apesar dos estudos realizados anteriormente, apenas a partir da década de 1990 que os estudos ligados à utilização de materiais para cura interna ganhou espaço, sendo cada vez mais conhecida e empregada na literatura. O autor citado pode ser considerado como um dos pioneiros na utilização de agregados como agentes de cura interna no concreto buscando uma maior durabilidade das estruturas, entretanto nos anos 90 diversos autores apresentavam sobre o assunto como Hammer (1992), Weber e Reinhardt (1996 e 1997), Kohno *et al.* (1999) e Takada *et al.* (1999)

Atualmente, diferentes materiais vêm sendo utilizados como agentes de cura interna para o concreto. Pesquisadores como Jensen e Lura (2006), Sahmaran *et al.* (2009), Senisse (2015) e Caetano (2019), vem estudando distintos materiais para avaliar a capacidade de garantir a liberação da quantidade adequada de água no momento adequado, visando controle da auto dessecação durante as reações de hidratação do concreto.

Conforme citado nos trabalhos de Jensen e Lura (2006) e Esteves (2009), os materiais empregados como agentes de cura interna devem possuir características adequadas para o devido fim. Estes materiais devem ter a capacidade de resistir ao processo de mistura sem liberar água antes do início da pega do concreto. Os autores citam ainda que as características termodinâmicas e cinéticas estão relacionadas com a umidade relativa e interna e com o transporte de umidade, sendo estes parâmetros relacionados com as propriedades do material empregado, como a sua capacidade de absorção de água e a dimensão do reservatório do agente.

Os primeiros estudos acerca do assunto, desenvolvidos no final da década de 1960, utilizavam como agentes de cura interna os agregados leves. O uso deste material se justifica pela elevada porosidade e capacidade de transporte ao comparado com agregados convencionais. Posteriormente, passou-se a empregar os polímeros superabsorventes (SAP) para promover a cura interna, material este que é expansível e capaz de absorver uma elevada quantidade de líquidos em seu interior, apresentando desta forma uma das melhores opções para a cura interna.

Jensen e Lura (2007) afirmam que os agregados convencionais também podem conter água no seu interior, podendo auxiliar desta forma na cura interna de concretos. Este

comportamento é diretamente dependente do tipo de rocha utilizado, sua porosidade e capacidade de absorção de água. Os autores afirmam ainda que rochas com porosidade próximas a 25%, como as rochas calcárias, permitem a obtenção de teores de água suficientes para a ocorrência da cura interna.

Como forma de reutilização de materiais provenientes da construção civil, o uso de agregados reciclados para diferentes fins ganha cada vez mais espaço. Pesquisadores como Jansen e Lura (2007), Senesse (2015) e Amaral (2019) e Cordeiro de Souza *et al.* (2020) vêm estudando a utilização destes materiais como agregados de cura interna para o concreto. Jensen e Lura (2007), apresentam que os agregados reciclados podem apresentar uma capacidade de absorção de água maior que os agregados convencionais, dada a presença de argamassa nos grãos. Entretanto, as características deste material podem ser extremamente variáveis em função da composição da mistura utilizada.

Desta forma decidiu-se utilizar nesta pesquisa dois agregados reciclados como agentes de cura interna: casca cerâmica proveniente da microfusão e a argila expandida. A casca cerâmica é um material proveniente do pós-processamento de um resíduo da indústria siderúrgica, resultante do descarte do material cerâmico que é utilizado como molde para microfusão de peças metálicas que precisam de uma elevada precisão, sendo utilizado para produção de peças das mais distintas áreas, como têxtil, médica e alimentícia. Já a argila expandida é um material proveniente da queima da argila natural, sendo amplamente utilizado como material drenante na construção civil e no paisagismo. Ambos os resíduos vêm sendo aplicados como substitutos do cimento, apresentando resultados satisfatórios tanto em termos de resistência quanto de durabilidade.

O estudo realizado por Caetano (2019), mostrou que a casca cerâmica apresenta-se eficiente como agente de cura interna, apresentando um bom comportamento mecânico e ao ataque de cloretos ao comparado com outros agentes de cura interna. Assim como para a casca cerâmica, os estudos realizados com argila expandida por Zang, Li e Paramasivan (2005) e De La Varga (2012) apresentaram um melhor comportamento mecânico ao comparados com outros traços executados.

### **2.2.5 Cura Interna E Durabilidade**

Da mesma forma que o aumento do grau de hidratação do concreto proporciona melhora nas propriedades mecânicas, ocorrem efeitos potencialmente benéficos em relação a

durabilidade, dada a redução da porosidade e tamanho dos poros, dificultando a entrada de agentes agressivos (CAETANO, 2019). Diversos são os aspectos ligados à cura interna que apresentam potencial de trazer respostas positivas à durabilidade também. Características como o maior grau de hidratação, redução das tensões internas, redução da porosidade e redução do aparecimento de fissuras vem sendo estudadas e discutidas amplamente.

Diferentes técnicas de ensaios e materiais vem buscando verificar os impactos na durabilidade dos agentes de cura interna. Cusson e Margeson (2010) e Thomas (2006), observaram em seus estudos uma redução na permeabilidade de cloretos e água de misturas com agentes de cura interna em comparação a concretos utilizando apenas agregados tradicionais.

As pesquisas desenvolvidas por Zhutovsky e Kovler (2012), permitiram visualizar que o comportamento de resistência a penetração de íons cloreto de concretos com o uso de pedra pomes apresentaram diferenças em função da relação a/c utilizada. O estudo que utilizou três relações a/c concluiu que quanto maior a relação a/c melhor o benefício do uso da técnica de cura interna, auxiliando na durabilidade do concreto.

No trabalho desenvolvido por Durán-Herrera et al. (2015) foi avaliada a penetração de  $\text{CO}_2$  em condições de exposição normais e aceleradas. Os resultados apresentaram uma redução na profundidade de penetração de dióxido de carbono em misturas utilizando agregado poroso. Entretanto este estudo ainda precisa ser aprofundado, dado que durante a exposição em condições normais verificou-se um aumento na profundidade de penetração do agente nocivo.

Na bibliografia sobre o assunto ainda é possível encontrar estudos que avaliaram o uso do agregado poroso na sua fração graúda e miúda, como agentes de cura interna. Os resultados encontrados apontam que o uso de um agregado de maior dimensão acarreta em um significativo aumento de desempenho em relação a carbonatação, o que não ocorreu com o agregado miúdo.

## **2.2.6 Síntese do capítulo**

Este capítulo sintetiza alguns dos problemas relacionados à durabilidade, desempenho e vida útil das estruturas de concreto armado convencionais. Com base no que foi apresentado, nota-se que os as propriedades do concreto, do meio nos quais a estrutura será inserida e a forma de cura utilizada para a estrutura são os principais meios de ingresso de agentes agressivos,



aliados ainda ao processo de fissuração dos concretos. Da mesma forma, tratou-se acerca dos mecanismos envolvidos na deterioração das estruturas, com ênfase em todos os processos que envolvem a corrosão das armaduras. O processo corrosivo é definido como um processo espontâneo, que ocorre devido a ação química ou eletroquímica do ambiente sobre o material, levando a deterioração do concreto e podendo levar ao colapso da estrutura, dado que o processo corrosivo pode gerar a redução de massa das barras que compõem a estrutura.

Além do mais, este capítulo discutiu sobre a cura interna, mecanismo que viabiliza a utilização e relações água/cimento reduzida sem gerar efeitos negativos a mistura, favorecendo a utilização de concretos com elevada resistência e menor probabilidade de ocorrência de fissuras que possam levar a ocorrência da degradação das estruturas. Apresentou-se no capítulo os principais conceitos ligados ao tema, como o processo de cura interna, o modelo de Powers utilizado para a determinação da água a ser incorporada na mistura, e os principais materiais que vêm sendo utilizados, como argila expandida e casca cerâmica. Abordou-se também acerca dos resultados já encontrados com a utilização desta técnica, que comprovadamente permite o uso de relações água/cimento reduzidas aliadas à durabilidade das estruturas.

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

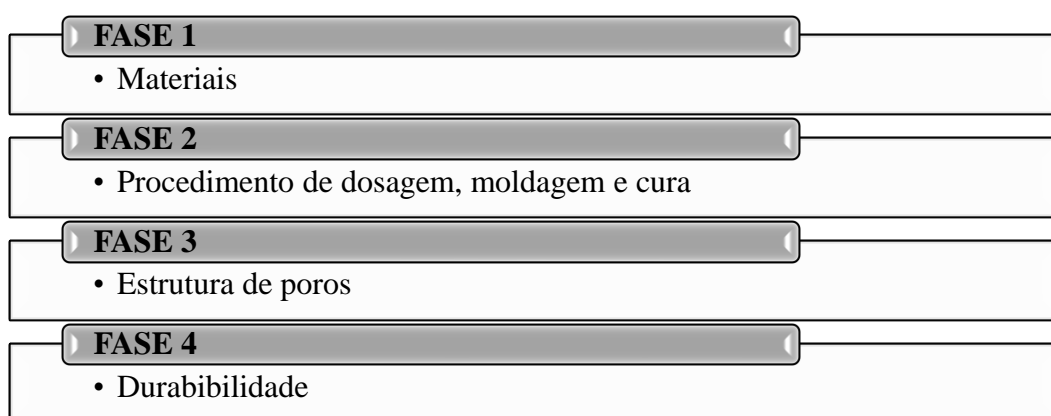
Este capítulo descreve o programa experimental de acordo com os objetivos propostos neste trabalho, possibilitando a análise quanto à durabilidade à corrosão de materiais de cura interna. Portanto, o capítulo aborda o programa experimental, expondo os materiais que serão utilizados, procedimentos e ensaios e as normativas adotadas.

Os materiais e métodos apresentados neste capítulo é dividido em 4 fases. A fase um corresponde aos materiais utilizados e sua caracterização. A fase dois diz respeito à dosagem e determinação dos teores de água utilizados para cura interna, bem como dispõe sobre a moldagem dos corpos de prova a serem analisados e os procedimentos de cura realizados.

Já na terceira fase foram realizados os ensaios destinados aos ensaios para análise da estrutura de poros dos corpos de prova.

Por fim, na fase quatro, analisa-se o comportamento mecânico e a durabilidade, ou seja, ensaios de ação de cloretos, corrosão por imersão modificada (CAIM) e análise da armadura. A Figura 11 apresenta esquematicamente todas as fases adotadas no programa experimental.

Figura 11 - Esquema do programa experimental



Fonte: Autoria Própria.

Os concretos que foram confeccionados nesta pesquisa foram denominados microconcretos, mesmo que sua mistura não possua agregado graúdo, o que os classificaria como argamassas. Entretanto, as características destas misturas realizadas diferem bastante das

misturas comumente denominadas argamassas, apresentando características mais próximas de concretos de alta eficiência.

### 3.1 MATERIAIS

Este item apresenta as características básicas dos materiais empregados para a confecção dos corpos de prova de concreto. Para a caracterização dos materiais utilizados em ensaios como ensaio de granulometria, massa específica e unitária e capacidade de absorção, realizou-se um levantamento das normativas vigentes para cada um destes, conforme é detalhado nestes itens.

#### 3.1.1 Cimento Portland

Para este trabalho utilizou-se o cimento Portland de alta resistência inicial, comercialmente conhecido como CP V-ARI da marca Nacional. Optou-se por este tipo de cimento devido ao seu elevado teor de clínquer e por ser o cimento disponível no mercado com menores índices de adições, o que traz uma menor variabilidade nos resultados da pesquisa. A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios químicos e físicos do cimento CP-V utilizado neste trabalho.

Tabela 2 - Caracterização química e física do cimento

Ensaio Químico				
Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigência
Resíduo Insolúvel - RI	NM 15 (ABNT, 2012)	%	0,82	≤ 1,0
Perda ao Fogo - PF	NM 18 (ABNT, 2012)	%	3,98	≤ 4,5
Óxido de Magnésio - MgO	NM 14 (ABNT, 2012)	%	1,28	≤ 6,5
Trióxido de Enxofre - SO <sub>3</sub>	NM 16 (ABNT, 2012)	%	3,02	≤ 4,5
Anidrido Carbônico - CO <sub>2</sub>	NM 20 (ABNT, 2012)	%	2,48	≤ 3,0
Ensaio Físico				
Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigência
Área Específica (Blaine)	NM 76 (ABNT, 1998)	cm <sup>2</sup> /g	4.805	≥ 3.000
Massa Específica	NM 23 (ABNT, 2001)	g/cm <sup>3</sup>	3,05	não aplic.
Índice de Finura # 75 mm	NBR 11579 (ABNT, 2013)	%	0,09	≤ 6,0
Resíduo na Peneira # 325	NBR 9202 (ABNT, 1985)	%	0,79	não aplic.
Água de Consistência Normal	NM 43 (ABNT, 2003)	%	30,2	não aplic.
Início de Pega	NM 65 (ABNT, 2003)	min.	152	≥ 60

Fim de Pega	NM 65 (ABNT, 2003)	min.	211	$\leq 600$
Expansibilidade à Quente	NBR 11582 (ABNT, 2012)	min.	0	$\leq 5,0$

Fonte: Autoria Própria.

### 3.1.2 Água de amassamento

Conforme a NBR 15900-1 (ABNT, 2009), as águas utilizadas para o abastecimento público são consideradas adequadas para o uso em concreto, não necessitando a realização de ensaios. Assim, será utilizada para o amassamento do concreto a água oriunda do abastecimento público do município de Porto Alegre.

### 3.1.3 Agregado miúdo

Para a composição do concreto foi utilizada como agregado miúdo uma areia fina de origem natural comercializada no município de Porto Alegre. O material foi escolhido com base em sua distribuição granulométrica, sendo priorizada uma granulometria fina e contínua.

O material foi caracterizado quanto a granulometria, massa unitária massa específica e massa específica aparente, seguindo os procedimentos de suas normativas, NBR NM 248 (ABNT, 2003), NBR 16972 (ABNT, 2021) e NBR 16916 (ANBT, 2021), respectivamente. A Tabela 3, sintetiza os resultados da caracterização do material.

Tabela 3 - Caracterização da areia

Abertura das Peneiras (mm)	Massa retida (%)	Retido Acumulado (%)	Retido - recomendação da ASTM C1761 (2015) Retido (%)
9,5	0,00	0,00	0,00
6,3	0,00	0,00	-
4,8	1,00	1,00	0-15
2,4	5,00	6,00	-
1,2	11,70	17,70	20-60
0,6	22,98	40,68	-
0,3	36,82	77,50	65-90
0,15	18,00	95,50	75-95
0,075	4,50	100,00	-
Fundo	0,00	100,00	-

Módulo de Finura: 2,4

Massa Específica do Agregado Miúdo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ): 2,42

---

Massa Unitária do Agregado Miúdo ( $\text{g/cm}^3$ ): 1,71

---

Dimensão máxima característica (mm): 4,8

---

Fonte: Autoria Própria.

A norma ASTM C1761 (2015), reúne um conjunto de recomendações que agregados leves devem atender para assegurar o seu potencial como agentes de cura interna. Desta forma, a norma prevê a realização de ensaios que avaliam as propriedades físicas e químicas dos materiais. Os ensaios foram realizados por Caetano (2019), conforme as recomendações de cada uma das suas normativas e comparados com as exigências estabelecidas pela ASTM C1761 (2015). Na Tabela 4 encontram-se os resultados para a areia utilizada neste estudo. Na Tabela 4 também é possível verificar o atendimento ou não das recomendações descritas pela norma.

Tabela 4 - Caracterização da areia conforme a ASTM C1761 (2015)

Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigência	
Quantidade total de grumos e partículas friáveis	ASTM C142 (2017)	%	1,60	$\leq 2,0$	
Absorção total	NBR NM 52 (2003)	%	24 horas	4,40	$\geq 5,0$ após 72 horas
			72 horas	4,50	
			96 horas	5,10	
Distribuição granulométrica	NBR NM 248 (2003)	Conforme Tabela 3			
Massa unitária	NBR NM 54 (2006)	$\text{kg/cm}^3$	1.699,00	$\leq 1120,00$	
Massa específica	NBR NM 52 (2003)	$\text{g/cm}^3$	2,42	-	
Capacidade de dessorção	ASTM C1761 (2015)	%	96,00	$\geq 85,00$	
Presença de impurezas orgânicas	ASTM C40 (2016)	-	Sim - análise visual		
Perda de massa por ignição	ASTM C114 (2015)	%	0,26	máx 5,00	

Fonte: Adaptado de CAETANO (2019).

### 3.1.4 Aditivos e Adições

Como aditivo foi utilizado o aditivo 8000 da TecFlow, em função da melhor trabalhabilidade de concreto. Foi adicionado ainda ao traço um teor de 10% de sílica ativa em pó em relação ao peso do cimento. Para a adição deste material foram seguidas as especificações do método de dosagem Mehta-Aitcin.

### **3.1.5 Materiais porosos**

Os materiais porosos para esta pesquisa foram selecionados com base nos estudos realizados por Caetano (2019), sendo empregados desta forma o resíduo britado da casca cerâmica para microfusão, que será chamado apenas de casca cerâmica, e a argila expandida. Estes materiais vêm sendo utilizados por diversos pesquisadores como agentes de cura interna para concretos, além de serem materiais comercializados no território nacional que possuem forma granular. A seguir são apresentadas as particularidades de cada um destes materiais selecionados.

Ambos os materiais utilizados necessitam de um processamento prévio para sua utilização como agentes de cura interna, além da retirada de impurezas misturadas ao material. Os materiais já apresentavam-se na forma granular, sendo necessário apenas o peneiramento visando a retirada de frações inferiores a 0,3mm e superiores a 4,8mm.

#### **3.1.5.1 Resíduo britado da casca cerâmica para microfusão**

Este material já vem sendo utilizado por pesquisadores do LEME/UFRGS. A casca cerâmica, como será denominada neste trabalho, é oriunda do pós-processamento de um resíduo da indústria siderúrgica, resultante do descarte do material cerâmico que é utilizado como molde para microfusão de peças metálicas que precisam de uma elevada precisão, sendo utilizado para produção de peças das mais distintas áreas, como têxtil, médica e alimentícia. O material utilizado para as moldagens encontrava-se na faixa granulométrica de 0,3 mm à 4,8mm.

Os resíduos utilizados neste trabalho já encontravam-se no LEME/UFRGS na forma processada, sendo necessário apenas o seu peneiramento. O material utilizado é uma fração do mesmo lote utilizado por Caetano (2019). A Figura 12 ilustra o material já na sua forma bruta.

Figura 12 - Casca cerâmica utilizada



Fonte: Autoria Própria.

O material foi caracterizado quanto às suas propriedades físicas, seguindo os parâmetros determinados pela NBR 16916 (ABNT, 2021) acerca dos ensaios de determinação de massa específica e massa específica aparente. A Tabela 5, apresenta os resultados dos ensaios realizados.

Tabela 5 - Caracterização da casca cerâmica

Abertura das Peneiras (mm)	Massa retida (%)	Retido Acumulado (%)	Retido - recomendação da ASTM C1761 (2015) Retido (%)
9,5	0,00	0,00	0,00
6,3	0,00	0,00	-
4,8	1,90	1,90	0-15
2,4	34,90	36,80	-
1,2	23,40	60,20	20-60
0,6	23,30	83,50	-
0,3	14,50	98,00	65-90
0,15	1,00	99,00	75-95
0,075	0,00	99,00	-
Fundo	1,00	100,00	-

Módulo de Finura: 3,72

Massa específica da casca cerâmica (g/cm<sup>3</sup>): 2,96

Massa Unitária da casca cerâmica (g/cm<sup>3</sup>): 1,27

Dimensão máxima característica (mm): 4,8

Fonte: Autoria Própria.

Na Tabela 6, encontram-se reunidos o conjunto de ensaios recomendados pela A ASTM C1761 (2015), que agregados leves devem atender para assegurar o seu potencial como agentes de cura interna.

Desta forma, a norma prevê a realização de ensaios que avaliam as propriedades físicas e químicas dos materiais. Os ensaios foram realizados por Caetano (2019), conforme as recomendações de cada uma das suas normativas e comparados com as exigências estabelecidas pela ASTM C1761 (2015).

Tabela 6 - Caracterização da casca cerâmica conforme ASTM C1761 (2015)

Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigência	
Quantidade total de grumos e partículas friáveis	ASTM C142 (2017)	%	1,22	≤ 2,0	
Absorção total	NBR NM 52 (2003)	%	24 horas	8,50	≥ 5,0 após 72 horas
			72 horas	10,40	
			96 horas	14,40	
Distribuição granulométrica	NBR NM 248 (2003)	Conforme Tabela 7			
Massa unitária	NBR NM 54 (2006)	kg/cm <sup>3</sup>	1.263,00	≤ 1120,00	
Massa específica	NBR NM 52 (2003)	g/cm <sup>3</sup>	2,96	-	
Capacidade de dessorção	ASTM C1761 (2015)	%	96,00	≥ 85,00	
Presença de impurezas orgânicas	ASTM C40 (2016)	-	Sim - análise visual		
Perda de massa por ignição	ASTM C114 (2015)	%	0,07	máx 5,00	

Fonte: Adaptado de CAETANO (2019)

### 3.1.5.2 Argila expandida

A argila expandida é fruto da queima da argila natural, fazendo com que gases fiquem retidos no seu interior levando a expansão da argila. O resultado é um material com núcleo poroso, garantindo a sua leveza, durabilidade, resistência e inércia química. Este produto é amplamente utilizado em projetos paisagismo e ajardinamento, além de ser utilizado na construção civil como isolante térmico e no preenchimento e nivelamento de pisos. Diversos trabalhos nacionais e internacionais, como o de Bentur *et al.* (2001), Sensale e Golçalves (2014) e Caetano (2019), vem utilizando materiais do tipo argila como agentes de cura interna, o que levou a definição do uso deste material como uma das variáveis de estudo.



A argila expandida utilizada, assim como a casca cerâmica já encontrava-se disponível no LEME/UFRGS, sendo uma fração do mesmo lote utilizado por Caetano (2019). Este material foi adquirido comercialmente de uma empresa que trabalha com a comercialização de revestimentos decorativos à base de argila expandida. Na Figura 13 é possível visualizar o material na forma bruta. O material utilizado para as moldagens encontrava-se na faixa granulométrica de 0,3 mm à 4,8mm.

Figura 13 - Argila expandida utilizada



Fonte: Autoria Própria.

O material foi caracterizado quanto às suas propriedades físicas, seguindo os parâmetros determinado pela NBR 16916 (ABNT, 2021) acerca dos ensaios de determinação de massa específica e massa específica aparente. Na Tabela 7 é possível visualizar os resultados encontrados durante a caracterização.

Tabela 7 - Composição granulométrica da argila expandida

Abertura das Peneiras (mm)	Massa retida (%)	Retido Acumulado (%)	Retido - recomendação da ASTM C1761 (2015) Retido (%)
9,5	0,00	0,00	0,00
6,3	0,00	0,00	-
4,8	0,01	0,01	0-15
2,4	1,20	1,21	-
1,2	56,32	57,53	20-60
0,6	35,56	93,09	-
0,3	2,60	95,69	65-90
0,15	3,20	98,89	75-95
0,075	0,11	99,00	-

Fundo	1,00	100,00	-
Módulo de Finura: 4,57			
Massa específica da argila expandida (g/cm <sup>3</sup> ): 2,04			
Massa Unitária da argila expandida(g/cm <sup>3</sup> ): 0,812			
Dimensão máxima característica (mm): 6,3			

Fonte: Autoria Própria.

Da mesma forma que realizado para a casca cerâmica, a argila expandida foi testada com base nas recomendações da ASTM C1761 (2015) quanto às suas propriedades físicas e químicas. Na Tabela 8, encontram-se os resultados para cada um dos ensaios realizados para o material utilizado neste trabalho. Os ensaios foram realizados por Caetano (2019), conforme as recomendações de cada uma das suas normativas e comparados com as exigências estabelecidas pela ASTM C1761 (2015).

Tabela 8 - Caracterização da argila expandida conforme ASTM C1761 (2015)

Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigência	
Quantidade total de grumos e partículas friáveis	ASTM C142 (2017)	%	0,37	≤ 2,0	
Absorção total	NBR NM 52 (2003)	%	24 horas	10,30	≥ 5,0 após 72 horas
			72 horas	12,80	
			96 horas	17,60	
Distribuição granulométrica	NBR NM 248 (2003)	Conforme Tabela 7			
Massa unitária	NBR NM 54 (2006)	kg/cm <sup>3</sup>	812,00	≤ 1120,00	
Massa específica	NBR NM 52 (2003)	g/cm <sup>3</sup>	2,04	-	
Capacidade de dessorção	ASTM C1761 (2015)	%	96,00	≥ 85,00	
Presença de impurezas orgânicas	ASTM C40 (2016)	-	Sim - análise visual		
Perda de massa por ignição	ASTM C114 (2015)	%	0,22	máx 5,00	

Fonte: Adaptado CAETANO (2019)

## 3.2 PROCEDIMENTO DE DOSAGEM, MOLDAGEM E CURA

### 3.2.1 Determinação do traço

Assim como Caetano (2019), utilizou-se como base para a produção dos concretos estudados um traço citado por RILEM TC 225- SAP- Newsletter nº1, que descreve a proporção

padrão de mistura utilizado para trabalhos que investigam a ação de polímeros superabsorventes (SAP) como agentes de cura interna. Apesar de não serem utilizados estes polímeros nesta pesquisa o uso deu-se por permitir realizar comparações entre os resultados já encontrados. Entretanto, algumas pequenas alterações foram necessárias no traço, dada a utilização de materiais locais.

Desta forma, o traço referência utilizado foi definido em 1:1,914 de cimento e areia, com relação a/c de 0,30 e uma adição de 10% em massa de sílica ativa. Será utilizado ainda aditivo plastificante à mistura, de forma que o espalhamento na mesa de Graff atingisse  $350 \pm 20$  ao ensaiado, conforme determina a NBR 15823-2 (ABNT, 2017). Essa metodologia de ensaio foi utilizada por Sensale e Rodrigues (2014), Assmann (2013) e Caetano (2019). A Tabela 9 com as quantidades recomendadas por RILEM TC 225- SAP- Newsletter nº1 para a produção de  $1\text{m}^3$  de concreto.

Uma vez que o modelo de Powers prevê um consumo de água adicional fixo, em função da relação água/cimento utilizada e da quantidade de sílica ativa, a quantidade a ser parcialmente substituída da areia pelo agregado poroso pode ser determinada em função da capacidade de absorção de água de cada um dos materiais a serem estudados e da relação entre as massas aparentes de cada agregado poroso e da areia. Desta forma, conforme os estudos realizados por Caetano (2019), na Tabela 10, é possível visualizar os valores teóricos da substituição da areia em cada um dos traços realizados. Na Tabela 10, o teor de substituição é apresentado em volume, assegurando que o volume de agregado poroso fosse capaz de armazenar 0,066 kg de água para cada 1 kg de cimento utilizado.

Tabela 9 - Quantitativo de materiais conforme RILEM 225 - SAP

Material	Quantitativo RILEM TC 225 -SAP (kg/m <sup>3</sup> )
Cimento CEM I 42.5 R (Schwenk)	700
Sílica Ativa (Elkem, grade 917-U)	70
Água (a/c=0,3)	210
Agregado (areia (0/4)	1218
Areia de quartzo (0,06/0,2)	121,8
Superplastificante - Glenium 51 - 1,8% do cimento	12,6

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 10 - Quantitativo de substituição do agregado poroso

Agregado poroso	% substituição (volume)
Casca cerâmica	45
Argila expandida	67

Fonte: Autoria Própria.

### 3.2.2 Determinação da quantidade de água utilizada para Cura Interna

A proporção de água a ser “reservada” no agregado para ser utilizada ao longo do processo de hidratação do concreto foi estimada com base no modelo de Powers. Conforme apresentado no Capítulo 3, a quantidade de água necessária para a cura interna é diretamente dependente da relação a/c inicialmente utilizada e da quantidade de sílica ativa presente na mistura.

Conforme apresentado no modelo de Powers apresentado no item 2.2.3.2, para um traço com relação a/c de 0,30 e uma adição de 10% de sílica ativa seria necessário acrescentar-se 0,066 kg de água para cada 1 kg de cimento. Assim como para o traço, será seguido para a quantidade de água as determinações utilizadas por Caetano (2019). A autora apresenta em seu trabalho que a relação a/c a ser utilizada é composta pela relação a/c original do traço mais a parcela de água a ser incorporada ao agregado para fins de cura interna, resultado assim, para este trabalho em um valor final água cimento efetiva ( $a/c_{ef}$ ) de 0,366.

Ainda conforme Caetano (2019), o grau de saturação empregado será o máximo, avaliando desta forma a capacidade máxima do material em atuar como agente de cura interna. Logo, a quantidade de água a ser utilizada na mistura será igual a relação a/c mais 100% do valor estimado para a cura interna pelo modelo de Powers.

### 3.2.3 Saturação do agregado, moldagem e cura

Previamente à realização da mistura dos materiais, os materiais porosos foram imersos por 24 horas na quantidade total de água que foi utilizada na mistura. Este tempo foi determinado com base em estudos que mostraram que em 24 horas submerso os materiais atingem cerca de 90% da sua capacidade máxima de absorção. Autores como Lura (2003) e Sensale e Rodrigues (2014) afirmam em seus trabalhos que a simples imersão em água não é efetiva para a obtenção da completa saturação dos agregados porosos, não garantido que o

agregado atinja em 24 horas a sua máxima saturação possível. Porém, conforme avaliado por Caetano (2019), os materiais empregados na pesquisa atingem mais de 90% da sua capacidade de absorção em até 24 horas. Desta forma, optou-se por empregar a prática de umedecimento dos agregados, que conforme citado anteriormente consiste na imersão por 24 horas dos agregados utilizados como agentes de cura interna na quantidade total de água utilizada na mistura. Assim, após as 24 horas, realizou-se a mistura dos materiais necessários, sendo os corpos de prova distribuídos em diferentes ensaios.

As moldagens foram realizadas no mesmo dia, em uma argamassadeira de 20 litros (L). A Figura 14, apresentada a seguir, mostra os materiais necessários para a realização de um dos traços, a argamassadeira utilizada. A nomenclatura utilizada para os traços moldados pode ser visualizada na Tabela 11.

Figura 14 – Materiais e argamassadeira utilizada



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 11 - Nomenclatura utilizada para os traços

<b>Traço</b>	<b>Código</b>
Microconcreto referência	REF
Microconcreto com casca cerâmica	CA
Microconcreto com argila expandida	ARG

Fonte: Autoria Própria.

Após a moldagem todos os corpos de prova foram levados para cura úmida, onde foram dispostos sobre tapetes de borracha perfurados, evitando assim o contato direto com a cal depositada na parte inferior do recipiente. Todos os corpos de prova foram mantidos em cura

úmida durante 28 dias. A Tabela 12 apresenta a quantidade de corpos de prova necessária para a realização de cada um dos ensaios previstos para este programa experimental.

Tabela 12 - Quantitativo de corpos de prova por ensaio

Ensaio	Dimensão	Quantidade de CP por traço		
		REF	ARG	CA
Absortividade	10 x 20	2	2	2
Absorção e índice de vazios	10 x 20	3	3	3
Resistência à compressão	5 x 10	20	20	20
Módulo de elasticidade	10x20	5	5	5
Penetração de cloretos	10 x 20	3	3	3
Corrosão acelerada por imersão modificada	10 x 10 x 20	2	2	2
<b>Total de corpos de prova por traço</b>		<b>35</b>	<b>35</b>	<b>35</b>

Fonte: Autoria Própria.

### 3.3 ESTRUTURA DE POROS E DURABILIDADE

Em busca de avaliar a durabilidade dos concretos com uso de agentes de cura interna, realizou-se ensaios de avaliação da durabilidade dos microconcretos confeccionados. Desta forma realizou-se ensaios relativos à estrutura de poros, resistência à compressão, módulo de elasticidade e à ação de cloretos na sua estrutura interna, tanto para os concretos produzidos com os materiais de cura interna quanto para os traços tradicionais. Realizou-se também a verificação da perda de massa da armadura em corpos de prova submetidos à corrosão.

#### 3.3.1 Absortividade

A fim de analisar a absorção de água dos concretos fabricados, realizou-se o ensaio baseado na formulação proposta por Kelham (1988) que foi adaptado por Gopalan (1996). O ensaio avalia a sucção capilar de água de corpos de prova não-saturados ao longo do tempo, desprezando-se a pressão resultante da água sobre o corpo de prova por tratar-se de uma pressão inferior à pressão resultante nos capilares.

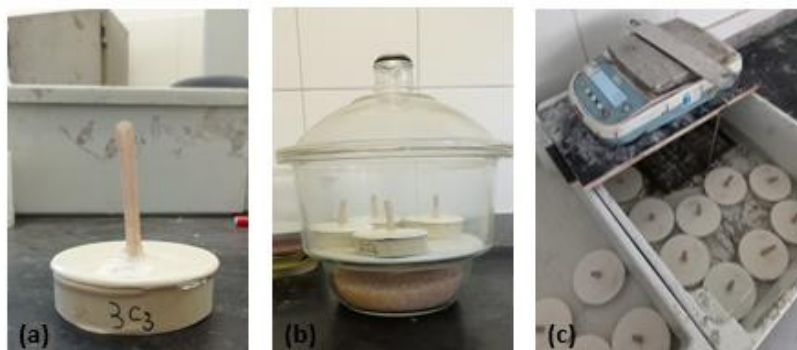
Para a realização do ensaio foram moldados dois corpos de prova de 10 x 20 cm (diâmetro x altura) de cada um dos traços executados. Estes corpos de prova devem ser preparados conforme as recomendações de Kelham (1988), seguindo ainda as alterações que

foram recomendadas por Gopalan (1996). Desta forma foram seguidos os seguintes procedimentos:

- a) cura úmida dos corpos de prova por 28 dias. Após estes corpos de prova foram cortados em fatias de 25 mm de espessura, nas quais para desconsiderar o efeito parede, apenas as fatias do centro do corpo de prova foram utilizadas;
- b) tendo as amostras cortadas, essas foram pesadas e suas massas registradas, seguindo assim para a estufa com temperatura de  $110 \pm 10$  °C, até obter constância em massa;
- c) dada a constância em massa, as fatias foram mantidas em um dessecador com sílica gel (Figura 15 (a)) por aproximadamente 24 horas para resfriar em temperatura ambiente;
- d) após resfriadas as fatias analisadas foram as suas laterais impermeabilizadas com uma membrana de látex e silicone, de forma a garantir o fluxo unidirecional de entrada de água. Na sequência foi colocada uma tampa em PVC na face superior da amostra, a qual possuirá um furo no centro ao qual é acoplada uma mangueira, a fim de garantir-se o equilíbrio de pressão (Figura 15 (b));
- e) finalizada a preparação dos corpos de prova, os mesmos foram colocados em imersão e pesados em balança hidrostática em períodos de 2, 5, 10, 15 e 30 minutos e no intervalo de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 24, 48, 72 e 96 horas (Figura 15 (c)), prosseguindo-se o ensaio até a saturação total do corpo de prova;
- f) o nível de água durante a realização do ensaio foi mantido constante, de forma que os corpos de prova foram mantidos na profundidade de submersão, inclusive no momento de realização das pesagens.

Os resultados de cada pesagem, em massa, nos intervalos de tempo determinados foram plotados em um gráfico em função da raiz quadrada do tempo. Com o gráfico gerado foi possível através da interpolação de duas retas obter-se a absorção inicial (primeira reta) e a saturação (segunda reta). O ponto de intersecção destas duas retas geradas corresponde ao ponto no qual a fase de absorção passa a ser de saturação. Já a taxa de absorção ( $\text{g}/(\text{cm}^2\text{h}^{1/2})$ ) foi obtida por meio do quociente da inclinação da reta correspondente a fase inicial de absorção e a área da seção transversal do corpo de prova. A determinação da resistência capilar ( $\text{h}/\text{m}^2$ ) foi dada pelo quadrado da divisão do valor do *nick point* (ponto de início da fase de saturação) pela espessura média do corpo de prova, em metros.

Figura 15 - Procedimentos do ensaio de absorvidade



Fonte: Autoria Própria.

### 3.3.2 Absorção e índice de vazios

Para a determinação dos índices de vazios, da absorção e da massa específica dos microconcretos estudados foi utilizado os parâmetros descritos pela NBR 9778 (ABNT, 2005). Desta forma, moldou-se três corpos de prova de 10 x 20 cm (diâmetro x comprimento) de cada um dos traços estudados, que foram mantidos em cura úmida por um período de 28 dias.

O ensaio constitui-se na secagem das amostras utilizadas e determinação de sua massa em estado seco. Após os corpos de prova foram saturados, sendo medidas novamente suas massas, desta vez na condição saturada e imersa em água. O valor correspondente à absorção de água é dado pela razão entre as diferenças de massa (saturada e seca) pela massa seca do corpo de prova. Já o índice de vazios é obtido pela razão entre as diferenças de massas saturadas e seca, pela diferença entre massa saturada e imersa. Assim foi possível calcular as massas específicas seca, saturada e real de cada uma das amostras. Na Figura 16 apresenta-se duas etapas do ensaio, a primeira (a) consiste na determinação da massa do corpo de prova e em (b) a etapa na qual os corpos de prova são submersos e levados à fervura por um período de 5 horas.

Figura 16 - Etapas de realização do ensaio de absorção e índice de vazios



Fonte: Autoria Própria.



### 3.3.3 Resistência à compressão

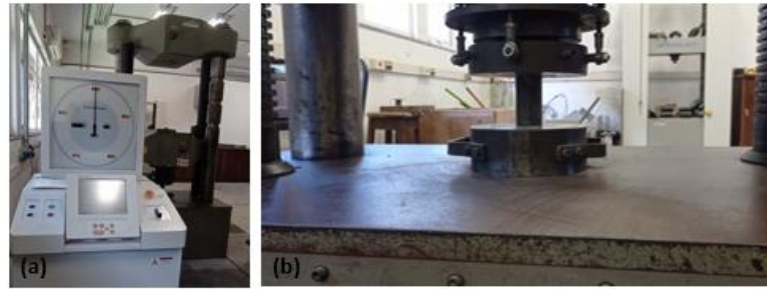
Conforme citado no início deste capítulo os microconcretos executados nesta pesquisa a fim de testar-se a durabilidade de agentes de cura interna quanto a durabilidade apresenta uma distribuição granulométrica reduzida similar a encontrada em argamassas, devido a não utilização de agregado graúdo. Entretanto, a utilização de uma relação a/c reduzida faz com que os corpos de prova moldados tenham um comportamento mecânico muito similar ao de concretos.

Para a determinação da resistência à compressão simples, adotou-se o descrito por Caetano (2019), que realizou em seu trabalho testes para definir qual o melhor procedimento para a determinação da resistência à compressão dos microconcretos produzidos. A autora comparou dois métodos descritos pelas seguintes normativas: NBR 13279 (ABNT, 2005) e NBR 12041 (ABNT, 2012), que tratam respectivamente da determinação da resistência à tração na flexão e da resistência à compressão de argamassas e as recomendações para a determinação da resistência à compressão de argamassas de alta resistência para pisos. Assim, com base nos resultados a autora concluiu que para este tipo de análise o ensaio descrito pela NBR 12041 (ABNT, 2012) se mostrou mais eficaz.

Desta forma para a realização deste ensaio moldou-se corpos de prova de 50 x 100 mm, conforme os parâmetros da normativa, sendo desmoldados após 24 horas e colocados em cura úmida, por imersão em água com cal até a idade de ruptura. A ruptura dos corpos de prova foi realizada nas idades de 3, 7 e 28 dias, sendo rompidos 4 corpos de prova para cada uma das idades. Realizou-se também a ruptura de 4 corpos de prova aos 75 dias, idade de término dos ensaios de corrosão acelerada para fins de avaliação da resistência nesta data. Antes da realização do ensaio os corpos de prova foram retificados em ambas as faces, de modo a cessar possíveis irregularidades nos mesmos.

A ruptura dos corpos de prova foi realizada em prensa hidráulica, da marca SHIMADZU, com capacidade de 2.000kN e apoios rotulados. Conforme descrito na NBR 12041 (ABNT, 2013), a velocidade de aplicação da carga durante os ensaios foi de 0,25MPa/s. A Figura 17 apresenta a prensa de realização do ensaio (a) e a disposição do corpo de prova durante o ensaio (b).

Figura 17 - Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autoria Própria.

### 3.3.4 Módulo de elasticidade

Os corpos de prova destinados ao ensaio de módulo de elasticidade, receberam procedimentos de moldagem, cura e preparação dos corpos de prova para o ensaio de módulo de elasticidade foram os mesmos realizados para o ensaio de resistência à compressão.

Para a realização do ensaio de módulo de elasticidade do concreto seguiu-se os parâmetros expostos na NBR 8822 (ABNT, 2002). Neste ensaio cada um dos corpos de prova foi submetido a 4 ciclos de carregamento, sendo utilizado em cada ciclo como patamar superior de tensão 30% do valor correspondente ao maior resultado de resistência à compressão dos corpos de prova ensaiados. Os deslocamentos entre as seções de controle foram medidos com o auxílio de LVDTs ( *Linear Variable Differential Transformer*), que foram previamente posicionados nos corpos de prova, conforme mostra a Figura 18. Os valores referentes a carga e deslocamento são monitorados, adquiridos e armazenados com auxílio de um sistema de aquisição de dados do tipo QUANTUN, sendo utilizado o software CATMAN EASY para a visualização e controle de todo o ensaio realizado.

Figura 18 - Ensaio de módulo de elasticidade

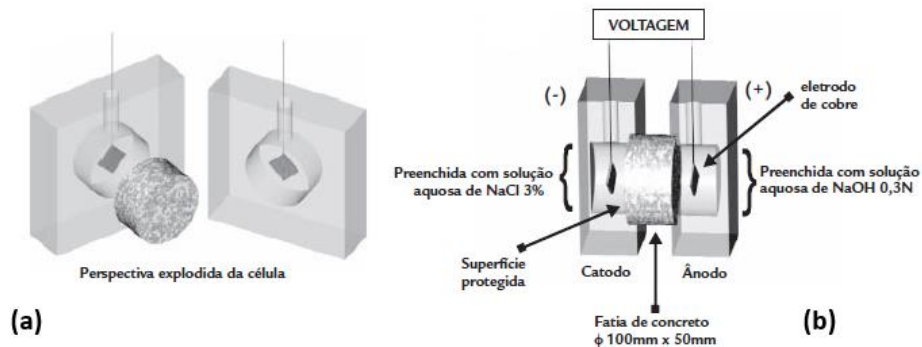


Fonte: Autoria Própria.

### 3.3.5 Penetração de cloretos

O ensaio de penetração de íons cloretos, consiste em medir a carga elétrica passante em uma amostra de concreto, conforme os parâmetros expressos na ASTM C1202 (2012). O ensaio utiliza amostras de concreto com dimensões de 9,5 cm de diâmetro por 5,1 cm de altura, submetido a aplicação de um estímulo elétrico de  $60V \pm 0,1V$  durante 6 horas. Essas amostras cilíndricas foram acopladas em meias-células de acrílico, no qual as faces foram expostas a duas soluções distintas, conforme o polo de ligação nas fontes. A meia-célula destinada ao polo positivo recebe uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) em concentração de 0,3N, enquanto a meia-célula destinada ao polo negativo recebe uma solução de cloreto de sódio (NaCl) com concentração de 3% em massa. A Figura 19 ilustra a disposição do ensaio realizado.

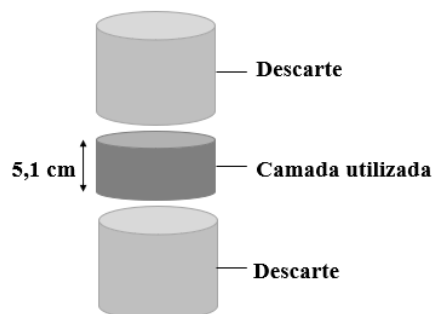
Figura 19 - Esquema de realização do ensaio de penetração de cloretos



Fonte: MEDEIROS (2008).

Para a realização do ensaio moldou-se corpos de prova de 10x20 cm que permaneceram na cura úmida por 28 dias. Após estes corpos de prova foram cortados, utilizando-se apenas suas faces centrais, conforme apresenta a Figura 20, na sequência. Para o ensaio foram cortados 3 corpos de prova de cada traço, sendo utilizada apenas a camada central de cada.

Figura 20 - Camadas utilizadas dos corpos de prova ensaiados



Fonte: Autoria Própria.

Avaliação de propriedades relativas à durabilidade de concretos produzidos com agentes de cura interna submetidos a ação de cloretos.

Após o corte, as fatias passaram por um pré-condicionamento, que consiste na aplicação de uma membrana seladora das laterais dos corpos e na imersão destes em água deionizada por 24 horas buscando a saturação dos corpos de prova. Passadas as 24 horas os corpos de prova foram superficialmente secos e acoplados às células para a realização do ensaio. Durante o ensaio a temperatura do ambiente foi mantida constante em 23°C. A Figura 21 apresenta a disposição dos corpos de prova e das fontes utilizadas durante o ensaio.

Figura 21 - Ensaio de penetração de cloretos



Fonte: Autoria Própria.

Desta forma, com as medições das corrente elétrica durante o ensaio foi possível realizar a análise da carga total passante, que conforme a referida norma é determinada por meio da Equação 3 apresentada a seguir, onde  $Q$  corresponde a carga total passante, em Coulombs,  $l_0$  é a corrente medida imediatamente após a aplicação da tensão, em Amperes e  $l_t$  é a corrente medida nos intervalos “t” minutos, em Amperes.

$$Q = 900(l_0 + 2l_{30} + 2l_{60} + \dots + 2l_{300} = 2l_{330} + 2l_{360}) \quad (\text{Equação 3})$$

A norma apresenta ainda que para amostras com diâmetros diferentes a 95 mm, foi necessária a realização de uma correção no valor total de carga passante, conforme a equação apresentada a seguir. Logo, como o diâmetro dos corpos de prova utilizados tem 100 mm, foi realizada a correção da carga. Esta relação é apresentada na Equação 4.

$$Q_s = Q_x \left(\frac{95}{X}\right)^2 \quad (\text{Equação 4})$$

Assim, tendo os valores totais de carga passante é possível classificar o concreto quanto ao risco à penetração de íons cloretos, conforme os parâmetros que estão expostos na Tabela 13.

Tabela 13 - Classificação quanto ao risco de penetração de íons cloretos

Risco de penetração de íons cloretos	Carga Passante (Coulomb)
Alto	> 4000
Moderado	2000 a 4000
Baixo	1000 a 2000
Muito baixo	100 a 1000
Desprezível	<100

Fonte: ASTM C1202 (2010).

Tendo os resultados das amostras ensaiadas para cada um dos traços moldados, adotou-se a média aritmética como valor representativo para a carga passante. Através do valor obtido classificou-se o risco de penetração de cloretos de cada um dos concretos analisados.

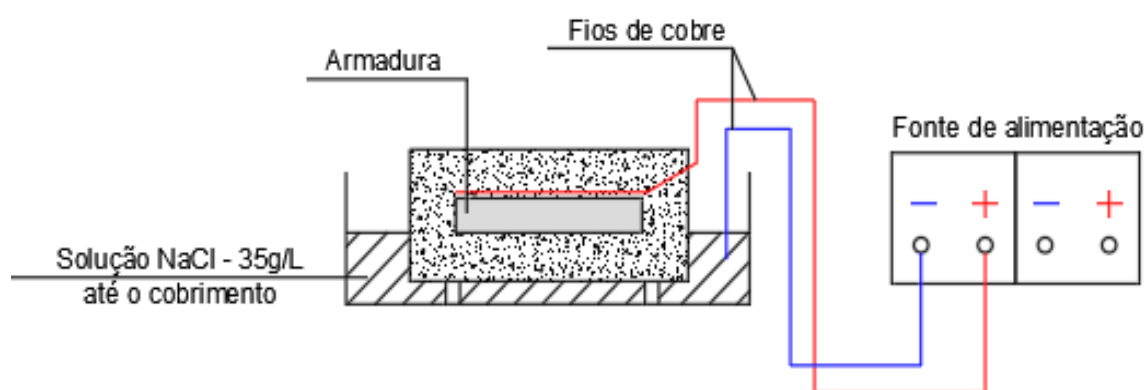
### 3.3.6 Corrosão acelerada por imersão modificada – CAIM

Para a simulação da aceleração da corrosão adotou-se o método CAIM – Corrosão Acelerada por Imersão Modificada, ensaio desenvolvido por pesquisadores da UFRGS e utilizado por diversos pesquisadores do LEME. O ensaio desenvolvido em 1990 inicialmente utilizava um recipiente de vidro sem fundo que era fixado sobre um corpo-de-prova com o auxílio de massa vedante. No recipiente era colocado uma solução de NaCl e uma placa metálica que se conectava ao polo negativo da fonte de alimentação utilizada, sendo que a barra de armadura que era inserida no corpo de prova ficava conectada ao polo positivo da fonte que por sua vez aplica uma diferença de potencial de 60V.

Com o passar do tempo, os pesquisadores do LEME reformularam o ensaio, alterando a forma de imersão, solução e posicionamento do fio que leva até a fonte elétrica. Desta forma, para a realização do ensaio será seguido os parâmetros estabelecidos no ensaio realizado por Graeff (2007). Na pesquisa a autora utilizou uma densidade de corrente de  $500\mu/\text{cm}^2$ , duas fontes capazes de fornecer corrente ou tensão constante nas faixas entre 0 e 3A para corrente e 0 a 30V para a tensão, de forma que ao ligadas em conjunto fossem capazes de fornecer de 0A a 6A de corrente e 0V a 60 V, dependendo se ligadas em série ou em paralelo. Os corpos de prova devem ainda ficar parcialmente imersos em uma solução de NaCl de 35g/l, até a altura correspondente ao cobrimento determinado para o concreto. Um fio de cobre deve ser posicionado em cima da barra de armadura, sem contato elétrico, antes da realização da moldagem das amostras, para que no momento de realização do ensaio possa ser ligado ao polo positivo da fonte, enquanto o fio ligado ao polo negativo da fonte ficará solto na solução.

Conforme estabelecido por Graeff (2007), utilizou-se corpos de prova padrão de 100 x 100 x 200mm, contendo uma barra de diâmetro de 12,5mm de diâmetro com comprimento 145mm no seu interior. Os corpos de prova permaneceram em cura úmida com temperatura constante até a idade do ensaio, aos 28 dias. A Figura 22 ilustra de forma esquemática o posicionamento da barra de ferro e do fio de cobre no interior do concreto bem como a ligação do corpo de prova à fonte.

Figura 22 - Esquema de ligação corpo de prova – fonte



Fonte: Adaptado pelo autor com base em GRAEFF (2007).

Entretanto houve a necessidade de ligar os corpos de prova em série, para a realização do ensaio de forma simultânea com todos os corpos de prova. Esta estratégia foi adotada com base no princípio da eletricidade, que afirma que em um circuito em série a corrente não se altera. Foram realizadas duas ligações em série sendo que cada conjunto continha um exemplar de cada um dos traços. Os corpos de prova foram dispostos na mesma sequência em ambas as ligações, sendo que em cada conjunto de 3 corpos de prova foram dispostos um corpo de prova de cada traço, sendo mantidos cada um destes em recipientes separados. A Figura 23 esquematiza a ligação dos corpos de prova em série.

O tempo necessário de aceleração da corrosão foi determinado com base no grau de corrosão esperado, neste caso de 10%. Para tanto, a teoria utilizada para prever o grau de corrosão desejado foi a de Faraday, teoria esta já empregada por autores como Helene (2003) e Graeff (2007). Conforme esta Lei o grau de corrosão corresponde à área sob a curva de corrente (i), no gráfico corrente x tempo, apresentado na Figura 24.

Figura 23 - Esquema de ligação dos corpos de prova em série

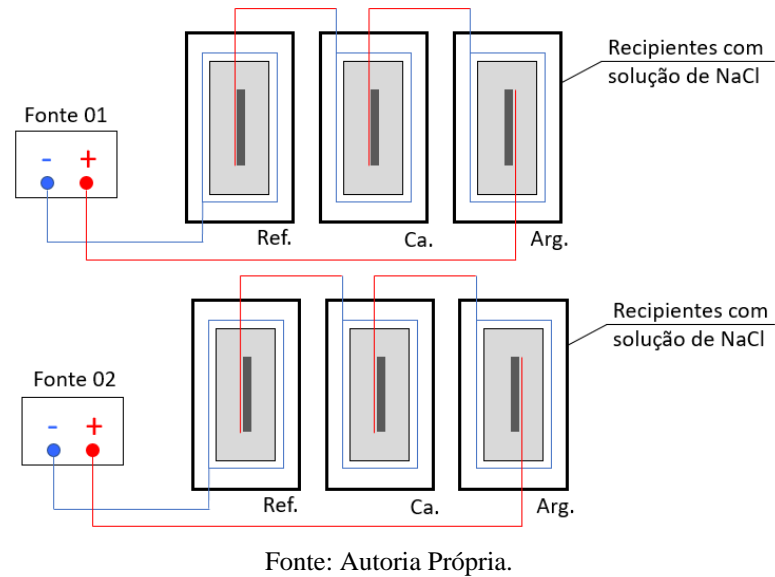
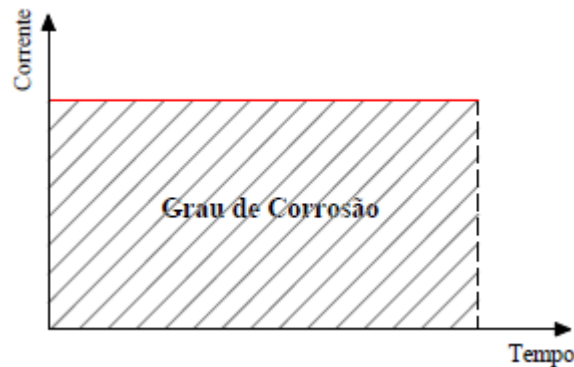


Figura 24 - Relação tempo x grau de corrosão conforme a Lei de Faraday



Fonte: Adaptado GRAEFF (2007).

Contudo, para as situações em que a aceleração da corrosão foi realizada com aplicação de corrente constante, essa área pode ser aproximada por um retângulo. Desta forma o grau de corrosão (CG), em Coulomb, é encontrado através da multiplicação do tempo (t), em segundos pela corrente (I), em Amperes, conforme apresentado na Equação 5 :

$$GC = I \times t \quad (\text{Equação 5})$$

Entretanto para que a resposta final seja dada em termos de perda de massa, a equação da Lei de Faraday pode ser reescrita da seguinte forma, expressa na Equação 6:

$$\Delta m = \frac{M \times I \times t}{z \times F} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

$\Delta m$  = massa de aço consumida, em grama

$M$  = peso atômico do metal (para o ferro = 56)

$z$  = carga iônica (=2)

$F$  = constante de Faraday (= 96500 Ampére/segundo)

Desta forma, para atingir a porcentagem esperada de perda de massa da armadura de 10%, o tempo previsto para o ensaio é de 21 dias. Conforme já verificado em diversos ensaios realizados, como por Graeff (2007), o tempo de ensaio necessário é maior que o previsto pela simples aplicação da Lei de Faraday, assim adotou-se um tempo de ensaio corrigido com base nos estudos de Graeff (2007). Desta forma, para este estudo utilizou-se 30 dias como tempo de exposição dos corpos de prova ao ensaio de corrosão acelerada. A Figura 25, apresenta os corpos de prova dispostos durante a realização do ensaio.

Figura 25 - Ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada realizado



Fonte: Autoria Própria.

### 3.3.7 Determinação da perda de massa da armadura

Após a realização do ensaio de corrosão, realizou-se o ensaio para a determinação da perda de massa da armadura inserida nos corpos de prova. Para tanto, os corpos de prova foram rompidos de forma manual, permitindo com que a barra presente em seu interior fosse retirada. A Figura 26, apresenta as barras após a retirada do interior do concreto.



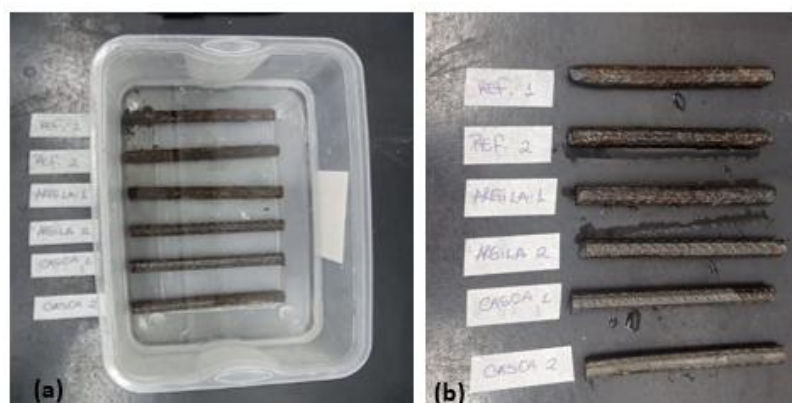
Figura 26 - Barras após a remoção do interior do concreto



Fonte: Autoria Própria.

A seguir realizou-se a limpeza das barras conforme expresso na ASTM G1-03 (2003). O procedimento consiste na imersão das barras em uma solução de 3,5 g de hexametileno tetramina diluído em 500 ml de ácido clorídrico e 500 ml de água reagente, durante 40 minutos. Passado este período as barras foram limpas com água corrente, de forma a retirar possíveis resíduos ainda presentes nas barras e levadas à estufa para a secagem em temperatura média de 25°C por um período de aproximadamente 30 minutos. A Figura 27 abaixo apresenta as barras em imersão na solução (a) e as barras antes da secagem em estufa (b).

Figura 27 - Procedimento de limpeza das barras



Fonte: Autoria Própria.

Tendo as barras completamente limpas realizou-se a pesagem das mesmas, sendo calculado o valor da perda de massa devido ao processo corrosivo. O grau de corrosão da barra

é determinado pela relação entre a massa inicial da barra, registrada antes da concretagem de cada um dos corpos de prova, e a massa final após o processo corrosivo, conforme apresenta a Equação 7.

$$GC (\%) = \frac{m_{\text{consumida}}}{m_{\text{inicial}}} \times 100 \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

CG: grau de corrosão, em percentual

$m_{\text{consumida}}$ : massa consumida pelo processo corrosivo, em gramas

$m_{\text{inicial}}$ : massa inicial da barra, em gramas.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes a cada um dos ensaios realizados em conjunto com a sua análise e interpretação, visando atingir o objetivo principal e os objetivos específicos desta pesquisa. Todos os dados exibidos nos tópicos a seguir foram tratados de forma a eliminar os valores espúrios com o auxílio do software Excel.

#### 4.1 ESTRUTURA DE POROS

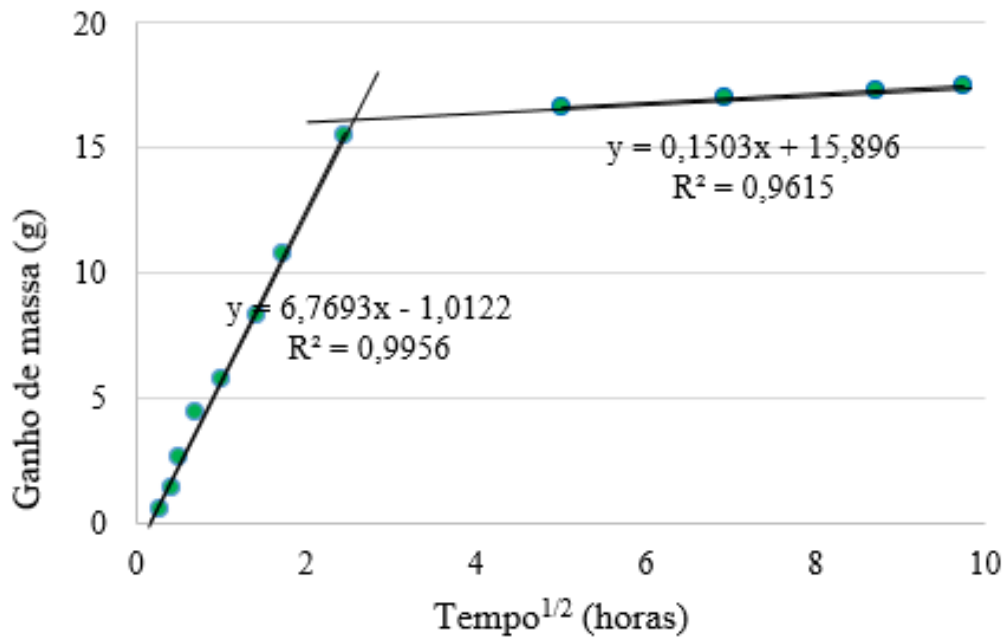
##### 4.1.1 Absortividade

Os valores de massa acumulados registrados durante o ensaio de absortividade foram plotados em um gráfico em função da raiz quadrada do tempo, sendo possível a partir daí, através da interpolação das retas de absorção inicial e a reta da saturação, definir no ponto de encontro o ponto de saturação dos corpos de prova, ou *nick point*. Desta forma, obteve-se a taxa de absorção através do quociente de inclinação da reta correspondente à fase de absorção inicial dividido pela área transversal do corpo de prova. Determinou-se também a resistência capilar para cada um dos conjuntos analisados, que foi determinada pela razão entre o valor *de nick point* e a espessura média do corpo de prova utilizado.

A taxa de absorção ( $\text{g/cm}^2\text{horas}^{1/2}$ ) relaciona-se com a capacidade de absorver água ao longo do tempo, assim, quanto maior a taxa de absorção, maior a quantidade de água que foi absorvida, indicando a existência de uma grande interconectividade entre os poros do concreto. A resistência capilar ( $\text{horas/m}^2$ ), indica o diâmetro dos poros do material, ou seja, quanto mais finos os poros capilares, mais altas são as forças capilares sobre a água, desta forma, mais baixa é a resistência capilar. Em resumo à resistência capilar está ligada à quantidade de tempo que o corpo de prova leva para atingir a saturação. Quanto mais finos forem os poros, a penetração e ascensão de água ocorrem de forma mais rápida, logo altas resistências capilares indicam poros grossos e/ou elevada quantidade de poros, já que demoram mais para serem totalmente atingidos, ou até mesmo poros capilares mais finos com grande tortuosidade, fator que também demanda uma maior quantidade de tempo para o preenchimento dos poroso.

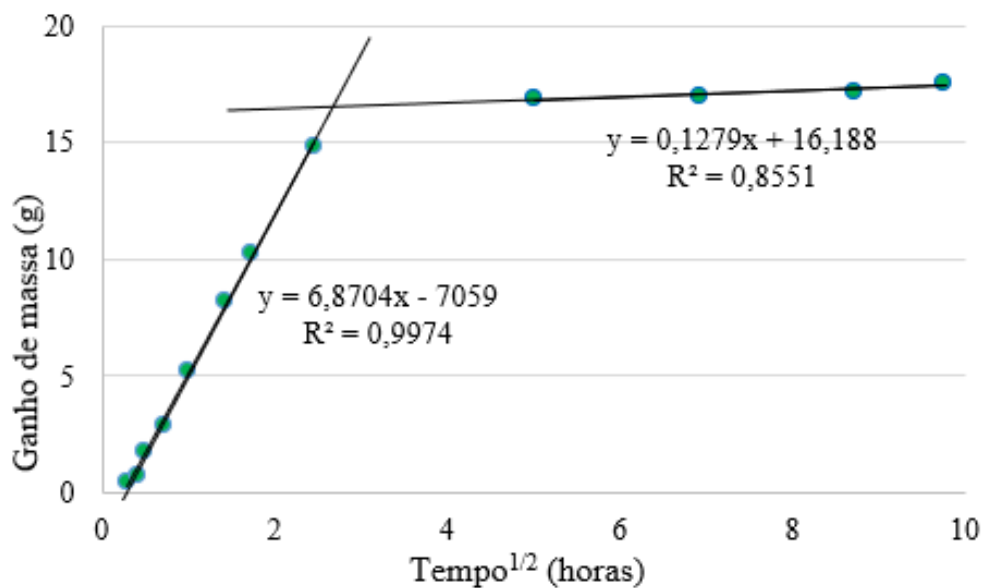
As Figura 28, Figura 29 e Figura 30 são apresentados os valores médios de ganho de massa em função do tempo para os concretos do grupo referência, casca cerâmica e argila expandida, respectivamente.

Figura 28 - Valores médios de ganho de massa em função do tempo - grupo referência



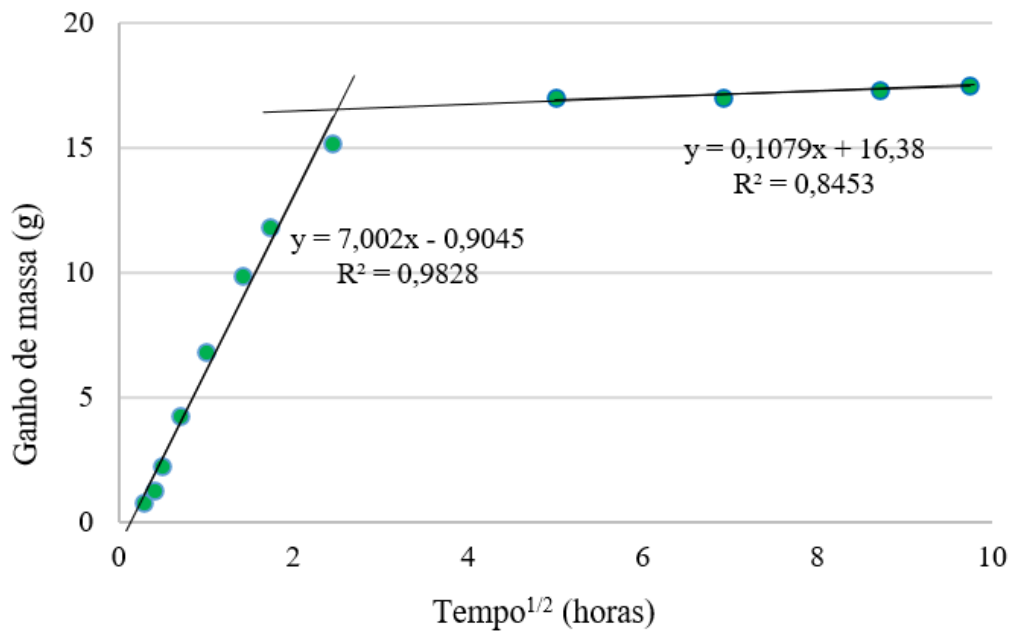
Fonte: Autoria Própria.

Figura 29 - Valores médios de ganho de massa em função do tempo - grupo casca cerâmica



Fonte: Autoria Própria.

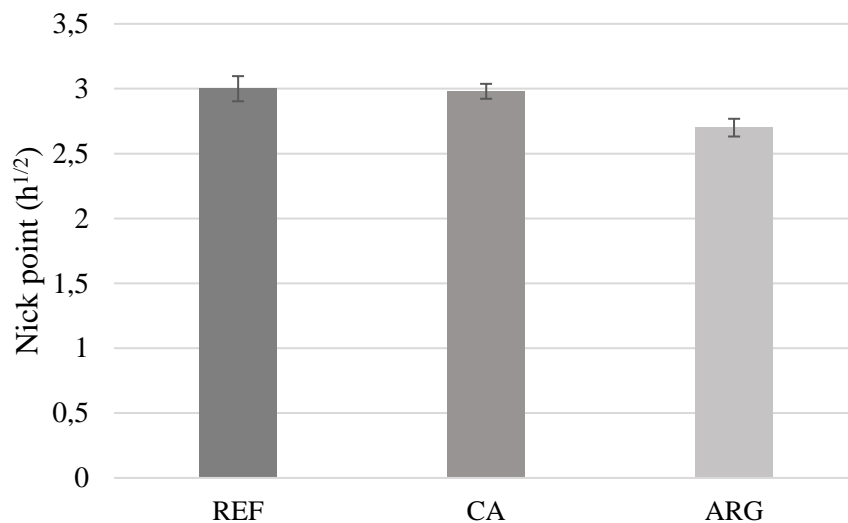
Figura 30 - Valores médios de ganho de massa em função do tempo - grupo argila expandida



Fonte: Autoria Própria.

Por meio de uma análise visual simples, percebe-se que os traços com a adição de agregados leves (ARG, CAR) buscando a ocorrência da cura interna, reduziu a absorção de água nestes corpos de prova, em comparação com os resultados apresentados pelo traço referência, traço este que não possui adições. Com base nos gráficos plotados é possível determinar os valores de *nick point* para cada um dos traços analisados. Os valores podem ser visualizados na Figura 31, apresentada na sequência.

Figura 31 - Valores médios de *nick point* dos grupos analisados



Fonte: Autoria Própria.

A seguir, na Tabela 14 é possível visualizar os resultados referentes aos valores de taxa de absorção e resistência capilar para cada um dos traços ensaiados.

Tabela 14 - Resultado taxa de absorção e resistência capilar

<b>Traço</b>	<b>Taxa de absorção (g/cm<sup>2</sup>h<sup>1/2</sup>)</b>	<b>Resistência capilar (h/m<sup>2</sup>)</b>
Referência	11,60	1440
Casca cerâmica	11,43	1459
Argila expandida	11,21	1166

Fonte: Autoria Própria.

Comparando-se os resultados, nota-se que a adição de agregados leves como agentes de cura interna apresentaram uma melhora nas propriedades relacionadas a absorção dos microconcretos. Ao comparar o traço referência com o traço com a adição de casca cerâmica, percebe-se uma redução na taxa de absorção de 1,47% e um aumento na resistência capilar de 1,32%, o que indica alterações na tortuosidade dos caminhos capilares.

Já ao comparar o traço referência com o traço que apresenta argila expandida em sua composição, percebe-se uma redução na taxa de absorção de 3,36% e para a resistência capilar a redução foi de 19,02%, indicando desta forma que ocorreu um refinamento e uma diminuição da quantidade de poros, visto que foi absorvido água mais rapidamente, reduzindo assim a quantidade de tempo necessária para que seja atingido o ponto de saturação.

Segundo citado por Mehta e Monteiro (2014) e verificado por Pereira da Costa (2015), este fenômeno é provocado pelo enchimento dos grandes vazios capilares pela pozolana, através da formação dos produtos secundários de hidratação, tornando desta forma a matriz de poros do material mais refinada.

Conforme citado anteriormente, a resistência capilar fornece um indicativo do diâmetro dos poros presentes no concreto, sendo que quanto maior a resistência capilar, mais baixas são as forças capilares sobre a água e por consequência mais largos são os poros capilares. Para este estudo verifica-se que a adição de materiais porosos visando a cura interna promoveu uma redução nos valores de resistência capilar tanto para a casca cerâmica quanto para a argila expandida ao comparadas com o traço que não possui nenhuma adição. Os resultados encontrados vão de encontro aos alcançados por Caetano (2019), que para a casca cerâmica obteve uma redução na resistência capilar de 30%.

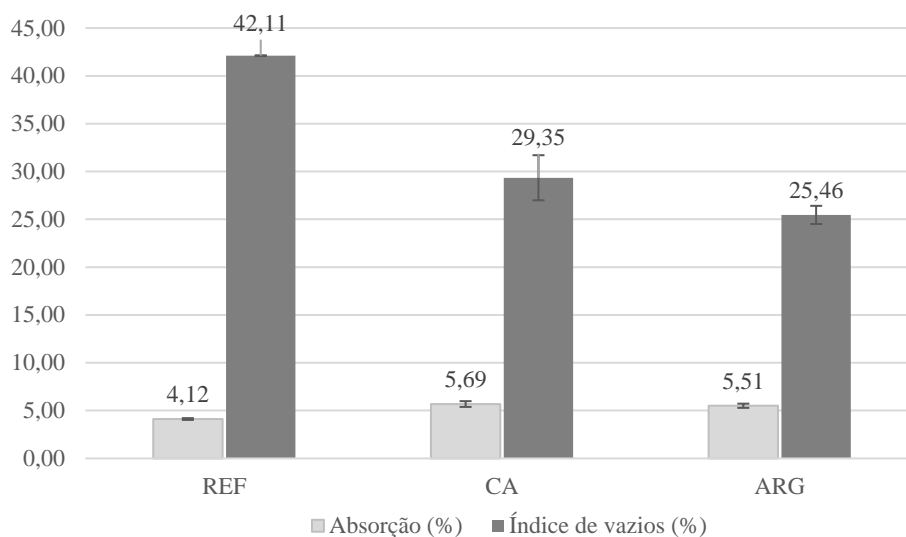
A taxa de absorção das amostras permite verificar indicativos quanto à interconexão dos poros, sendo que quanto maior a taxa de absorção, maior a quantidade de água absorvida. Para os concretos analisados, ao compará-los com o traço referência, percebe-se uma redução no valor da taxa de absorção, levando a acreditar que os agentes de cura interna utilizados promoveram uma redução no tamanho e interconexão dos poros, tornando os mesmos mais estreitos. Caetano (2019), verificou o mesmo comportamento para os materiais estudados.

Ao comparar os dois materiais de cura interna utilizados, pode-se perceber que a adição de argila expandida apresentou um melhor desempenho tanto para a resistência capilar quanto para a taxa de absorção. Desta forma, fica visível a melhora nas qualidades relativas a durabilidade do concreto dos agentes de cura interna, uma vez que a adição destes materiais ao traço resulta em uma menor permeabilidade do concreto, conforme já citado em trabalhos realizados por Margeson (2010), Thomas (2006) e Caetano (2019).

#### **4.1.2 Absorção e índice de vazios**

O ensaio de absorção conforme NBR 9778 (ABNT, 2005) é baseado no processo em que a água é transportada para o interior do concreto e tende a ocupar todos os espaços presentes em uma amostra, ou seja, é o processo em que a água ocupa os poros totais de uma amostra. Assim, a penetração de água é obrigada a dissipar-se em todas as direções permitindo avaliar a quantidade total de poros existente nos microconcretos que vem sendo analisados. Na Figura 32 é apresentado o gráfico com os valores médios de absorção e índice de vazios determinados com base nos parâmetros descritos no subitem 3.3.2. O ensaio foi realizado em corpos de prova com idade de 28 dias.

Figura 32 - Valores médios de absorção e índice de vazios



Fonte: Autoria Própria.

Observando a Figura 32 nota-se que os microconcretos pertencentes ao traço referência apresentaram uma absorção de água menor e um índice de vazios maior ao comparado com os dois demais traços analisados. Os traços (CA e ARG) que possuem materiais incorporados ao concreto para atuarem como agentes de cura interna apresentaram absorção de água muito semelhante entre eles. Já para o índice de vazios o traço CA apresentou um valor superior ao traço ARG mas inferior quando comparado ao traço REF.

Conforme apontado por Kim et al. (2018) materiais incorporados ao concreto que atuam como agentes de cura interna, promovem uma redução dos índices de vazios presentes no concreto, tornando a matriz cimentícia mais densa. Tais resultados encontram-se em concordância com os obtidos no ensaio de absorvidade, corroborando com as referências nacionais que a incorporação de casca cerâmica e argila expandida a mistura apresenta reduzir a quantidade total de poros presentes no concreto.

O microconcreto com casca cerâmica (CA) incorporada a mistura apresentou uma redução no índice de vazios de 30,30% em relação ao traço REF, enquanto os concretos produzidos com argila expandida (ARG) apresentaram uma redução de 39,54% também em relação ao traço REF. Conforme os resultados encontrados por estudos realizados por Kim et al. (2018), Caetano (2019) a diminuição do índice de vazios destes concretos pode ter sido dado pela liberação de água para a cura interna, gerando concretos com menor quantidade de poros



e menor interconectividade de poros. Em contrapartida os valores de absorção apresentaram leve aumento para ambos os traços analisados.

Para verificar se realmente há influência da utilização de materiais usados como agentes de cura interna na absorção e índice de vazios, a Tabela 15 confirma estatisticamente, através da análise de variância ANOVA, em que, obteve-se um valor de F consideravelmente maior que o valor de  $F_{crítico}$ . Cabe lembrar que para que as médias sejam consideradas iguais, é necessário que o valor de F seja menor que o  $F_{crítico}$ . Assim é possível constatar que para o ensaio de absorção e índice de vazios o uso dos materiais como a casca cerâmica e argila expandida influencia nos resultados.

Tabela 15 - ANOVA da influência do uso de materiais como agentes de cura interna na produção de concretos quanto a absorção e índice de vazios

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1109,954116	1	1109,95	28,9746	0,00576	7,70865
Dentro dos grupos	153,2313301	4	38,3078			
Total	1263,185446	5				

Onde:  $SQ$  = Soma quadrada;  $gl$  = Graus de liberdade;  $MQ$  = Média quadrada

Fonte: Autoria Própria.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Neste item são descritos os resultados da caracterização mecânica realizada para os grupos de microconcretos estudados. Através destes ensaios é possível estabelecer critérios de avaliação quanto à resistência dos distintos tipos de concreto moldados. Para a análise dos resultados relativos à resistência à compressão, utilizou-se os seguintes passos com auxílio do software Excel:

- determinação das médias, desvio padrão e coeficiente de variação relativos aos grupos ensaios realizados com cada um dos traços;
- sendo os valores de coeficiente de variação inferiores a 10%, todos os grupos eram levados em consideração;
- tendo os valores do coeficiente de variação superiores a 10%, o menor valor do grupo era considerado suspeito, e assim retirado da amostra para o cálculo de uma nova média e desvio padrão. Caso a diferença absoluta entre o valor individual e essa nova média fosse maior que duas vezes o valor do desvio

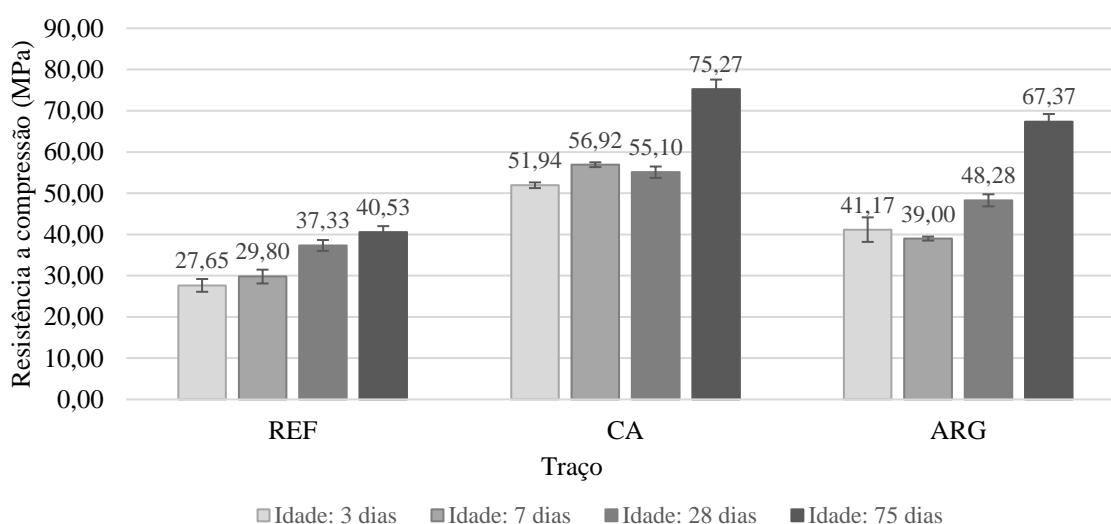
padrão, este valor era definitivamente removido. Repetiu-se o procedimento até que não existissem mais valores possíveis de espúrio.

d) análise dos valores potenciais de cada um dos grupos.

#### 4.2.1 Resistência à compressão

A Figura 33, ilustra os valores relativos à resistência à compressão dos concretos produzidos conforme as idades ensaiadas. É possível verificar que foram determinadas as resistências também para a idade de 75 dias, o que é pouco comum de se encontrar na literatura. Entretanto, optou-se pela realização do ensaio nesta data por coincidir com o período de realização dos ensaios de ação de cloretos no concreto.

Figura 33 - Resistência à compressão por idade



Fonte: Autoria Própria.

Com a análise da Figura 33 é possível perceber que as adições de casca cerâmica e argila expandida conferiram um ganho de resistência em relação ao traço REF. Acredita-se que essa melhoria de desempenho mecânico é dado pelo aumento das reações de hidratação do concreto devido a cura interna do mesmo proporcionada por estes materiais.

Ao analisar o traço CA percebe-se que uma tendência de crescimento das resistências desde as pequenas idades e na idade de 75 dias houve um aumento de 36,6% em relação a idade de 28 dias, acredita-se que este comportamento tenha ocorrido devido a ocorrência de uma

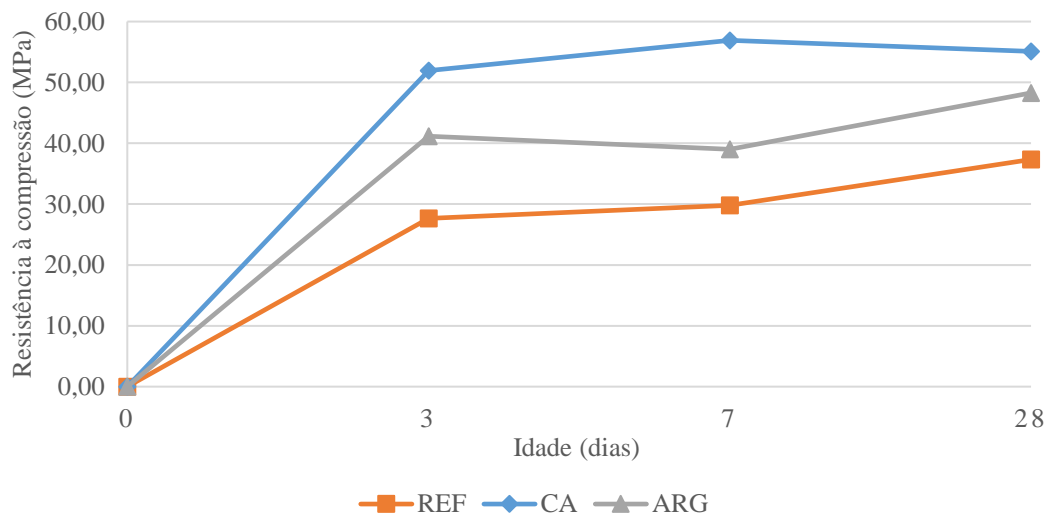
maior hidratação das matrizes cimentícias dadas pela cura interna conforme o trabalho realizado por De La Varga (2012) e Bayard, Schindler e Barnes (2010).

O traço ARG também apresentou um comportamento semelhante ao traço CA, na idade de 75 dias com um aumento de resistência da ordem de 39,54% em relação a idade de ensaio de 28 dias.

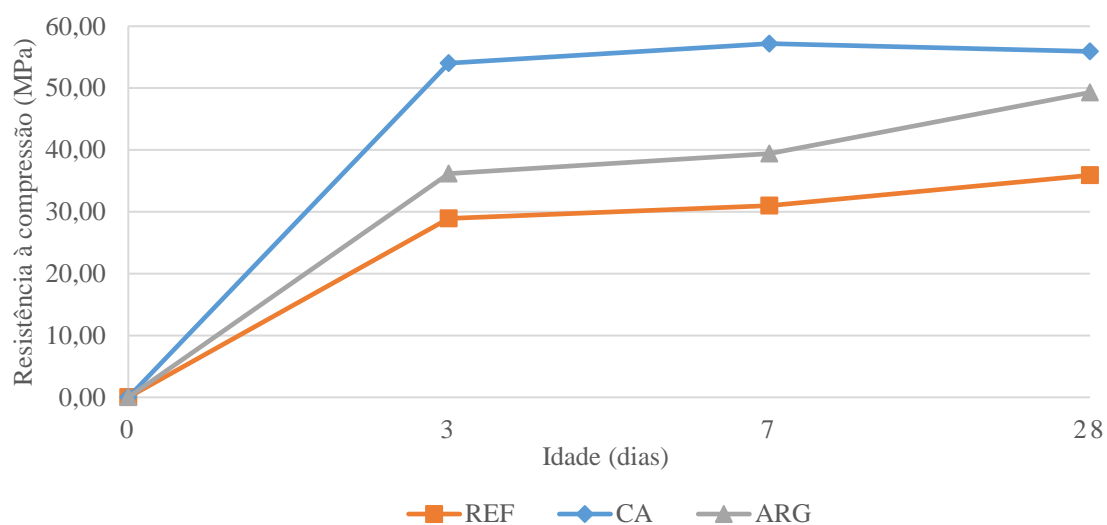
Ao avaliar as idades de ensaios estudados, percebe-se que todos os traços estudados apresentaram uma tendência de crescimento no valor da resistência em todas as idades analisadas. Este comportamento foi especialmente verificado nas idades avançadas, aos 75 dias, o que já era esperado devido às hidratações tardias que ocorrem nos concretos.

Na Figura 34, são apresentados os valores médios (Figura 34 (a)), excluídos espúrios, para a resistência à compressão dos microconcretos estudados, para as idades de 3, 7 e 28 dias. E na Figura 34 (b) são apresentados os valores potenciais, ou seja, os máximos valores de resistência alcançados para cada um dos concretos em cada uma das idades avaliadas.

Figura 34 - Evolução da resistência à compressão para os microconcretos, valores médios



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria.

Ao comparar os gráficos de resistência média e resistência potencial apresentados na Figura 34, é possível observar que não ocorreram alterações de resistência. O microconcreto com substituição parcial do agregado miúdo por argila expandida (ARG) apresenta um comportamento com a menor variação nos valores de resistência para 3, 7 e 28 dias.

Diversos autores vêm investigando o desempenho mecânico das misturas com adição de materiais porosos e que promovam a cura interna em concretos. Entretanto, o comportamento quanto a resistência à compressão apresenta-se de forma contraditória. Enquanto autores como Bentz, Giker e Jensesn (2002), Jordani (2016) e Caetano (2019) observaram o aumento da resistência do concreto em valores entre 10 e 20%, Lura et. al (2006) e Esteves, Cachim e Ferreira (2007), Onghero (2013), Senisse (2015) e Silva, dos Santos e Almeida (2020) registraram redução na resistência do concreto com materiais porosos.

Neste trabalho percebe-se que o traço CAR apresentou um aumento na resistência na ordem de 40% para as idades de 3, 7 e 28 dias. Já o traço ARG apresentou ganho de resistência ao comparado com o traço referência na ordem de 30%, 24,18% e 29,9% para as idades de 3, 7 e 28 dias, respectivamente.

Ao realizar o comparativo de resistências entre os grupos com adição de casca cerâmica (CAR) e argila expandida (ARG), percebe-se que a casca cerâmica demonstrou melhores

resultados, tendo a resistência maior que a argila expandida na ordem de 20,6%, 28,17% e 11,7% para as idades de 3, 7 e 28 dias, respectivamente.

Em seu trabalho Caetano (2019) avaliou um ganho de resistência ao comparar o traço referência com o traço de casca cerâmica de 21,2%, 8,4% e 6,9%, para as idades de 3, 7 e 28 dias respectivamente. Silva (2020) verificou em seu trabalho um ganho de resistência para o traço com adição de casca cerâmica de 16,7% e com adição de argila expandida o ganho de resistência verificado ficou em 10,4%. O trabalho desenvolvido por Tedesco (2016), no qual substituiu a casca cerâmica pelo agregado graúdo, também obteve ganhos elevados de resistência, chegando a 38% superiores à resistência do traço referência.

Foi verificado também se há influência entre os traços estudados em relação ao ensaio de resistência à compressão. A Tabela 16 confirma estatisticamente, através da análise de variância ANOVA, em que obteve-se um valor de F maior que o valor de  $F_{crítico}$ , demonstrando que para o ensaio de resistência à compressão há diferença significativa entre os traços estudados.

Tabela 16 - ANOVA da influência do uso de materiais como agentes de cura interna na produção de concretos quanto a resistência à compressão

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1361,809	2	680,9045	6,501469	0,017903	4,256495
Dentro dos grupos	942,5779	9	104,7309			
Total	2304,387	11				

Onde:  $SQ$  = Soma quadrada;  $gl$  = Graus de liberdade;  $MQ$  = Média quadrada

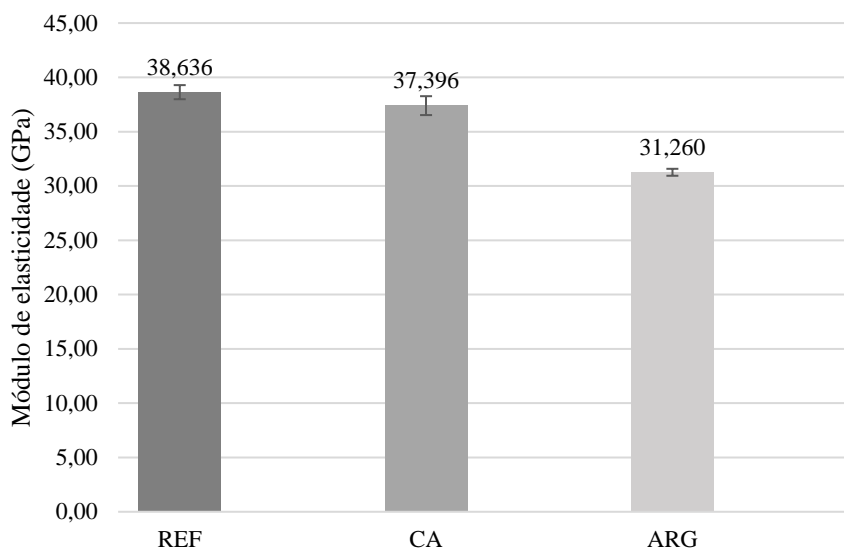
Fonte: Autoria Própria.

#### 4.2.2 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é uma propriedade que reflete qual a capacidade de deformação dos corpos de prova moldados. O ensaio foi realizado de acordo com os padrões recomendados pela NBR 8522 (ABNT, 20008). Julgou-se importante a realização do ensaio dadas as modificações na mistura, buscando avaliar o comportamento com o uso de agregados leves para cura interna.

Na Figura 35 é possível visualizar os resultados de módulo de elasticidade para cada um dos três grupos de microconcretos analisados.

Figura 35 - Resultados módulo de elasticidade por grupo



Fonte: Autoria Própria.

Com base nos resultados percebe-se que houve uma redução nos valores de módulo de elasticidade para os concretos com a adição de agregados leves para cura interna, como já era esperado. A presença de agregados porosos pode ter afetado negativamente o desempenho do módulo de elasticidade tanto para a argila expandida quanto para a casca cerâmica. Para o grupo com casca cerâmica a redução foi de 3,21% enquanto que para a argila expandida a redução registrada foi de 19%.

Os resultados apresentam-se mais significativos quando comparados com os resultados encontrados por Caetano (2019), no qual a casca cerâmica apresentou uma redução no valor de módulo de elasticidade de 15%. No trabalho desenvolvido por Moreno, Martins e Lopez (2014), também verificou-se uma redução no módulo de elasticidade para concretos com adição de argila expandida em torno de 20%, valor próximo ao encontrado neste estudo. Her-Yang e Jing-Jie (2009), também relatam reduções no módulo de elasticidade de concretos com argila expandida em valores próximos a 15%.

Foi avaliado também se há influência entre os traços estudados em relação ao ensaio de módulo de elasticidade a fim de corroborar com os resultados de resistência à compressão. A Tabela 17 confirma estatisticamente, através da análise de variância ANOVA, em que, obteve-se um valor de F menor que o valor de F crítico, demonstrando que para o ensaio de módulo de elasticidade não há diferença significativa entre os traços estudados.

Tabela 17 - ANOVA da influência do uso de materiais como agentes de cura interna na produção de concretos quanto ao módulo de elasticidade

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	62,40318	2	31,20159	0,346297	0,732292	9,552094
Dentro dos grupos	270,3021	3	90,10069			
Total	332,7052	5				

Onde: *SQ* = Soma quadrada; *gl* = Graus de liberdade; *MQ* = Média quadrada  
 Fonte: Autoria Própria.

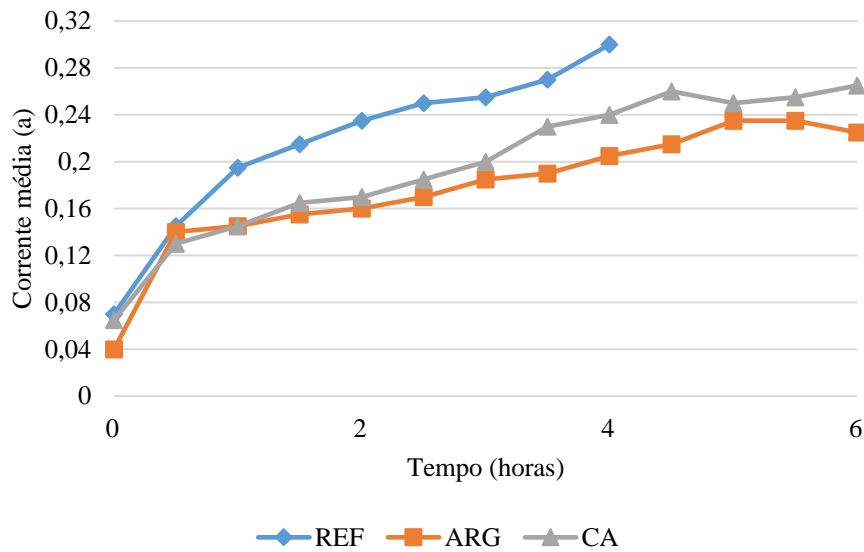
## 4.3 AÇÃO DE CLORETOS

### 4.3.1 Penetração de cloretos

O ensaio de penetração de cloretos, é um ensaio do tipo acelerado, realizado de forma estacionária, onde monitora-se a passagem de corrente elétrica durante um período de 6 horas. Na data de realização do ensaio os corpos de prova apresentavam a idade de 75 dias, idade determinada para a realização do ensaio devido a falta dos agentes químicos necessários. Na Figura 37 é apresentado o gráfico das correntes médias passantes em função do tempo de ensaio, obtidas através da diferença de potencial aplicada nos corpos de prova.

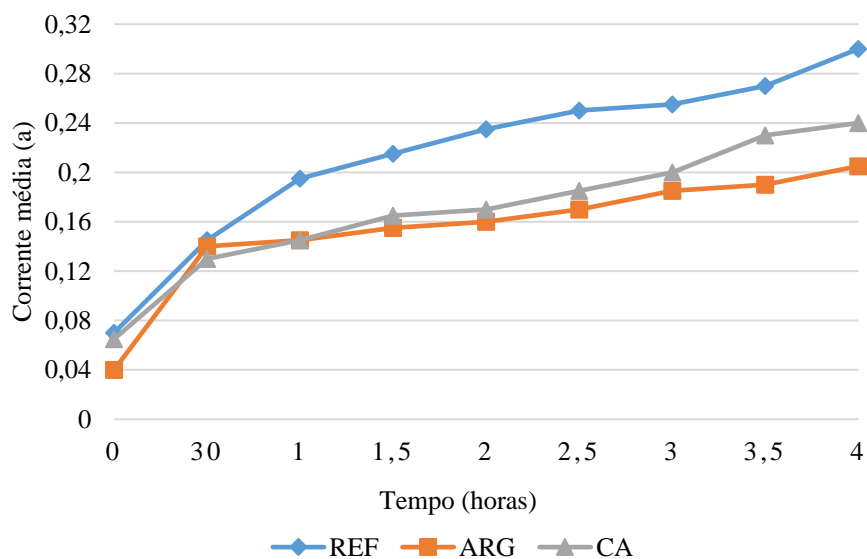
Para a realização do ensaio utilizou-se uma fonte que permite que a corrente máxima atingida seja 3A. Para o traço REF ao atingir as 4 horas de ensaio, o mesmo teve de ser cancelado, devido ao aumento da temperatura da solução de cloretos, que chegou próximo à 90°C. Diversos autores como Pereira da Costa (2015) perceberam o mesmo tipo de comportamento durante o ensaio, e acredita-se que isso ocorre devido a alta voltagem que é aplicada na mostra, que pode levar ao aumento da temperatura, resultando em um aumento na carga passante. Ao analisar a Figura 36, é possível verificar que neste estudo houve um aumento na corrente passante para as misturas, que representa a maior parcela no cálculo da corrente elétrica, em especial para o grupo de concretos com a incorporação de casca cerâmica na mistura. Para os traços com casca cerâmica e argila expandida o ensaio foi realizado até as 6 horas sem que ocorresse o aquecimento das soluções analisadas, desta forma a Figura 37 apresenta o gráfico com a carga passante nas misturas até as 4 horas de ensaio, permitindo assim uma melhor comparação entre os resultados alcançados.

Figura 36 - Correntes médias obtidas no ensaio – tempo total



Fonte: Autoria Própria.

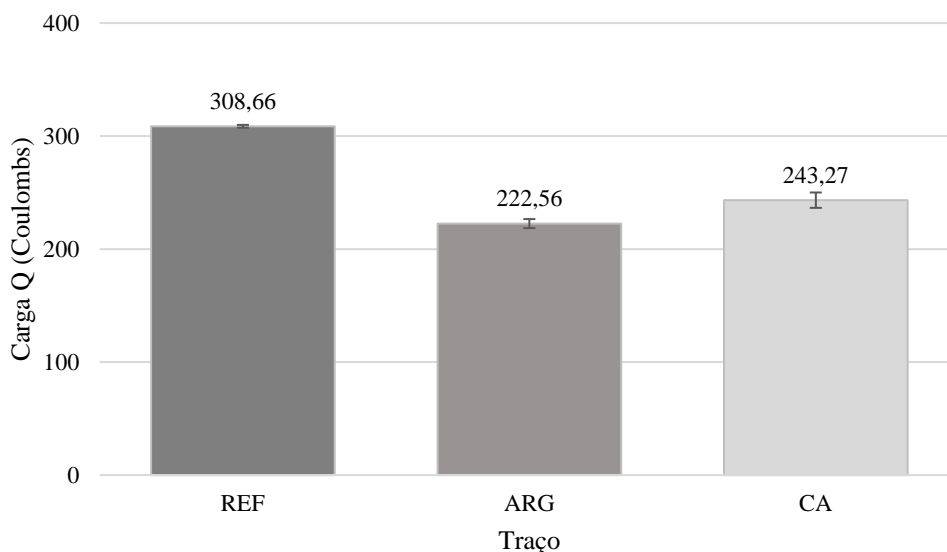
Figura 37 - Correntes médias obtidas durante 4 horas de ensaio



Na Figura 37 é apresentado o gráfico resultante da média das correntes passantes, obtidas através da diferença de potencial aplicada nos corpos de prova durante as 4 horas de ensaio realizadas para todos os corpos de prova em análise.



Figura 38 - Resultados médios de carga passante durante as 4 horas de ensaio



Fonte: Autoria Própria.

Os resultados médios de carga passante, em Coulombs, permitem a verificação da penetrabilidade de íons cloretos no concreto através de tabela apresentada pela ASTM C1202 (2012). Assim, a Tabela 18, apresenta as cargas médias obtidas para cada um dos grupos ensaiados e a probabilidade de penetração de íons cloretos.

Tabela 18 - Cargas médias passantes e classificação de penetrabilidade

Traço	Q média (Coulombs)	SD	CV %	Penetrabilidade de íons cloretos
Referência	308,66	66,05	4,67	Muito baixo
Argila expandida	222,56	75,24	2,96	Muito baixo
Casca cerâmica	243,27	74,09	3,28	Muito baixo

Fonte: Autoria Própria.

É possível perceber que todos os grupos de microconcretos analisados durante as 4 horas de ensaio, tempo realizado para todos os traços analisados, apresentam valores baixos de carga passante, sendo todos classificados quanto ao risco de penetrabilidade de íons cloretos como muito baixo. A partir da análise da Figura 37 e da Tabela 18 acima, é possível verificar que a mistura que apresentou menor tendência à penetração de cloretos foi o traço com a adição de argila expandida. Dado o melhor desempenho mecânico do grupo que utilizou casca cerâmica (CAR) como substituto parcial do cimento em relação aos demais grupos esperava-se que o mesmo apresentasse um desempenho quanto a penetração de cloretos melhor.

Conforme os resultados encontrados por Zhang e Gjorv (1991), Bentz (2009) e Thomas (2006), a adição de agregados leves que promovem a cura interna ao traço de concreto reduzem a permeabilidade da mistura. Os autores acreditam que este comportamento é dado devido a cura interna, que promove um aumento dos produtos de hidratação do cimento, tornando a matriz mais densa e conseqüentemente reduzindo a permeabilidade dos concretos. O comportamento condiz com o encontrado neste trabalho, ao comparar o tempo de ensaio realizado com todos os corpos de prova.

Entretanto, ao realizar uma análise com o tempo total de ensaio, analisando-se assim as 6 horas de ensaio, os resultados apresentados são distintos, sendo que para esta análise o traço com casca cerâmica (CAR) apresentou resultado 11,06% maior que o traço REF e 9,50% maior que o traço com adição de argila expandida (ARG). O mesmo desempenho foi verificado por Caetano (2019), no qual o traço com casca cerâmica apresentou resultado de carga passante 64% maior que ao comparado com o seu traço referência.

Já no estudo realizado por Deboodt, Fu e Ideker (2015), que avaliaram a penetração de cloretos em concretos com xisto expandido e argila expandida, o comportamento foi diferente. Os resultados obtidos para a carga passante demonstraram que a incorporação de argila expandida à mistura trouxe resultados similares aos encontrados com o traço referência, que segundo os autores foi dado pela melhoria na zona de transição do concreto e na maior compactação da matriz cimentícia. O mesmo comportamento foi encontrado neste trabalho ao analisar o ciclo total do ensaio, onde o grupo de microconcretos com adição de argila expandida apresentou um desempenho muito similar ao traço referência, sendo a penetrabilidade 20,66% maior. Acredita-se que este valor é dado a necessidade de interromper o ensaio dos corpos de prova referência, que apresentaram superaquecimento, conforme citado anteriormente.

Desta forma, é possível perceber que as pesquisas com agregados leves acrescentados ao concreto buscando promover a cura interna, apresentam em sua maioria um comportamento melhor ou próximo ao referencial quanto a penetração de íons cloretos no concreto. Contudo, realizados por De La Varga *et. al* (2014) e Caetano (2019), o uso de agregados leves não apresentou melhorias quanto a permeabilidade do concreto. Caetano (2019), o traço com a presença de casca cerâmica representou o maior aumento de penetrabilidade, sendo este de 24,19% ao comparado com o traço referência 01 e 63,91 ao comparado com o traço referência 02, ou seja, semelhante ao encontrado neste trabalho.

Em complemento ao ensaio, realizou-se um novo grupo de ensaio de resistência à compressão na data de realização, com objetivo de verificar o ganho de resistência na data. Os resultados encontram-se descritos no item 4.2.1. Ao analisar os dados foi possível perceber, com base na Figura 36, que apresenta os valores para as idades de rompimento dos corpos de prova, que os concretos com a idade de 75 dias obtiveram um ganho de resistência de ao comparado com o ensaio realizado aos 28 dias.

Para o traço REF o ganho foi de 15,80 %, para o traço com casca cerâmica foi de 25,85% (CAR) e para a argila expandida de 43,03% (ARG). Desta forma é possível que o ganho de resistência tenha contribuído para a baixa permeabilidade dos corpos de prova, devido a maior hidratação da mistura com o processo de cura interna.

É importante ressaltar que o ensaio acelerado de penetração de cloretos não pode ser utilizado como um indicativo da permeabilidade do concreto. Conforme Shi (2004), os parâmetros de condutividade ou resistividade não podem ser usados como indicativos de permeabilidade, dado que a permeabilidade é diretamente dependente da estrutura de poros e a condutividade elétrica ou resistividade é determinada tanto pela estrutura de poros como pela composição química da solução de poros. Entretanto, esses resultados servem como indicativos para o controle da qualidade do concreto.

### **4.3.2 Perda de massa da armadura**

A determinação da perda de massa da armadura presente nos corpos de prova com seção de 10 x 10 x 20 (cm) de corrosão acelerada por imersão modificada – CAIM. O ensaio consiste na imersão parcial de corpos de prova em uma solução repleta de íons de cloretos, que através da aplicação de estímulos elétricos, que levam a promoção do processo corrosivo. A solução utilizada foi de 35g/L de NaCl, que permite a promoção de uma solução na concentração próxima da encontrada no Oceano Atlântico. A densidade de corrente utilizada foi de  $500\mu/\text{cm}^2$ , duas fontes capazes de fornecer corrente ou tensão constante nas faixas entre 0 e 3A para corrente e 0 a 30V para a tensão, de forma que ao ligadas em conjunto fossem capazes de fornecer de 0A a 6A de corrente e 0V a 60 V.

Antes da moldagem dos corpos de prova realizou-se a pesagem de cada uma das barras inseridas, repetindo-se o procedimento após o ensaio. Iniciou-se o ensaio após 45 dias de cura úmida dos corpos de prova, estendendo-se por mais 30 dias de realização do ensaio. Estimou-se o tempo de aceleração da corrosão com base na porcentagem de perda de massa esperada,

que para o presente trabalho, foi de 10% para todos os grupos de microconcretos moldados. A Tabela 19 apresenta o peso de cada uma das barras, bem como a perda de massa destas.

Tabela 19 - Perda de massa das barras

Traço	Corpo de prova	Peso inicial da barra	Peso final da barra	Diferença de massa	% perda de massa	% perda de massa média	SD	CV (%)
Referência	1	137,5	125,4	12,1	8,80	9,70	1,27	7,60
	2	135,8	121,4	14,4	10,60			
Casca cerâmica	1	135,8	123,7	12,1	8,91	8,52	0,55	15,48
	2	136,5	125,4	11,1	8,13			
Argila expandida	1	134,8	134	0,8	0,59	0,77	0,25	3,02
	2	136,1	134,8	1,3	0,96			

Fonte: Autoria Própria.

Ao observar a Tabela 19 é possível verificar que as barras com a presença de agentes de cura interna apresentaram um melhor resultado quanto a perda de massa, o que não ocorreu com o traço de referência. Para o traço referência esperava-se este desempenho dado que o este traço apresentou maiores valores para absorção e índice de vazios, mostrando-se desta forma mais suscetível ao ataque de cloretos.

Entretanto, o ensaio vai contra os resultados encontrados para penetração de íons cloretos, no qual o traço referência apresentou a menor probabilidade de penetrabilidade de íons cloretos, contudo conforme citado anteriormente o ensaio para o traço referência não pode ser concluído, o que pode ter interferido nos resultados encontrados para penetrabilidade.

Cabe ressaltar também, que diversos autores citam que o ensaio de penetrabilidade de íons cloretos ocorre de forma muito rápida e com tensões elevadas, que podem vir a distorcer os resultados. Já o ensaio de corrosão acelerada, apesar de também ocorrer de forma acelerada, permite resultados mais próximos da realidade, dado o controle de diversas variáveis durante o ensaio, como tempo e a corrente aplicada.

Dentre os microconcretos analisados, o traço com a utilização de argila expandida como substituto parcial da areia foi o que demonstrou o melhor desempenho quanto a corrosão acelerada, apresentando uma perda de massa 92% menor que ao comparado com o traço referência.

Os resultados apresentados para os ensaios anteriores já indicavam que o traço com este material apresentaria um bom desempenho quanto a corrosão acelerada, inibindo a entrada de cloretos à estrutura, e conseqüentemente, reduzindo a perda de massa das mesmas. Acredita-se que assim como para os demais resultados a hidratação da matriz cimentícia causada pela utilização deste agregado leve como agente de cura interna tenha promovido as melhores condições de resistência ao ataque de cloretos nas barras de aço.

A casca cerâmica, material que vem sendo estudado em larga escala como substituto parcial tanto do agregado graúdo como do agregado miúdo, utilizada neste trabalho como substituto parcial do agregado miúdo apresentou um desempenho menor ao comparado com a argila expandida, mas mesmo assim inibiu que a perda de massa chegasse a 10% para as barras inseridas no concreto.

Em comparação com o traço referência o grupo com casca cerâmica apresentou uma perda de massa 12,16% menor. Estudos como de Senisse (2015), Caetano (2019) e Passos (2020), já demonstravam que a casca cerâmica apresenta-se como um bom substituto para os agregados do concreto contribuindo para ganhos na durabilidade.

Desta forma acredita-se que o melhor desempenho dos concretos com o uso dos agregados leves como agentes de cura interna é dado pela menor permeabilidade, redução de poros e de rede de poros conectados bem como pela redução da retração do concreto. Assim a matriz cimentícia se torna mais densa, atuando como barreira para a entrada dos agentes agressivos ao interior do concreto, bem como permitem a manutenção do pH alcalino do concreto protegendo desta forma as barras.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões sobre o comportamento da casca cerâmica e da argila expandida como agentes de cura interna. Desta forma são destacados os principais resultados alcançados e listadas as conclusões que podem ser extraídas. Além disso, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

#### 5.1 CONCLUSÕES

A análise dos dados experimentais obtidos durante o desenvolvimento deste estudo permitiram a elaboração de uma série de considerações, que foram apresentadas ao longo do trabalho e que encontram-se abaixo resumidas:

- O uso dos requisitos apresentados pela ASTM C 1761 (2015), norma que norteia a seleção de agregados para a cura interna devem ser aplicados com cautela. Alguns itens presentes na norma não deveriam ser levados como limitantes para o uso dos agregados, visto que a casca cerâmica utilizada neste estudo não se enquadra em três requisitos da norma. Apesar de não apresentar os valores dentro dos limites tolerados pela norma para distribuição granulométrica, massa unitária e presença de impurezas orgânicas, a casca cerâmica apresentou bom comportamento como agente de cura interna, elevando a resistência à compressão em 32,53% e reduzindo a perda de massa da armadura em 12,17%;
- Com base no exposto anteriormente acredita-se que as principais características que devem ser levadas em consideração na seleção de materiais como agentes de cura interna são a distribuição granulométrica, a dessorção, absorção total e a distribuição dos poros presentes no grão.
- Tanto a casca cerâmica quanto a argila expandida apresentaram bons resultados relativos à durabilidade e ação de cloretos ao comparados com o traço referência,

comprovando a eficácia do uso destes materiais como agentes de cura interna buscando uma maior durabilidade das estruturas.

- Ambos os materiais apresentaram uma redução nos valores relativos a absorvidade e índice de vazios, comprovando que ocorreu uma maior hidratação da matriz cimentícia, gerando concretos com menor quantidade de poros e menor interconectividade de poros. Acredita-se que este fator levou a menor penetrabilidade de cloretos na mistura, reduzindo também, desta forma a perda de massa das armaduras;
- Verificou-se um aumento na resistência à compressão do concreto com incorporação dos agregados leves, especialmente aos 75 dias. Acredita-se que o fato ocorreu devido às hidratações tardias do concreto sofrerem a influência positiva da cura interna. Entretanto, verificou-se uma leve redução no módulo de elasticidade do concreto.
- O traço executado com argila expandida apresentou o melhor desempenho para todos ensaios realizados, exceto para módulo de elasticidade no qual o material apresentou a maior redução. A utilização da argila expandida levou a um ganho de resistência aos 28 dias de 29,33 % e a menor perda de massa da armadura dos concretos analisados, com uma redução de 92,07 % ao comparado com a massa original.

Considerando os dados obtidos experimentalmente e as constatações apresentadas acima, pode-se chegar às seguintes conclusões baseadas nos resultados desta dissertação:

- O uso de agregados leves como agentes de cura interna, em especial a casca cerâmica proveniente da microfusão e a argila expandida levam a um aumento dos processos de hidratação da matriz cimentícia, contribuindo para a redução da porosidade e aumento da resistência dos concretos;
- O uso de casca cerâmica e argila expandida como agentes de cura interna produzem concretos com maior durabilidade e resistência ao ataque de cloretos;
- A argila expandida apresentou-se como a melhor adição quando busca-se aumento na resistência e durabilidade a cloretos.

Como conclusão geral tem-se que:

**O uso de casca cerâmica proveniente da microfusão e argila expandida, em especial, apresentam uma elevada capacidade de atuarem como agentes de cura interna, melhorando tanto propriedades mecânicas quanto relacionadas à durabilidade dos concretos, reduzindo principalmente a perda de massa da armadura.**

## **5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho revelou-se uma gama de possibilidades que podem ser estudadas. Desta forma seguem algumas sugestões visando complementar e dar continuidade à presente pesquisa:

- Estudar as características físicas e químicas dos agregados porosos utilizados;
- Estudar diferentes teores de substituição do agregado miúdo por agentes de cura interna e os impactos nas características mecânicas e de estruturação de poros do concreto;
- Avaliar a resistência ao ataque de cloretos em idades avançadas;
- Analisar a perda de massa da armadura em concretos com idades avançadas;
- Através de técnicas de processamento de imagens e de ensaios não destrutivos, avaliar o percurso percorrido pela água de cura interna na matriz cimentícia, de forma a entender melhor como ocorre a liberação de água durante a cura interna;
- Avaliar o uso dos agentes de cura interna em protótipos em escala reduzida;
- Analisar concretos com agentes de cura interna com distintas granulométricas, realizando um comparativo entre os resultados;
- Adaptar as dosagens para escala real para a verificação do comportamento dos agregados leves em uma situação real.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1202**: Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration.. Philadelphia, 2012.

\_\_\_\_\_. **ASTM C1761**: Specification of lightweight aggregate for internal curing of concrete. West Conshohocken, 2015.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. Tradução de Antônio Carmona e Paulo R. L. Helene. São Paulo, PINI, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

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

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

\_\_\_\_\_. **NBR 8522**: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 9779**: Argamassas e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 12041**: Argamassas de alta resistência mecânica para pisos – Determinação da resistência a compressão simples e tração por compressão diametral. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 13279**: Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência a tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

Avaliação de propriedades relativas à durabilidade de concretos produzidos com agentes de cura interna submetidos a ação de cloretos.

\_\_\_\_\_. **NBR 15575 - 1:** Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-2:** Concreto autoadensável. Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro: ABNT, 2017

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

\_\_\_\_\_. **NBR 16916:** Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR 16972:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. ABNT, 2021.

BENTUR, A. **Introduction: Overview of early age cracking.** In: BENTUR, A. Early Age Cracking in Cementitious Systems. RILEM, 2000.

BENTZ, D.P. **Influence of Curing Conditions on Water Loss and Hydration in Cement Pastes with and without Fly Ash Substitution.** NIST Interagency/Internal Report (NISTIR), v. 6886, 2002.

BRITISH STANDART INSTITUTION. **BS EM 14629** Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of chloride content in hardened concrete. London, UK, 2007c.

BRITISH STANDART INSTITUTION. **DD CEN/TS 12390-11.** Testing hardened concrete – Part II: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion.. London, UK, 20010.

BOLINA, Fabricio Longhi. TUTIKIAN, Bernardo Fonseca. HELENE, Paulo. **Patologia das estruturas.** Editora Oficina de Textos, 2019.

BYARD, B. E.; SCHINDLER, A. K. **Cracking tendency of lightweight concrete**. Highway Research Center, Auburn: Auburn University, 2010.

CAETANO, L. F. **Avaliação do potencial de uso de materiais porosos como agregados para cura interna de concretos com reduzida relação a/c**. Tese (Doutorado em engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

CARMONA FILHO, A.; MAREGA, A. **Retrospectiva da patologia do Brasil: estudo estatístico**. In: JORNADAS EM ESPANHOL Y PORTUGUES SOBRE ESTRUCTURAS Y MATERIALES. Colloquia 88, Madrid, 1988.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão das armaduras em concreto**. Inspeções e técnicas eletroquímicas. São Paulo: PINI; Goiânia, 1997.

CASTRO, J. et al. **Absorption and desorption properties of fine lightweight aggregate for application to internally cured concrete mixtures**. Cement and Concrete Composites, [s. l.], v.33, n. 10, p. 1001–1008, 2011.

CEB. **CEB-FIP Model Code 1990**. 190. ed. Paris: Comite Euro-International du Beton, 1990.

COMMITTEE 225-SAP. **Application of super absorbent polymers in concrete construction**. London: Springer, 2012.

CORDEIRO DE SOUZA, B.; PAES, N. S.; BARBOSA, L.S. **Estudo do agregado graúdo reciclado de concreto como agente de cura interna**. Revista Matéria, V25 N4. São Paulo 2020.

CUSSON, D., AND MARGESON, J. **Development of low-shrinkage high-performance concrete with improved durability**. In: Castro-Borges, P. Concrete Under Severe Conditions. London: Taylor & Francis Group, 2010.

DAL MOLIN, D.C.C. **Fissuras em estruturas de concreto armado**: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul. 1998. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

DAL MOLIN, D.C.C. et. al. **Avaliação de desempenho de tecnologias construtivas inovadoras: materiais e sustentabilidade.** Livro eletrônico. Porto Alegre, 2016.

DE LA VARGA, I.; CASTRO, J.; BENTZ, D. P.; WEISS, J. Application of internal curing for mixtures containing high volumes of fly ash. **Cement and Concrete Composites.** v. 34, n. 9, 2012.

ESTEVES, L. P. **Internal curing in cement-based materials.** 2009. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

FIALHO, R. F.; SEIBT, B. H.; CARRIJO, S. A. **Um estudo sobre a despassivação da armadura com ênfase na causada por carbonatação do concreto.** IV Colóquio estadual de pesquisa multidisciplinar, II Congresso nacional de pesquisa multidisciplinar. Mineiros, 2019.

FIGUEIREDO, Enio Pazini; MEIRA, Gibson Rocha. **Corrosão das armaduras das estruturas de concreto.** Mérida, México: ALCONPAT Internacional, 2013.

GORJV. Odd E. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade.** Editora Oficina de Textos, 2015,

GOPALAN, M. K. **Sorptivity of fly ash concretes.** Cement and Concrete Research. v. 26, n 8, p. 1197-1198. 1996.

GRAEFF, Ângela G. **Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto armado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre, 2007.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em estruturas de concreto armado.** Tese (Tese de livre docência), Departamento de Engenharia e Construção Civil – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L. **Introdução da vida útil no projeto das estruturas de concreto.** WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. São José dos Campos, 2001.

HELENE, Paulo & Pereira, Fernanda (Ed.). **Rehabilitación y Mantenimiento de Estructuras de Concreto.** Bogotá, Colômbia, SIKA, 2007.

HER-YUNG, W.;JING-JIE, S. Effect of autoclave curing on the compressive strength and elastic modulus of lightweight aggregate concrete. **Journal of ASTM International**, v.6, n.6, 2009.

HOVER, K. C. **The influence of water on the performance of concrete.** Construction and Building Materials, [s. l.], v. 25, n. 7, p. 3003–3013, 2011.

JENSEN, O. M.; LURA, P. **Materials and Methods for Internal Curing.** In: RILEM, State-of-the-art report of the Rilem Technical Committee 196-ICC: Internal curing of concrete. Ed. Springer, Cap. 5, 2007.

JORDANI, BARBARA. **Estudo do agregado graúdo reciclado de concreto como agente de cura interna em concreto com cinza de casca de arroz.** Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, área de concentração: Gerenciamento de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, UNISINOS. 2016.

KELHAM, S.A. **A water absorption test for concrete.** Magazine of concrete Research, v. 40, n 143, p. 106-110, June 1988.

KIM, J. H. et al. Influence of internal curing on the pore size distribution of high strength concrete. **Construction and Buildings Materials.** v. 192, 2018.

KIN, Y. J.; BUMADIAN, I. **Chemicoelectrical response of concrete bonded with carbon fiber-reinforced polymer sheets in a corrosive environment.** ACI Material Journal, 2017.

KOVLER, K; JENSEN, O. M. **General Concept and Terminology.** In: RILEM, State-of-the-art report of the Rilem Technical Committee 196-ICC: Internal curing of concrete. Ed. Springer, Cap. 2, 2007b.

KREUZ, A. L. **Utilização de cinzas pesadas de termelétricas na substituição de cimento e areia na confecção de concretos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

LITVAN, G.G. **Mechanism of cement past degradation due to Chemical and physical processes.** Int. Cong. Chem. Cem. 8th, Rio de Janeiro, 1986.

LOPES, A. N. M. **Mitigação da retração autógena em concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração e seus efeitos na macro e microestrutura.** 2011. 281 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pos-Graduacao em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

LURA, P. **Autogenous deformation and internal curing of concrete.** 2003. 208 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pos-Graduacao, Delft University of Technology, Delft, 2003.

LURA, P.; JENSEN, O. M.; BREUGEL, K. **Autogenous shrinkage in high-performance cement paste:** An evaluation of basic mechanisms. *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 2, p. 223-232, 2003.

MEDEIROS, Marcelo; ANDRADE, Jairo; HELENE, Paulo. **Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto.** São Paulo: IBRACON, 2011.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: IBRACON, 2014.

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

MORENO, D.; MARTINEZ, P.; LOPEZ, M. Practical Approach for Assessing Lightweight Aggregate Potential for Concrete Performance. **ACI Materials Journal**. P. 123-132. March-April, 2014.

MOTA, J. M. F.; BARBOSA, F. R.; COSTA e SILVA, A. J.; FRANCO, A. P. G.; CARVALHO, J. R. **Corrosão de aruaduras em estruturas de concreto armado devido ao ataque de íons cloreto**. In: Anais do CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, n.54, Maceió: IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, 2012.

NEPOMUCENO, Antonio Alberto. **Mecanismo de Transporte de Fluidos no Concreto**. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2ª Edição. São Paulo: PINI, 1997.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5ª Edição. São Paulo: PINI, 2015.

OLIVEIRA, G.G. Importância da manutenção preventiva nas pontes e viadutos do Rio Grande do Sul: caracterização da tipologia das estruturas e levantamento de manifestacoes patologicas. 1990. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ORDONEZ, S. T. L. **Mitigação da retração autógena em microconcretos de alta resistênciacom adição de polímeros superabsorventes e aditivo redutor de retração**. 2013. 178 f.Dissertacao (Mestrado em estruturas e construcao civil) - Departamento de engenharia civil e ambiental, Universidade de Brasilia, Brasilia, 2013.

PEREIRA DA COSTA, F. B. **Análise da Durabilidade de Compósitos Cimentícios de Elevada Capacidade de Deformação Reforçados com Fibras**. 2015, 169 f. Dissertacao (Mestrado em engenharia civil) - Programa de Pos-graduacao em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

POGGIALI, Flávia. **Durabilidade de estruturas de concreto em usinas siderúrgicas**. Monografia (Especialização em Construção Civil), Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2009.

POSSAN, Edna. **Modelagem da carbonatação e previsão da vida útil das estruturas de concreto em ambiente urbano**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

RIBEIRO, D. V.; CASCUDO, O. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: RIBEIRO, D. V. (coord.). **Corrosão e degradação em estruturas de concreto. Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2018.

SANTOS, Maurício. **Deterioração das estruturas de concreto armado – estudo de caso**. Monografia (Especialização em Construção Civil), Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte, 2012.

SENISSE, J. A. L. **Estudo do efeito do agregado cerâmico com diferentes porosidades no comportamento mecânico e de retração livre e restringida de concretos, visando o uso de resíduos de construção e demolição como agente cura interna**. 2015. 278 f. Tese (Doutorado em engenharia civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SILVA, T. J. Mecanismos de Transporte de Massa no Concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011.

SILVA FILHO, L.C.P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da penetração de água e da adição de microssilica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

STANISH, K. D.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. **Testing the chloride penetration resistance of concrete: a literature review**. 1997. Toronto, Canada, University of Toronto. Notas de aula.

STEIN, J. K. **Avaliação experimental de ciclos de carregamento em vigas corroídas de concreto armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

TORRES, Ariela da Silva. Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: uma meta-análise. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.



TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. CBI Forskning 82:4. Estocolmo: Swedish Cement and Concrete Research Institute/ CBI, Cement och betonginstitutet, 1982.

UJI, K.; MATSUOKA, Y.; AND MARUYA, T. Formulation of an Equation for Surface Chloride Content of Concrete due to Permeation of Chloride. **Corrosion of Reinforcement in Concrete**, Society of Chemical Industry, London, UK, 1990.

THOMAS, M. D. A. **Chloride Diffusion in High-Performance Lightweight Aggregate Concrete**. In: MALHOTRA, V.M. 7th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2006, p. 797-812.

ZHUTOVSKY, S.; KOVLER, K. **Effect of internal curing on durability-related properties of highperformance concrete**. Cement and Concrete Research, [s. l.], v. 42, n. 1, p. 20–26, 2012.