

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA

INFLUÊNCIA DA CINZA DE FUNDO COMO SUBSTITUTO DO AGREGADO MIÚDO EM
CONCRETOS PRODUZIDOS COM E SEM METACAULIM: EFEITOS EM PROPRIEDADES
RELACIONADAS À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Por

Tatiane Valente de Aragão

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica

Rio Grande 2024

INFLUÊNCIA DA CINZA DE FUNDO COMO SUBSTITUTO DO AGREGADO
MIÚDO EM CONCRETOS PRODUZIDOS COM E SEM METACAULIM: EFEITOS
EM PROPRIEDADES RELACIONADAS À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Por

Tatiane Valente de Aragão
Mestre em Engenharia Oceânica

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Oceânica (PPGEO) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande
(FURG), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia
Oceânica.

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
Coordenador do PPGEO

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **FABIO COSTA MAGALHAES**
Data: 02/12/2024 16:17:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

.....
Prof. Dr. Fábio Costa Magalhães – IFRS (Orientador)
Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Documento assinado digitalmente
 **LEANDRO CANDIDO DE LEMOS PINHEIRO**
Data: 02/12/2024 18:27:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

.....
Prof. Dr. Leandro Candido de Lemos Pinheiro – IFRS
Doutor em Modelagem Computacional pela Universidade Federal do Rio Grande.

Documento assinado digitalmente
 **MAURO DE VASCONCELLOS REAL**
Data: 02/12/2024 17:01:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

.....
Prof. Dr. Mauro de Vasconcellos Real – FURG
Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Rio Grande, 21 de novembro de 2024.

Ficha Catalográfica

A659i Aragão, Tatiane Valente de.
 Influência da cinza de fundo como substituto do agregado miúdo
 em concretos produzidos com e sem metacaulim: efeitos em
 propriedades relacionadas à penetração de cloretos / Tatiane Valente
 de Aragão. – 2024.
 93 f.

 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande –
 FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Rio
 Grande/RS, 2024.
 Orientador: Dr. Fábio Costa Magalhães.

 1. Durabilidade do concreto 2. Penetração de Cloretos 3. Cinza de
 fundo 4. Metacaulim I. Magalhães, Fábio Costa II. Título.

CDU 624.012.45

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação”.

SIMONE DE BEAUVOIR

AGRADECIMENTOS

Agradeço sobre todas as coisas a Deus, por estar sempre comigo em todos os momentos. À minha amada mãe. Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO), da Universidade Federal do Rio Grande. À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro. Ao Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil (LEMCC), do Instituto Federal do Rio Grande do Sul (IFRS) – Campus Rio Grande. À Universidade Federal do Rio Grande (FURG) e a todos que contribuíram para a realização do programa experimental. Ao meu professor Orientador.

RESUMO

Nos últimos anos, muito se discute sobre a necessidade da utilização sustentável dos recursos naturais disponíveis no meio ambiente. A produção de concretos com resíduos industriais é uma prática cada vez mais utilizada na busca de reduzir os impactos ambientais. Muitos desses materiais são pozolânicos, como as cinzas volantes e sílicas ativas. Esses minerais, portanto, propiciam incrementos em propriedades físicas, químicas e mecânicas do concreto. Outros resíduos, como a cinza de fundo gerada no processo de queima de carvão mineral que não passa por controle de temperatura ou qualquer tipo de beneficiamento costumam apresentar baixo potencial reativo. O descarte deste material, porém, se caracteriza como um importante desafio dentro de um contexto de sustentabilidade. Neste trabalho é avaliado o potencial de durabilidade dos concretos produzidos com a substituição de areia por cinza oriundo da queima de carvão nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20% e 30%, bem como a substituição de cimento Portland por metacaulim na proporção de 5%. A análise das propriedades químicas da cinza indicou predominância de material cristalino, contendo ainda material amorfo em menor proporção. Os resultados experimentais obtidos através dos ensaios de resistência à compressão, absorção de água por capilaridade, migração de cloretos em regime não estacionário e velocidade de pulso ultrassônico evidenciam a influência das adições minerais nas propriedades do concreto. Concretos produzidos com a adição de cinza de fundo e metacaulim apresentaram melhorias em relação ao concreto de referência C0 (sem adição), principalmente no que se refere à resistência à penetração de íons cloreto. Entre as misturas analisadas, os concretos CMK20 e CMK30 se destacam, evidenciando que a combinação de metacaulim e cinza de fundo em teores equilibrados proporciona excelente proteção contra a despassivação das armaduras, reforçando a viabilidade desses materiais na produção de concretos duráveis e sustentáveis.

Palavras-chave: Durabilidade do concreto. Penetração de Cloretos. Cinza de fundo. Metacaulim.

ABSTRACT

In recent years, there has been much discussion about the need for the sustainable use of natural resources available in the environment. Producing concrete with industrial waste is an increasingly common practice in the effort to reduce environmental impacts. Many of these materials are pozzolanic, such as fly ash and silica fume. These minerals, therefore, provide enhancements in the physical, chemical, and mechanical properties of concrete. Other waste materials, such as bottom ash generated from the combustion of mineral coal, which does not undergo temperature control or any type of processing, generally have low reactive potential. However, disposing of this material poses a significant challenge within a sustainability context. This study evaluates the durability potential of concretes produced with the replacement of sand by coal combustion ash in proportions of 5%, 10%, 15%, 20%, and 30%, as well as the replacement of Portland cement with metakaolin at a proportion of 5%. The analysis of the chemical properties of the ash indicated a predominance of crystalline material, with a smaller proportion of amorphous material. Experimental results obtained through compressive strength tests, water absorption by capillarity, non-steady-state chloride migration, and ultrasonic pulse velocity highlight the influence of mineral additions on concrete properties. Concretes produced with the addition of bottom ash and metakaolin showed improvements in comparison to the reference concrete C0 (without addition), particularly regarding resistance to chloride ion penetration. Among the analyzed mixtures, CMK20 and CMK30 concretes stand out, showing that the combination of metakaolin and bottom ash in balanced proportions provides excellent protection against rebar depassivation, reinforcing the viability of these materials in the production of durable and sustainable concretes.

Keywords: Concrete durability. Chloride penetration. Bottom ash. Metakaolin.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	15
1.1. Considerações iniciais.....	15
1.2. Objetivos	18
1.2.1. Objetivos gerais.....	18
1.2.2. Objetivos específicos	18
1.3. Delimitações de pesquisa	18
1.4. Estrutura do trabalho	18
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. Durabilidade das estruturas de concreto armado	19
2.1.1. Vida útil de projeto (VUP)	20
2.1.2. Deterioração das estruturas de concreto em ambiente marinho.....	22
2.1.3. Mecanismos de redução da durabilidade do concreto	23
2.2. Indicadores de durabilidade do concreto	26
2.2.1. Indicadores de durabilidade na avaliação da penetração de cloretos.....	27
2.2.2. Fatores que influenciam o processo de penetração de cloretos no concreto.....	28
2.3. Utilização de agregados miúdos reciclados em concreto estrutural	30
2.4. Cinza de fundo	30
2.5. Resistência do concreto com adição de cinza de carvão ao ataque químico	32
2.6. Metacaulim.....	33
2.7. Confiabilidade das estruturas de concreto	34
2.7.1. Métodos para análise de confiabilidade estrutural.....	35
2.7.2. Previsão de vida útil das estruturas de concreto armado	38
METODOLOGIA	39
3.1. Materiais.....	40
3.1.1. Produção dos corpos de prova	48
3.1.2. Avaliação das propriedades dos concretos	49
3.2. Análise probabilística da penetração de cloretos	55
3.2.1. Probabilidade de corrosão	56
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	58

4.1. Resistência à compressão.....	58
4.2. Absorção de água por capilaridade	60
4.3. Coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário.....	64
4.4. Velocidade de pulso ultrassônico	67
4.5. Resistividade elétrica superficial	69
4.6. Correlação entre resistividade elétrica e o coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário.....	71
4.7. Resultados das simulações	72
5. CONCLUSÕES FINAIS	75
6. REFERÊNCIAS.....	77

LISTA DE FIGURA

Figura 2.1. Modelo de vida útil proposto por Tuutti	20
Figura 2.2. Modelo de vida útil adaptado por Meira.	21
Figura 2.3. Modelo de vida útil proposto por Helene	22
Figura 2.4. Comparação entre perfis de cloretos em concretos	23
Figura 2.5. Formas de penetração de cloretos nas estruturas de concreto.	24
Figura 2.6. Concentração de cloretos em concretos após processo de fissuração e ensaio de migração de cloretos.....	29
Figura 2.7. Coeficiente de migração de cloretos aos 132 dias.....	32
Figura 2.8. Índice de confiabilidade β	37
Figura 3.1. Metodologia do trabalho.....	39
Figura 3.2. Curva granulométrica da areia fina.	41
Figura 3.3. Curva granulométrica da areia média.....	42
Figura 3.4. Curva granulométrica da brita 1	43
Figura 3.5. Curva granulométrica da cinza de fundo.....	44
Figura 3.6. Difratoograma de cinza de fundo.	45
Figura 3.7. Ensaio de absorção de água por capilaridade.	50
Figura 3.8. Amostras de concreto unidas ao tubo de PVC e a manta de borracha	50
Figura 3.9. Ensaio prescrito pela norma NT Build 492	51
Figura 3.10. Amostras de concreto com aspersão de nitrato de prata.....	52
Figura 3.11. Profundidade de penetração de cloretos.	52
Figura 3.12. Aparelho utilizado no ensaio de velocidade de pulso ultrassônico.	54
Figura 3.13. Sonda de quatro elétrodos.....	55
Figura 4.1. Resistência à compressão do concreto C0 (sem adição) e dos concretos com cinza de fundo.	58
Figura 4.2. Resistência à compressão do concreto CMK0 com adição de metacaulim e dos concretos com a combinação das adições de cinza de fundo e metacaulim.....	59
Figura 4.3. Absorção de água por capilaridade do concreto C0 (sem adição) e dos concretos com adição de cinza de fundo aos 28 dias	61
Figura 4.4. Absorção de água por capilaridade do concreto CMK0 com adição de metacaulim e dos concretos com a combinação das adições de cinza de fundo e metacaulim aos 28 dias	61
Figura 4.5. Absorção de água por capilaridade do concreto C0 (sem adição) e dos concretos com adição de cinza de fundo aos 90 dias.	62

Figura 4.6. Absorção de água por capilaridade do concreto CMK0 com adição de metacaulim e dos concretos com a combinação das adições de cinza de fundo e metacaulim aos 90 dias.	62
Figura 4.7. Absorção de água por capilaridade do concreto C0 (sem adição) e dos concretos com adição de cinza de fundo aos 180 dias	63
Figura 4.8. Absorção de água por capilaridade do concreto CMK0 com adição de metacaulim e dos concretos com a combinação das adições de cinza de fundo e metacaulim aos 180 dias	63
Figura 4.9. Coeficiente de migração de cloretos do concreto C0 (sem adição) e dos concretos com adição de cinza de fundo.....	64
Figura 4.10. Coeficiente de migração do concreto CMK0 com adição de metacaulim e dos concretos com a combinação das adições de cinza de fundo e metacaulim.....	65
Figura 4.11. Fator de envelhecimento dos concretos.....	67
Figura 4.12. Velocidade de pulso ultrassônico dos concretos produzidos	68
Figura 4.13. Resistividade elétrica superficial dos concretos produzidos.	70
Figura 4.14. Correlação entre os resultados de resistividade elétrica superficial e coeficiente de migração de cloretos.....	71
Figura 4.15. Probabilidade de falha do concreto C0 (sem adição) e dos concretos com adição de cinza de fundo.....	73
Figura 4.16. Probabilidade de falha do concreto (CMK0) com adição de metacaulim e dos concretos com adição de cinza de fundo e metacaulim.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Métodos para determinar o coeficiente de difusão.....	28
Tabela 3.1. Composição granulométrica da areia fina	40
Tabela 3.2. Composição granulométrica da areia média.....	41
Tabela 3.3. Análise granulométrica da brita 1	42
Tabela 3.4. Composição granulométrica da cinza de fundo	43
Tabela 3.5. Caracterização química da cinza de fundo	44
Tabela 3.6. Propriedades físicas da cinza de fundo.....	46
Tabela 3.7. Caracterização química do metacaulim.....	47
Tabela 3.8. Propriedades físicas do metacaulim	47
Tabela 3.9. Concretos Produzidos (unidade: kg/m³).	48
Tabela 3.10. Duração e tensão do ensaio conforme a NT Build 492.	51
Tabela 3.11. Difusividade do concreto.....	53
Tabela 3.12. Velocidade de pulso ultrassônico e qualidade dos concretos.	54
Tabela 3.13. Distribuição de probabilidade das variáveis adotadas na análise probabilística.	57
Tabela 4.1. Resultados da resistência à compressão	58
Tabela 4.2. Resultados da absorção de água por capilaridade	60
Tabela 4.3. Resultados de migração de cloretos.	64
Tabela 4.4. Fator de envelhecimento (α) e os coeficientes de migração de cloretos	66
Tabela 4.5. Velocidade de pulso ultrassônico.....	68

LISTA DE SÍMBOLOS

Algarismos Romanos

C	Concentração de cloretos
C_0	Concentração inicial de cloretos
C_{CR}	Concentração de cloretos crítica
C_i	Concentração iônica
C_s	Concentração superficial de cloretos
$C(x,t)$	Concentração de cloretos no interior da estrutura
D	Coefficiente de difusão
D_0	Coefficiente de difusão inicial do concreto
D_{ns}	Coefficiente de difusão em estado não-estacionário
D_{nssm}	Coefficiente de difusão aparente
I	Corrente elétrica
J	Fluxo iônico
P_f	Probabilidade de falha
T	Temperatura
U	Voltagem
V	Velocidade
t	Tempo
t_0	Idade do concreto ao ser medido o coeficiente D_0
t'	Idade do concreto ao ser exposto ao cloreto
x_p	Profundidade média da penetração de cloretos

Símbolos Gregos

ρ	Massa específica [kg/m³].
α	Fator de envelhecimento do concreto
β	Índice de confiabilidade

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CF	Cinza de Fundo
CP	Cimento Portland
EDX	Fluorescência de raios -X por dispersão de energia
BET	Ensaio de área superficial
FURG	Universidade Federal do Rio Grande - FURG
MCS	Método de Simulação de Monte Carlo
MK	Metacaulim
NBR	Norma brasileira
DRX	Difração de raios - X

1.INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A grande versatilidade do concreto permite o ajuste da sua composição e o aumento da durabilidade, possibilitando estruturas de concreto mais resistentes à ação de agentes de degradação. No entanto, em zonas marinhas a vulnerabilidade do aço à corrosão é maior, principalmente, em razão do elevado teor de cloretos presentes na água do mar (FERREIRO, 2016).

A indústria do concreto utiliza constantemente adições minerais para produzir concretos mais duráveis. No entanto, o controle adequado da penetração de cloretos e a corrosão prematura das armaduras ainda aparecem como grandes desafios tanto para o projeto de durabilidade como para a operação de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade (GJØRV, 2015). A utilização de subprodutos das mais diversas indústrias de transformação representa uma possibilidade viável para suprir a necessidade de dar o correto descarte para resíduos de forma sustentável aliada à melhoria do desempenho dos concretos estruturais.

O principal problema associado à durabilidade do concreto está relacionado à corrosão das armaduras, as quais são afetadas por agentes químico-físicos que atuam negativamente sobre os elementos estruturais, reduzindo o desempenho determinado na fase de projeto (WEERDT *et al.*, 2016; PINTAN *et al.*, 2015). Dependendo da qualidade do concreto e da espessura do revestimento, muitos anos podem se passar antes que os cloretos cheguem às armaduras e a corrosão comece. No entanto, depois que os cloretos chegam às armaduras, podem se passar apenas alguns meses ou anos até aparecerem sinais visíveis de danos (GJØRV, 2015).

A combustão do carvão mineral continua sendo uma fonte importante para a produção de eletricidade em vários países. No entanto, neste processo milhões de toneladas de cinzas de carvão mineral são gerados e causam impactos significativos ao meio ambiente. Mesmo existindo estudos demonstrando a aplicação destes resíduos no concreto a utilização do carvão mineral como subproduto ainda é considerada insuficiente, já que apenas 30% das cinzas de carvão produzidas mundialmente são reutilizadas (JAYARANJAN *et al.*, 2014).

De acordo com o World of coal Ash (2023) as usinas termoeletricas a carvão produzem cerca de 780 milhões de toneladas de cinzas de carvão mineral em todo o mundo. Os maiores produtores anuais destes resíduos são a China com a produção de 395 milhões de toneladas, seguida pelos EUA com 118 milhões de toneladas, da Índia com 105 milhões de toneladas e da Europa e África com 52,6 milhões de toneladas de cinzas de carvão (KAZI *et al.*, 2023). A produção anual de cinza no Brasil

também apresenta números significativos, em torno de 2,66 milhões de toneladas/ano de cinza volante e 396.210 toneladas/ano de cinza.

O impacto ambiental decorrente da emissão de CO₂ pelo processo de produção do cimento leva a abordagens com foco na sustentabilidade, a qual prioriza a conservação de materiais e a utilização de resíduos cimentícios suplementares (BERNDT, 2009). O consumo excessivo de areia dos rios utilizados na produção de concreto é outra preocupação ambiental, já que a utilização deste material resulta num esgotamento gradual dos recursos naturais. No entanto, existe um enorme potencial para o uso de cinzas de fundo de carvão como substituição da areia natural no concreto, já que este resíduo é bem graduado e a sua distribuição de partícula é semelhante à areia.

A indústria, buscando reduzir os impactos ambientais e melhorar propriedades físicas, químicas e mecânicas do concreto, utiliza cada vez mais resíduos minerais como adição no concreto. Dentre as adições mais estudadas com o intuito de melhorar o desempenho do concreto pode-se destacar: o metacaulim, a cinza volante e a sílica ativa, as quais podem aumentar a fixação de cloretos e reduzir a permeabilidade do concreto (ANGST *et al.*, 2009; SHI *et al.*, 2012; CAMACHO *et al.*, 2014).

Além das adições já citadas, a cinza de fundo também demonstra bons resultados na durabilidade do concreto (SUDHARSHAN *et al.*, 2023). As características das cinzas de fundo estão diretamente relacionadas ao tipo de material de combustão gerado nas usinas, ou seja, conforme o resíduo gerado e a graduação das cinzas de fundo, melhores ou piores os resultados de resistências, porosidade e adensamento do concreto. A interação entre as cinzas de fundo e o cimento possibilita uma melhoria do concreto, além da possibilidade da ocorrência do fenômeno da cura interna, tornando o concreto e a argamassa mais resistentes. Estudos com moagem mais fina das cinzas de fundo demonstraram um aumento na resistência à compressão devido ao preenchimento dos poros da mistura (KIM e LEE, 2011).

Embora a cinza de fundo possa não apresentar características químicas atrativas para ser utilizada como material de substituição no concreto, existe um mercado promissor para esse resíduo como agregado. Isso se deve à crescente preocupação ambiental com a utilização excessiva dos recursos naturais. Assim, a utilização da cinza de fundo como agregado no concreto pode proporcionar uma alternativa sustentável e eficaz na redução do impacto ambiental associado à extração de recursos naturais.

Este trabalho avaliou a influência da substituição parcial de agregado miúdo natural por cinza de fundo nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20% e 30%, além da substituição parcial de cimento por 5% de metacaulim, no potencial de durabilidade dos concretos. Para isso, foram analisados os

resultados referentes à resistência à compressão, à velocidade de pulso ultrassônico, à absorção de água por capilaridade e à migração de cloretos nos concretos produzidos. Esses ensaios buscaram compreender como as substituições podem afetar a durabilidade e a vida útil das estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo analisar o efeito da substituição de areia natural por cinza de fundo no potencial de durabilidade do concreto exposto a ambientes marinhos através da análise de indicadores de durabilidade, como absorção capilar, coeficiente de migração de cloretos, velocidade de pulso ultrassônico e resistividade elétrica superficial.

1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar física e quimicamente a cinza de fundo;
- Avaliar o impacto da substituição do cimento por 5% de metacaulim no desempenho das dosagens com cinza de fundo;
- Analisar a influência dos materiais usados no potencial de durabilidade do concreto.

1.3. Delimitação da pesquisa

- A avaliação da substituição de agregado miúdo por cinza de fundo nas concentrações de 5 %, 10 %, 15 %, 20% e 30%;
- A substituição de cimento por metacaulim na concentração de 5%;
- A dosagem do concreto com relação água/aglomerante 0,45;
- O uso apenas do cimento CP V-ARI.

1.4. Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos, sendo o primeiro capítulo formado pelos seguintes temas: introdução, considerações iniciais e objetivos e delimitações da pesquisa.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica, a qual consiste numa revisão acerca da vida útil de projetos proposto por alguns autores, assim como um esclarecimento sobre os efeitos que as adições minerais podem causar na durabilidade das estruturas de concreto. O capítulo 2 também apresenta a descrição acerca da viabilidade da utilização de agregados reciclados no concreto, as características destas adições minerais e sua sustentabilidade;

A descrição detalhada da metodologia e dos procedimentos adotados ao longo da pesquisa é apresentada no Capítulo 3. No Capítulo 4, são expostos os resultados e as respectivas análises realizadas durante o estudo. O Capítulo 5 traz as conclusões, destacando as principais contribuições e implicações do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, busca-se o entendimento dos aspectos mais importantes relacionados com a influência das adições minerais na durabilidade das estruturas de concreto armado expostas a altas concentrações de cloreto.

Além disso, também são abordados temas, como os mecanismos de transporte, sustentabilidade da utilização dos resíduos industriais no concreto, a influência das adições nas propriedades do concreto, fatores associados ao ataque de íons cloreto, a influência do uso de agregados reciclados na durabilidade do concreto e os métodos aplicados na estimativa de vida útil das estruturas de concreto.

2.1. Durabilidade das estruturas de concreto armado

O concreto é considerado durável quando mantém a sua característica original, qualidade e facilidade de manutenção ao ser exposto ao ambiente. Uma estrutura tem uma boa durabilidade quando consegue manter o seu desempenho durante sua vida útil de projeto, sob a ação de fatores de degradação (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023) a durabilidade é a “capacidade da estrutura em resistir às influências previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto”. Vida útil, por sua vez, é o “período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais”.

Em todos os conceitos demonstrados na literatura sobre a vida útil o tempo está presente, uma vez que essa variável permite prever a duração da estrutura ao longo do ciclo de vida (POSSAN, 2010). A durabilidade sofre influência do ambiente no qual o elemento estrutural está inserido, pois, o nível de agressividade determinará as características que a estrutura deverá apresentar para não comprometer a sua integridade. Diferentes partes de uma mesma estrutura podem apresentar distintos comportamentos de durabilidade ao longo do tempo (HELENE *et al.*, 2011). Os conhecimentos de técnicas que avaliam o comportamento do concreto e a sua vida útil frente aos ambientes agressivos é de vital importância não só para a durabilidade, mas também para um desenvolvimento sustentável em longo prazo (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

As manifestações patológicas que deterioram o concreto podem comprometer o desempenho e reduzir a vida útil dos elementos estruturais. Portanto, quanto maior for a dificuldade de entrada de agentes agressivos pelos poros mais durável será o concreto (OLLIVIER e TORRENTI, 2014).

2.1.1. Vida útil de projeto (VUP)

A vida útil é definida como o tempo durante o qual uma estrutura de concreto atende aos requisitos de funcionalidade e segurança estabelecidos no projeto, sem apresentar danos que comprometam sua integridade estrutural. Além das especificações do projeto, fatores externos, como o ambiente de exposição e a manutenção preventiva, influenciam na durabilidade e extensão da vida útil das estruturas de concreto.

Para descrever a deterioração ao longo do tempo, diversos modelos foram propostos, entre eles o modelo de Tuutti (1982) esse modelo considera o concreto homogêneo, sem fissuração, armado com reforço convencional, e para um período anterior a qualquer reparo realizado na estrutura. Nesse modelo a taxa de corrosão é considerada constante, porém com o aumento da concentração de cloretos na armadura ao longo do tempo a tendência é ocorrer uma elevação na taxa de corrosão. Na primeira fase do modelo definido por Tuutti compreende o acesso dos agentes deletérios através da camada de cobrimento até o aço e a desp passivação. Já na segunda fase ocorre o processo de corrosão.

Segundo o modelo proposto por Tuutti (1982), a desp passivação da armadura ocorre instantaneamente. Já Meira (2017) propõe que a transição entre as fases de iniciação e propagação seja realizada com a inclusão de uma terceira fase a desp passivação. Os períodos de iniciação e propagação ocorrem paralelamente numa mesma estrutura. Portanto, o fim da vida útil ocorre quando o conjunto de degradações nos elementos estruturais atinge um nível em que o desempenho estrutural é considerado insatisfatório (PELLIZZER, 2019). A Figura 2.1 demonstra o modelo de vida útil proposto por Tuutti. A Figura 2.2 apresenta o modelo de vida útil adaptado de Meira.

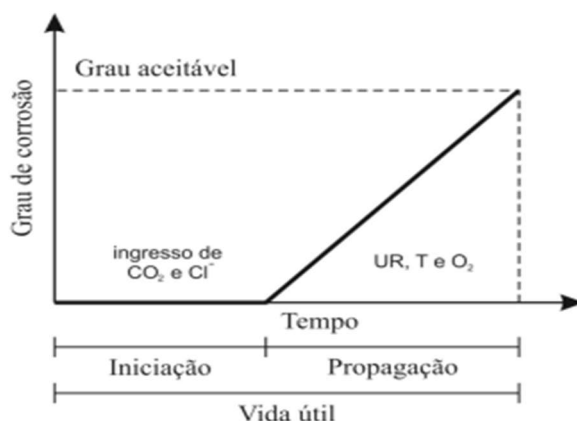


Figura 2.1: Modelo de vida útil proposto por Tuutti.

Fonte: Tuutti (1982).



Figura 2.2: Modelo de vida útil adaptado.
Fonte: Meira (2017).

O modelo de vida útil proposto Helene (1993) demonstrou maior detalhamento do concreto degradado por corrosão, dividindo o modelo em algumas fases:

- **Vida útil de projeto:** período de iniciação da corrosão, ou seja, fase entre a exposição aos agentes agressivos até a despassivação. Nesta fase caso ocorra corrosão pode ser desprezada, uma vez que os danos não representarão risco significativo para estrutura
- **Vida útil de serviço:** período relacionado ao surgimento das primeiras fissuras no cobrimento de concreto ou manchas de corrosão causadas por ataque químico. O final desta fase depende das características da estrutura e do nível mínimo de desempenho admissível.
- **Vida útil total:** período que ocorre a ruptura e colapso parcial ou total da estrutura. Nesta fase uma diminuição importante da armadura ou uma perda significativa da aderência na interface entre concreto e armadura.
- **Vida útil residual:** corresponde ao período que a estrutura poderá desenvolver as suas funções após uma vistoria ou intervenção. Esta fase ocorre na data da inspeção, que pode ser a qualquer instante da vida em uso da estrutura. A Figura 2.3 apresenta o modelo de vida útil proposto por Helene.

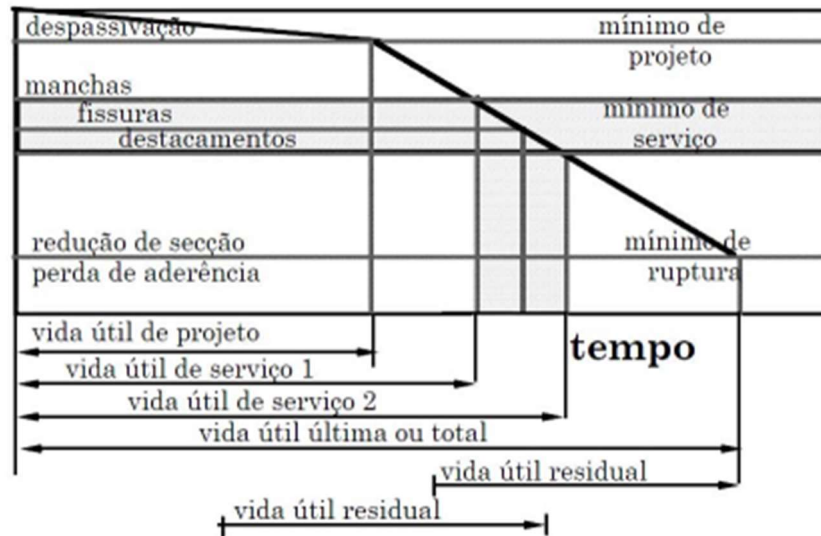


Figura 2.3: Modelo de vida útil proposto por Helene.
Fonte: Adaptado de Helene (1997).

2.1.2. Deterioração das estruturas de concreto em ambiente marinho

O concreto é considerado o material preferido nas construções em ambiente marinho (SHI *et al.*, 2012). No entanto, a existência de íons cloreto, íons sulfato e íons magnésio na água do mar pode causar reações químicas complexas, tornando o concreto vulnerável a uma variedade de processos de degradação.

No ambiente marinho com elevado grau de agressividade para o concreto, as estruturas enterradas podem estar expostas a ataques de agentes químicos, que ficam em determinada proporção, diluídos na água presentes na parte solúvel do solo. Os efeitos do ambiente marinho no desempenho de materiais e estruturas de concreto dependem da atuação dos mecanismos físicos e químicos. A interação do concreto com íons cloreto e íons sulfato na água do mar leva à modificação das propriedades intrínsecas do concreto (RAGAB *et al.*, 2016). Os impactos destes íons são adversos na durabilidade do concreto, diferentes padrões de molhagem e secagem explicam a existência de uma variação considerável na extensão da deterioração por corrosão na mesma estrutura (NEVILLE, 2016).

Para estruturas de concreto construídas em ambientes marinhos obterem resultados satisfatório tanto no desempenho, como na durabilidade é necessário avaliar as condições do ambiente e as propriedades dos materiais. Além disto outro fator importante na produção de um concreto resistente é a utilização de adições que potencializem a resistência do concreto a penetração de íons cloreto.

2.1.3. Mecanismos de transporte de agentes agressivos no concreto

Os danos que comprometem a durabilidade e a vida útil das edificações são causados principalmente devido à presença de agentes agressivos provenientes do meio em que o concreto está exposto (OLLIVIER e TORRENTI, 2014).

Os principais mecanismos de transporte de agentes agressivos no concreto incluem a absorção capilar, permeabilidade, difusão iônica e migração iônica. Essas formas de transporte, portanto, são essenciais na análise da durabilidade e vida útil do concreto em ambientes agressivos.

Meira (2017), ao comparar perfis de cloretos com transporte por difusão e perfis com a atuação simultânea de transporte por absorção capilar na superfície e de difusão no interior, observou que a atuação simultânea dos mecanismos potencializa a penetração de cloretos. A Figura 2.4 demonstra a comparação dos perfis de cloreto demonstrado por (MEIRA, 2017).

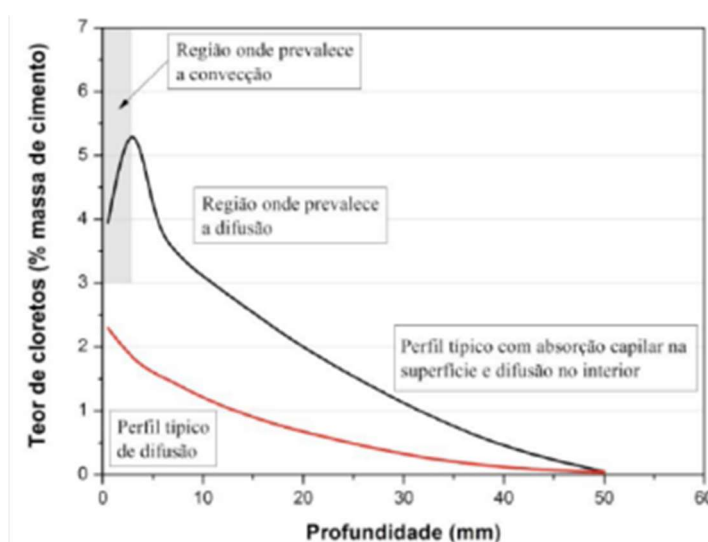


Figura 2.4: Comparação entre os perfis de cloretos em concretos.
Fonte: Meira (2017).

Helene (1993) detalhou as propriedades de transporte de fluido, pois reconhecia a importância desses fatores no desempenho de estruturas. Os mecanismos de transporte exercem papel relevante na taxa de penetração dos íons cloreto, sendo os principais destacados na Figura 2.5.

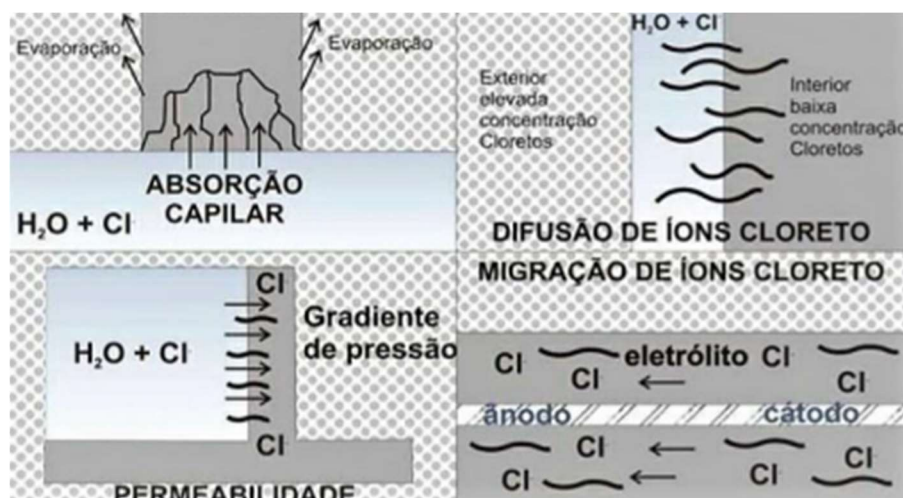


Figura 2.5: Formas de penetração de cloretos nas estruturas de concreto.
Fonte: Helene (1993).

O entendimento do comportamento destes mecanismos de transporte possibilita não só controlar a velocidade de penetração do cloreto nas estruturas de concreto, mas também estabelecer os parâmetros de projeto que devem ser usados para garantir a vida útil das estruturas.

Permeabilidade

A porosidade e a permeabilidade do concreto são propriedades fundamentais que influenciam diretamente o início da corrosão, uma vez que afetam a taxa de penetração dos íons cloreto. A permeabilidade refere-se à facilidade com que líquidos ou gases se movem através do concreto e é um dos principais mecanismos para prevenir o ataque de agentes agressivos (NEVILLE, 2013). Segundo o mesmo autor, devido à segmentação dos capilares, podem ocorrer variações significativas na permeabilidade, mesmo entre concretos com a mesma porosidade.

Li *et al.* (2020) afirmam que a porosidade do concreto varia principalmente em função da relação água/cimento e das condições de cura, como a elevação da temperatura. A permeabilidade é um dos principais indicadores da qualidade do concreto, pois reflete a capacidade de uma substância atravessar sua matriz (RIZZON, 2006).

Além disso, o tamanho e a quantidade de poros na pasta de cimento desempenham um papel crucial na durabilidade das estruturas de concreto. Cascudo (1997) ressalta que essas características controlam o deslocamento dos íons cloreto, sendo que concretos com estruturas mais compactas e de baixa permeabilidade possuem maior resistência à penetração desses agentes agressivos.

De acordo com Suryavanshi e Tin (2000), a relação água/aglomerante é inversamente proporcional à resistência à penetração de cloretos, ou seja, quanto maior essa relação, menor será a resistência do concreto. Para aumentar a durabilidade de estruturas expostas a ambientes com alta concentração de cloretos, a estratégia mais eficaz é reduzir a porosidade e a permeabilidade do concreto.

Absorção capilar

A absorção capilar é um fenômeno que ocorre em estruturas porosas e consiste na ação de forças de atração dos poros da estrutura sobre os líquidos que estão em contato com a superfície (NEVILLE, 2015). O efeito de capilaridade ocorre em espaços finos, onde a tensão superficial do líquido gera uma pressão negativa que promove o transporte através desse espaço (MC DONALD, 1998). Os poros capilares, devido ao seu tamanho relativamente grande, esvaziam-se quando a umidade relativa do ambiente desce abaixo de 45 %, mas a água adsorvida continua nos poros de gel mesmo com percentuais de umidade ambiente inferiores (NEVILLE, 1997).

A água adsorvida é aquela que se encontra próxima à superfície do sólido sob influência das forças de atração, as moléculas de água são fisicamente adsorvidas na superfície dos sólidos na pasta de cimento hidratada (MEHTA e MONTEIRO, 2008). A absorção capilar é responsável pelo transporte de um líquido devido à tensão superficial que atua nas paredes dos poros e capilares do concreto (HELENE, 1993).

Difusão

A difusão é o processo pelo qual partículas, como íons ou moléculas, se movem de uma região de maior concentração para uma de menor concentração, buscando alcançar um estado de equilíbrio onde a concentração se torne uniforme em todo o espaço disponível. Esse movimento ocorre de forma espontânea, sem a necessidade de energia externa, e é impulsionado pela diferença de concentração. A difusão é considerada o principal mecanismo de transporte de íons de cloreto através do concreto, particularmente em estruturas expostas a ambientes agressivos. Isso é amplamente discutido na literatura, com estudos como os de Tuutti (1996), Gjorv (2015) e Trejo (2017), que destacam o papel crucial da difusão na penetração de cloretos, sendo uma das principais causas de degradação de estruturas de concreto armado.

Estudos recentes, como o de Zhang *et al.* (2021), destacam que a penetração de cloretos em concretos depende não só do teor de umidade, mas também da microestrutura do concreto, em particular da conectividade dos poros. Song *et al.* (2019) sugerem que o grau de saturação influencia diretamente a resistência do concreto à difusão de cloretos, observando que concretos com menor conectividade de poros e menor grau de saturação exibem menor susceptibilidade à penetração de

íons cloreto. Esses autores concordam que, à medida que o teor de umidade diminui, o processo de difusão tende a desacelerar, podendo até cessar completamente em condições de poros totalmente secos.

Migração

A migração de íons é um processo de transporte de partículas carregadas eletricamente, como os íons cloreto, através de um material condutivo ou parcialmente condutivo, como o concreto. A migração ocorre quando um campo elétrico é aplicado ou gerado naturalmente, como em ambientes sujeitos à corrosão eletroquímica. Esse campo elétrico faz com que os íons cloreto, que são negativamente carregados, se movam em direção ao eletrodo positivo (ânodo) do campo. Esse processo pode ocorrer espontaneamente, devido à diferença de potencial elétrico entre o aço corroído e a superfície do concreto, ou de forma forçada, em ensaios de laboratório, onde um campo elétrico externo é aplicado para estudar a velocidade com que os íons cloreto penetram o concreto.

A movimentação dos íons cloreto ocorre de acordo com a polaridade do campo gerado, conforme discutido por Cascudo (1997). Estudos mais recentes, como os de Zhang *et al.* (2021), destacam que a migração de íons cloreto pode ser influenciada pelo campo elétrico gerado durante o processo de corrosão eletroquímica. Segundo Li *et al.* (2020), esse deslocamento pode ocorrer pela corrente existente no processo, contribuindo para a corrosão das armaduras de aço. Além disso, a migração dos íons cloreto tende a reduzir a resistividade elétrica do concreto, aumentando a condutividade do eletrólito e acelerando o processo corrosivo, como observou (TANG *et al.*, 2019).

2.2. Indicadores de durabilidade do concreto

A resistência do concreto não é um indicador de durabilidade adequado para a obtenção de estruturas duráveis frente aos processos de degradação que afetam o comportamento do concreto em relação ao desempenho. Em ambientes com altas concentrações de cloreto é necessário avaliar outros parâmetros além da resistência à compressão do concreto para prever a durabilidade das estruturas de concreto. Neste sentido os indicadores de durabilidade podem ser utilizados para definir com maior precisão o desempenho do concreto ao longo do tempo.

As abordagens baseadas no desempenho especificam os indicadores de durabilidade mais importantes do concreto que precisam ser avaliados, como porosidade, teor de água ou grau de saturação e coeficientes de difusão (ALEXANDER *et al.*, 2008). Dentre estes principais indicadores de durabilidade a porosidade é um parâmetro muito importante, pois influencia o coeficiente de difusão e, consequentemente, a entrada de agentes agressivos que causam corrosão da armadura.

A consideração do potencial de durabilidade da estrutura com base no seu desempenho é fundamental, uma vez que concretos com mesmos parâmetros de dosagem podem demonstrar comportamentos diferentes quando avaliadas as suas propriedades relacionadas à durabilidade (WALLY *et al.*, 2020). Além disto, o desempenho estrutural satisfatório depende não só do cumprimento das normas durante o processo construtivo, mas também durante toda a vida útil especificada, resistindo às ações e influências ambientais, sem reduzir a sua capacidade de uso. Essa “capacidade da edificação ou dos seus sistemas de desempenhar as suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas no manual de uso, operação e manutenção” é definido como durabilidade pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013). A mesma norma determina que a comprovação do atendimento dos critérios de avaliação da vida útil do projeto deve ser feita por análise de projeto, por ensaios ou por aplicações de modelo.

2.2.1. Indicadores de Durabilidade na Avaliação da Penetração de Cloretos

A avaliação da durabilidade das estruturas pode ser determinada através de vários parâmetros, os quais permitem prever a penetração de cloretos ao longo do tempo. O coeficiente de difusão no estado não-estacionário é o principal coeficiente relacionado à vida útil do material mediante a entrada de cloretos no concreto (PINTO, 2016). Normalmente os métodos utilizados para determinar o coeficiente de difusão baseiam-se no uso de células de difusão.

Entre os vários métodos utilizados para avaliar a penetração de cloretos no concreto, os métodos realizados em condições naturais apresentam limitações por necessitarem de um tempo maior no processo de difusão (RAMEZANIANPOUR *et al.*, 2011). No entanto, o processo de difusão pode ser acelerado não apenas pela diminuição da espessura da amostra, mas também pelo aumento da concentração de cloretos (STREICHER e ALEXANDER, 1994).

A avaliação da difusão dos íons cloreto no concreto, normalmente, ocorre através da medição da profundidade de penetração ou da determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto, sendo o princípio destes métodos a avaliação de um gradiente de concentração constante entre duas faces de um corpo de prova (OLLIVIER e TORRENTI, 2014).

De acordo com Ferreira (2019), em condições naturais ocorrem diversas ações, as quais demonstram resultados divergentes entre os ensaios realizados em condições naturais e aceleradas. O mesmo autor afirma que ainda falta padronização para os ensaios acelerados. A Tabela 2.1 apresenta os métodos mais utilizados para determinar o coeficiente de difusão.

Tabela 2.1: Métodos para determinar o coeficiente de difusão.
Fonte: Autora.

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

2.2.2. Fatores que influenciam o processo de penetração de cloretos no concreto

O processo de penetração de cloretos no concreto é influenciado por diversos fatores, sendo um dos mais críticos na determinação da durabilidade das estruturas de concreto armado. A difusividade dos íons cloreto é, conforme apontado por Valdes *et al.* (2017), condicionada por aspectos como o tipo de cimento, a presença de adições minerais, a geometria estrutural, a posição e presença das barras de aço, a distância até as bordas da estrutura e, particularmente, o grau de umidade do concreto. Esses fatores, combinados, afetam diretamente a porosidade e a conectividade dos poros, o que determina a facilidade com que os cloretos podem penetrar no material.

Entre os fatores citados, o tipo de cimento e o uso de adições minerais, desempenham um papel essencial na modificação da microestrutura do concreto. Essas adições geralmente reduzem a porosidade capilar, levando à formação de uma matriz mais densa e menos permeável, o que dificulta o transporte de cloretos. Além disso, como observado por Andrea (2011), a resistividade elétrica do concreto apresenta uma relação direta com sua difusividade. Concretos com maior resistividade tendem a apresentar menor permeabilidade, pois a resistividade é influenciada pela quantidade de eletrólitos presentes nos poros, que também transportam cloretos.

A presença de água nos poros do concreto também é um fator determinante. Em ambientes saturados, os poros podem estar preenchidos com água, facilitando o transporte iônico e, consequentemente, a penetração de cloretos. Por outro lado, em condições secas, o transporte é predominantemente por difusão gasosa, o que pode retardar o processo. No entanto, a alternância entre ciclos de molhagem e secagem, comum em ambientes marinhos, pode acelerar a penetração dos íons, pois a água arrasta cloretos para dentro da estrutura durante os ciclos de molhagem, e a evaporação subsequente concentra os sais nas superfícies durante os ciclos de secagem.

Outro fator importante que afeta a difusão de cloretos é a presença de fissuras no concreto. Zhang *et al.* (2017) enfatizam que a não consideração das fissuras pode levar a uma superestimação da vida útil das estruturas. Fissuras, que podem surgir devido à retração, carregamentos mecânicos ou variações térmicas, criam caminhos preferenciais para a penetração de cloretos, aumentando significativamente a taxa de difusão e reduzindo a proteção oferecida pela camada de cobrimento. Como resultado, o tempo para a despassivação das armaduras é reduzido, aumentando o risco de corrosão precoce. Isso é corroborado pelos estudos de Ožbolt *et al.* (2010), que mostram que concretos danificados apresentam uma difusão de cloretos acelerada, o que pode comprometer drasticamente a durabilidade das estruturas.

A fissura contribui para o aumento de concentração de cloretos no concreto (DJERBI *et al.*, 2008). A Figura 2.6 demonstra o aumento da concentração de cloretos com o aumento das dimensões das fissuras.

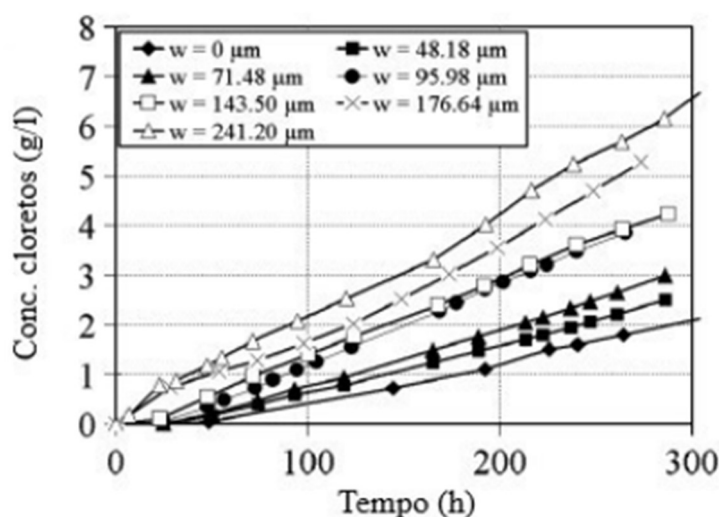


Figura 2.6: Concentração de cloretos em concretos após processo de fissuração.
Fonte: Djerbi *et al.*, (2008).

Park *et al.* (2012) afirmam que o coeficiente de difusão aumenta com o crescimento da largura da fissura, principalmente para fissura com largura superior a 0,2 mm. Sahmaran (2007) ao relacionar a largura das fissuras com difusividade do cloreto observou que existe uma função potencial entre essa relação.

Existem fatores que determinam a porosidade do concreto, os quais estão associados a dosagem, o adensamento, o fator água/aglomerante, o tipo de cimento, a adição e a condição de cura. E são esses fatores que poderão permitir ou não o ingresso dos agentes agressivos para o interior da estrutura de concreto (POSSAN, 2010). Gjorv (2015) afirma que a cura tem efeito inverso quando ocorre com temperaturas baixas, aumentando a difusão de cloretos na estrutura.

2.3. Utilização de agregados miúdos reciclados em concreto estrutural

As construções devem produzir ao meio ambiente impactos cada vez menores, buscando sempre a sustentabilidade e o reaproveitamento dos recursos existentes, gerando reduções de custos e desperdícios (REZENDE *et al.*, 2012). Pyo e Kim (2017) acreditam que a escolha por materiais sustentáveis é essencial devido às preocupações ambientais. A partir da precaução com a preservação do meio ambiente, vem aumentando a procura por materiais alternativos que possam ser usados na produção de compósitos cimentícios (MOTA *et al.*, 2017).

Para reduzir o esgotamento contínuo dos recursos naturais, a utilização de adições minerais tornou-se cada vez mais necessário, incluindo a cinza de carvão, metacaulim, cinza de casca de arroz e muitos outros (MOHAMMAD *et al.*, 2022). A cinza de carvão mineral representa um subproduto com potencial de utilização na substituição parcial do cimento, em função das características físicas e químicas semelhantes à matéria-prima usada na indústria cimenteira (KIM e LEE, 2011).

Um dos resíduos industriais de grande impacto ao meio ambiente é a cinza resultante da combustão de carvão mineral, gerada no processo de queima de carvão mineral e sendo uma das principais responsáveis pela emissão de gases que contribuem para o aquecimento global (OBERSCHEILP *et al.*, 2019). A cinza volante gerada juntamente com a cinza de fundo nas usinas termoeletricas é um material muito utilizado como substituto parcial do cimento. No entanto, a cinza de fundo é normalmente descartada em aterros sanitários (SINGH *et al.*, 2016).

As cinzas de fundo são subutilizadas ao mesmo tempo que os recursos naturais utilizados na produção de concreto reduzem drasticamente no meio ambiente. Algumas pesquisas demonstram o potencial da utilização da cinza de fundo como substituto do agregado miúdo, agregado graúdo e até mesmo do cimento no concreto (KIM e LEE, 2018; SINGH e SIDDIQUE, 2015). No entanto, a utilização deste material está restrita a obras de pavimentação, em concretos magros e em obras de drenagem.

Desta forma, somente a reutilização da cinza de fundo como agregado na construção civil aumentaria o consumo desse material no mercado (BIGOLIN, 2013). Além disto a produção de novos materiais através do reaproveitamento de resíduos industriais, não só preserva os recursos naturais, mas também reduz os inúmeros aterros sanitários onde são descartados esses materiais (SIQUEIRA *et al.*, 2012).

2.4. Cinza de fundo

A cinza de fundo, subproduto da combustão de mineral, é composta principalmente por sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e ferro, com pequenas quantidades de cálcio, magnésio, sulfato dentre outros.

A composição química deste material é determinada pela origem do carvão (SINGH e SIDDIQUE, 2023). Historicamente, a cinza de fundo tem sido utilizada na substituição de agregados finos no concreto (Ghafoori e Bucholtz, 1996), embora partículas maiores deste resíduo possam ser usadas como agregado graúdo (WEI *et al.*, 1994).

Os avanços no processamento das cinzas residuais de carvão e nas propriedades da composição cimentícia do concreto têm incentivado o uso desse material como agregado fino ou substituto do cimento no concreto (PING *et al.*, 2022). A composição da cinza de fundo é um fator importante que influencia o desempenho do concreto, pois o comportamento varia significativamente em função do tipo de carvão utilizado nas usinas térmicas (WILLIAMS e ROBERTS, 2009).

Kim e Lee (2018) destacaram a ligação entre as cinzas de fundo e o cimento, que melhora as interfaces na estrutura do concreto. A interação entre esses elementos pode resultar em um fenômeno de cura interna, aumentando a resistência à compressão devido ao preenchimento dos poros na mistura e na argamassa. Kumar (2022) reforça essa visão, acrescentando que a estrutura, o tamanho dos poros e os produtos de hidratação das cinzas de fundo, quando usadas como material cimentício ou agregado, são determinantes para o comportamento do concreto em termos de durabilidade.

A densidade da cinza de fundo também interfere na propriedade do concreto, uma vez que concretos com adição de cinza de carvão apresentam um menor peso unitário se comparado ao concreto sem adição. O estudo realizado por Mangi *et al.* (2019) destacou uma diminuição gradual da densidade nos ensaios com percentuais de 0 %, 10 %, 20 % e 30 % de substituição de cinza de fundo. Outro resultado do mesmo autor revelou a diminuição de densidade de amostras com cinzas de carvão imersas em cloreto e sulfato.

Argiz *et al.* (2018) para avaliar a viabilidade da utilização de cinzas residuais de carvão moído como constituinte de cimento em concretos expostos a ambientes com cloretos realizaram ensaios para determinar o coeficiente de migração de cloreto comparando concretos com cinzas volantes e as cinzas de fundo moídas. A Figura 2.7 mostra os resultados do coeficiente de migração de cloretos dos concretos aos 132 dias.

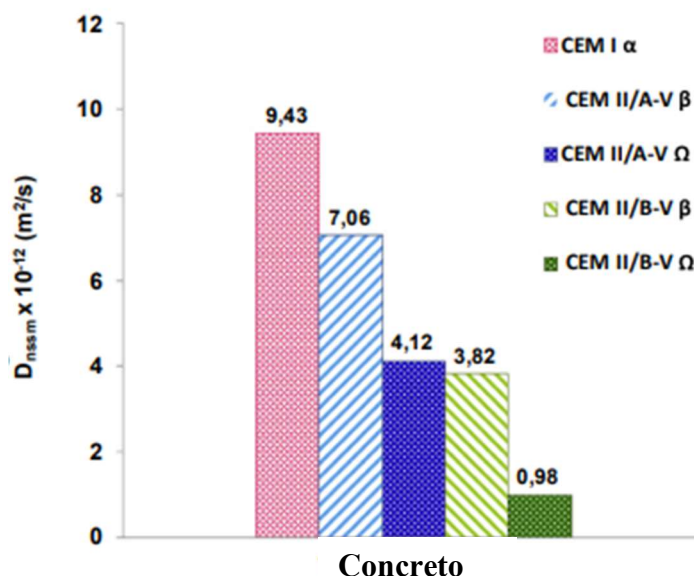


Figura 2.7: Coeficiente de migração de cloretos aos 132 dias.
Fonte: Argiz *et al* (2018).

Conforme os autores os resultados do ensaio de difusão de cloretos demonstraram que os concretos com cinzas residuais de carvão moídas (CEM II/AV Ω) e CEM II/B-V Ω) obtiveram menor coeficiente de migração de cloreto do que concretos com cinzas volantes de carvão, respectivamente, (CEM II/AV β) e (CEM II/BV β). O coeficiente de difusão de cloreto no concreto com cinza de fundo (CEM II/BV Ω) foi 3, 8 vezes menor que o concreto com cinza volante (CEM II/ BV β). Além disto, todos os concretos com adições tanto de cinzas residuais de carvão moído como de cinzas volantes apresentaram coeficientes de migração que variam de 1,3 a 9,6 vezes menores do que o concreto sem cinza (CEM I α).

Com base nas pesquisas realizadas com a utilização da cinza de fundo como material de adição no concreto, nota-se o aumento da resistência do concreto a penetração de íons cloreto, os quais são muito presentes no ambiente marinho e causam danos relevantes nas estruturas de concreto armado.

2.5. Resistência ao ataque químico do concreto com adição de cinza de carvão

O ataque químico ao concreto, como ácidos, sulfatos e cloretos, degradam as estruturas de concreto (PING *et al.*, 2022). Por outro lado, a incorporação de adições possibilita à melhora no desempenho do concreto sob aspectos como durabilidade e resistência mecânica. Além disto, a redução da permeabilidade do concreto a torna mais resistente à penetração de cloretos (CAMACHO *et al.*, 2014).

De acordo com Argiz *et al.* (2018) o concreto de alto desempenho com adição de cinza de carvão obteve não só uma redução de ataque por cloretos, mas também da retração no concreto. A

partir desse estudo foi possível demonstrar a influência da utilização das cinzas de fundo na redução dos efeitos causados pela penetração de cloreto no concreto.

A utilização das cinzas de fundo em percentuais de 10 %, 20 % e 30 % no concreto possibilitou aumento da resistência ao ataque de ácidos e sulfatos (KHAN *et al.*, 2016). Além disso, outros estudos demonstraram que independentemente do processo de tratamento das cinzas de fundo a sua adição no concreto tende a aumentar a resistência a sulfatos, a ácidos e ataque de cloretos.

Kim e Lee (2018) realizaram experimentos comparando o desempenho de resistência do concreto com 100 % de adição de cinzas com o concreto convencional e os resultados encontrados indicaram que a utilização de cinza de fundo moída no concreto reduz a penetração de cloretos no concreto. Argiz *et al.* (2018) descobriram que os coeficientes de deslocamento e dispersão de cloreto diminuíram quando a cinza residual de carvão moído é utilizada como constituinte do cimento.

Camacho *et al.* (2014) demonstraram a influência positiva da adição de cinza volante pelo aumento da capacidade de fixação química de cloretos devido à grande quantidade de aluminatos na sua composição. A adição de cinza volante no concreto é considerada um recurso eficaz para mitigar a corrosão de armaduras por cloretos (SHI *et al.*, 2012).

Cabe ressaltar que o comportamento do concreto com incorporação de cinza de fundo está diretamente relacionado ao tipo de material de combustão gerado nas usinas. A composição física e química destes resíduos pode ser completamente diferente, assim como a granulometria, porosidade e a pozolanicidade. Logo os resultados obtidos neste trabalho não necessariamente serão os mesmos demonstrados nas pesquisas anteriormente citadas.

2.6. Metacaulim

O metacaulim é composto predominantemente por dois elementos principais: sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). A sílica representa cerca de 50% de sua composição, enquanto a alumina corresponde a aproximadamente 40% (MEDINA, 2011). Além desses elementos principais, o metacaulim pode conter pequenas quantidades de óxidos de ferro (Fe_2O_3) e óxidos de magnésio (MgO), que influenciam na trabalhabilidade do concreto. Esses óxidos atuam na modificação da viscosidade e da coesão da pasta, além de contribuir para o controle de reações químicas durante o processo de hidratação.

O uso de adições pozolânicas, como o metacaulim, é amplamente reconhecido por suas contribuições à durabilidade do concreto, principalmente devido às suas capacidades de reduzir a porosidade do concreto. Isso ocorre porque o metacaulim, ao reagir com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) liberado durante a hidratação do cimento, forma compostos adicionais de silicato de cálcio hidratado

(C-S-H), responsáveis por densificar a matriz do concreto. Pereira *et al.* (2022) destacam que o metacaulim não apenas melhora a resistência mecânica do concreto, mas também aumenta sua durabilidade ao refinar a microestrutura e reduzir a permeabilidade à água e a agentes agressivos, como os íons cloreto. A redução da permeabilidade resulta em uma menor quantidade de agentes nocivos penetrando no concreto, o que é fundamental para prolongar a vida útil de estruturas expostas a ambientes agressivos, como áreas costeiras ou industriais.

Al-Swaidani *et al.* (2016) enfatizam que a adição de metacaulim reduz significativamente a porosidade capilar, melhorando a resistência à penetração de cloretos, especialmente em ambientes agressivos. Eles observaram que o uso de metacaulim é eficaz para aumentar a densidade da matriz de concreto, o que não só reduz o transporte de substâncias nocivas, como também aumenta a resistência à corrosão de armaduras. Isso ocorre porque as pozolanas, como o metacaulim, apresentam teores mais elevados de aluminatos (Al_2O_3) do que o clínquer tradicional, o que favorece a formação de produtos hidratados que são capazes de imobilizar íons cloreto. A presença de alumina no metacaulim promove reações que aumentam a capacidade de fixação de cloretos, o que é essencial para a proteção do concreto contra o ataque de agentes agressivos (Zhao *et al.*, 2020).

Scrivener *et al.* (2019) reforçam que o uso de metacaulim, combinado com outras adições minerais, pode prolongar significativamente a vida útil das estruturas de concreto. Isso ocorre porque a melhoria na densidade e na resistência à penetração de cloretos reduz a necessidade de manutenções e reparos ao longo do tempo, tornando as estruturas mais duráveis e resistentes à ação de agentes agressivos.

Shi *et al.* (2021) acrescentam que o uso de metacaulim no concreto melhora a resistividade elétrica do material, um indicador importante da sua capacidade de conduzir íons, como os íons cloreto. Isso é particularmente relevante para prevenir a corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado, que é um dos principais mecanismos de degradação de estruturas em ambientes marinhos. O aumento da resistividade elétrica, aliado à diminuição da porosidade, resulta em uma proteção mais eficaz contra a corrosão, contribuindo para a durabilidade e vida útil das estruturas de concreto.

A utilização do metacaulim nas misturas de concreto oferece uma série de benefícios, como maior durabilidade, resistência à penetração de cloretos e prevenção da corrosão de armaduras. Assim, a incorporação de metacaulim não só melhora as propriedades mecânicas e duráveis do concreto, mas também contribui para práticas de construção mais ecológicas e sustentáveis.

2.7. Confiabilidade das estruturas de concreto

A confiabilidade é a probabilidade de um sistema não apresentar falha ao longo da vida útil

do projeto (BECK, 2019). Com a análise de confiabilidade é possível não só avaliar o nível de segurança de uma determinada estrutura, mas também tomar decisões através dessas informações. Para garantir um desempenho adequado das estruturas é necessário avaliar as incertezas relacionadas às variáveis envolvidas no dimensionamento dos projetos tais como: os modelos matemáticos, os parâmetros das estruturas, as propriedades dos materiais e as cargas permanentes e acidentais utilizadas.

A confiabilidade de um sistema estrutural é definida a partir da margem de segurança do projeto, pois desse modo é possível assegurar uma mínima condição de resistência para suportar todas as ações atuantes no elemento estrutural. Desse modo a confiabilidade estrutural busca garantir que a resistência seja sempre maior que a solicitação ($R > S$) ao longo da vida útil da estrutura conforme é demonstrado na equação.

A avaliação das incertezas é fundamental, uma vez que possibilita identificar e prever do comportamento estrutural os possíveis riscos envolvendo o projeto. Os autores BECK, 2017; BECK, 2019, afirmam que as incertezas podem ser classificadas como:

- Incertezas físicas: Incerteza relacionada à aleatoriedade dos fenômenos químicos, biológicos, físicos e podem ser obtidas através das variáveis, ou experiências anteriores.
- Incertezas devidas a fatores humanos: Incerteza associada a erros cometidos nos processos de dimensionamento e construção.
- Incertezas estatísticas: Incerteza associada aos resultados estatísticos
- Incertezas de modelagem: Ocorrem através das teorias do comportamento real dos materiais e das simplificações.
- Incertezas de caráter fenomenológico: Incerteza relacionada a situações inimagináveis ou não prevista durante o projeto.

As estruturas podem entrar em colapso se as condições determinadas no início do projeto não forem respeitadas. Além disso, existem vários estados limites que definirão o desempenho e as condições necessárias para que o projeto alcance a confiabilidade esperada das estruturas. O método do estado limites últimos considera as incertezas relacionadas às variáveis no cálculo determinístico.

2.7.1. Métodos para Análise de Confiabilidade Estrutural

Para avaliar a confiabilidade das estruturas são utilizados dois tipos de métodos: O método baseado na simulação de Monte Carlo e o método analítico FORM, SORM, SORM. O método Analítico apresenta uma menor precisão, não sendo indicado em algumas situações de análise estrutural,

já o método de simulação por apresentar uma maior simplicidade podem ser aplicados até em problemas não lineares.

A partir dos dados e informações obtidos sobre o projeto estrutural os métodos de confiabilidade podem ser classificados em cinco níveis (MADSEN *et al*, 1986, DINIZ, 2006):

Nível 0 – Método das Tensões Admissíveis: O método consiste em comparar o valor da tensão do carregamento Máximo esperado com o da tensão admissível do material. A tensão admissível é calculada dividindo o valor da tensão limite, por um fator de segurança;

Nível 1 – Método dos Estados Limites: Este método é adotado como critério de segurança pelas normas brasileiras de projeto estruturais também são conhecidos como projetos semi-probabilísticos, já que os coeficientes de calibração são definidos com os níveis superiores. Os fatores de segurança parciais majoram as resistências diminuem as resistências.

Nível 2 – Métodos do Índice de Confiabilidade: Neste método é utilizado uma correlação entre os parâmetros, além de dois valores para cada incerteza, as quais são definidas através de modelos probabilísticos.

Nível 3 – Métodos da Probabilidade de Falha: Neste a possibilidade de falha da estrutura é obtida a partir do resultado do índice de confiabilidade.

Nível 4 – Método da Minimização dos Custos Envolvidos ao Longo da Vida Útil: Estes métodos combinam a confiabilidade com a otimização estrutural. Além disso, os custos durante a vida útil da estrutura são calculados e relacionados as condições atuais, buscando reduzir os custos.

Índice de Confiabilidade β

O índice β é utilizado com o objetivo de comparar métodos e analisar a segurança dos sistemas estruturais. Esse índice representa a menor distância da origem do espaço normal padrão das variáveis aleatórias até o limite de falha e permite com poucas informações o cálculo direto da probabilidade de falha. Valores elevados do β indicam uma menor probabilidade de falha, já valores baixos desse parâmetro significa que o sistema apresenta maior probabilidade de falha. O índice de confiabilidade β pode ser determina através da Figura 2.8.

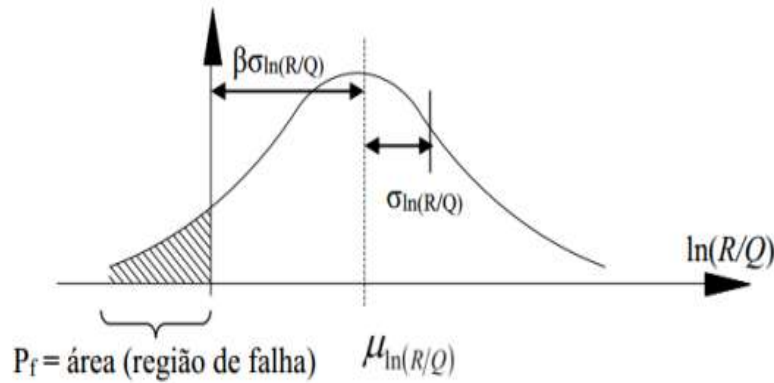


Figura 2.8: Índice de confiabilidade β (Alves, 2014).

A área abaixo da curva demonstra a probabilidade de falha, já o índice de confiabilidade β é obtida pela distância entre a origem a média e a origem.

Simulação de Monte Carlo

A simulação de Monte Carlo envolve a geração de amostras aleatórias de forma a simular numericamente vários experimentos (MELCHERS; BECK, 2018). Cada amostra gerada representa um conjunto de valores de variáveis aleatórias diferentes não havendo limite no número de variáveis do problema ou na complexidade do modelo.

O método de Monte Carlo é baseado num programa de computador, o qual demonstra o comportamento de um sistema através de um conjunto de parâmetros de entrada, os quais são obtidos de maneiras aleatórias. A partir das simulações é possível avaliar a durabilidade e vida útil de estruturas de concreto, o método pode ser utilizado para calcular a probabilidade de falha Pf .

O cálculo da probabilidade de falha (Pf) por meio do método de Monte Carlo envolve a geração de amostras aleatórias das variáveis de interesse, como resistência e solicitação, a partir de suas distribuições probabilísticas. A função estado-limite ($g(X) = R - S$) é utilizada para determinar a condição de falha, sendo que, quando $g(X) \leq 0$, ocorre falha. A Pf é calculada como a razão entre o número de simulações que resultam em falha e o número total de simulações. Com um número significativo de amostras, a estimativa da probabilidade de falha (Pf) se torna mais precisa, refletindo melhor o comportamento real do sistema. Este método permite realizar previsões do desempenho estrutural ao longo do tempo e identificar os cenários mais críticos que podem comprometer a durabilidade e a vida útil da estrutura. Para utilizar a simulação de Monte Carlo é necessário não só realizar uma análise determinística, mas também uma distribuição probabilística das variáveis.

2.7.2. Previsão de Vida útil das estruturas de concreto armado

A previsão da vida útil das estruturas de concreto armado pode ser muitas vezes complexo por depende não só das propriedades do concreto, mas também do ambiente em que a estrutura está inserida. O fim da vida útil das estruturas ocorre quando os materiais constituintes deterioram -se a tal nível que o seu uso contínuo é considerado inseguro ou antieconômico (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Os mesmos autores afirmam que uma vida útil longa é considerada sinônimo de durabilidade.

Segundo Andrade *et al.* (2013) para verificar a durabilidade das estruturas é necessário analisar três níveis:

- Modelos que consideram o tempo.
- Modelos utilizando propriedades do concreto.
- Métodos prescritivos.

O projeto da vida útil da estrutura é determinado através de modelos analíticos ou numéricos. Nestes modelos análises realizadas em laboratório verificam a confiabilidade dos valores definidos nos parâmetros do modelo. Outros fatores como a resistência da estrutura e a agressividade do ambiente são calculadas em função do tempo através de um modelo que pode ter diferentes graus de complexidade (ANDRADE *et al.*, 2013).

A vida útil (VU) é definida pela NBR 15575 (ABNT, 2013) como sendo o período efetivo que uma construção ou qualquer um dos seus componentes satisfazem os requisitos de desempenho para qual foram projetados e construídos. A vida útil deverá abranger não só o projeto, mas também materiais, execução, desempenho e sustentabilidade.

3. METODOLOGIA

Neste primeiro momento são demonstrados os materiais utilizados nos ensaios experimentais, assim como todos os processos necessários para caracterização de cada etapa do processo. Entre eles estão a dosagem do concreto, a execução, a cura, assim como os ensaios de resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade, velocidade de pulso ultrassônico, coeficiente de migração no estado não estacionário e resistividade elétrica dos concretos.

Posteriormente, com base nos resultados obtidos nos ensaios, é avaliado o desempenho apresentado pelos concretos produzidos com adição de cinza de fundo. A Figura 3.1 apresenta a metodologia do trabalho.

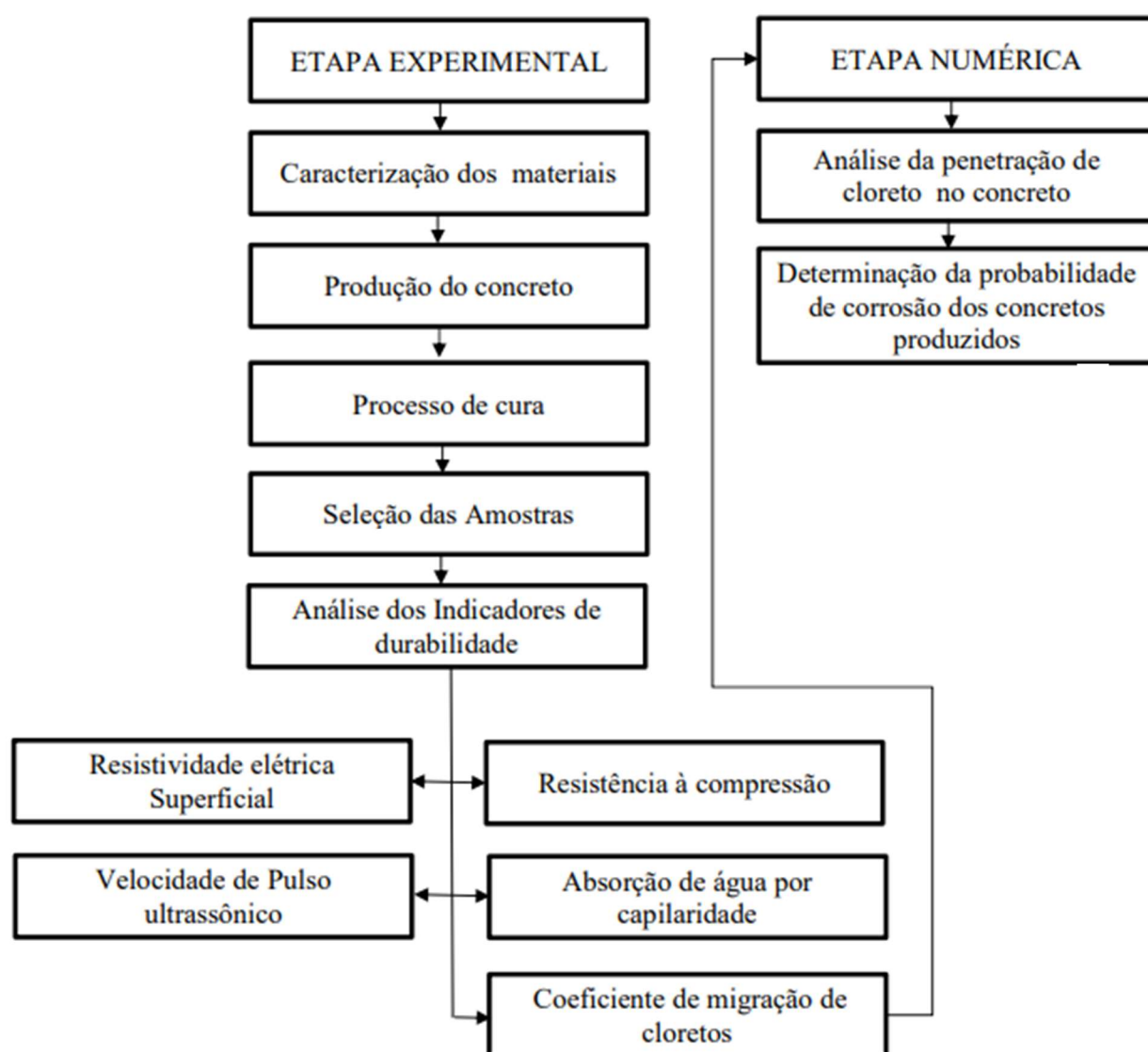


Figura 3.1: Metodologia do trabalho.

Fonte: Autora

3.1. Materiais

Cimento

O cimento Portland utilizado foi o CPV-ARI por ser um cimento mais puro em termos de adições minerais, facilitando assim a compreensão da ação da cinza e do metacaulim. O cimento CPV-ARI apresenta área superficial (BET) 2,4053 m²/g, volume total de poros (BJH) 0,01033 cm³/g e tamanho médio dos poros (BJH) 163,242 Å.

Areia fina natural

O material foi obtido na cidade de Pelotas-RS e submetido a ensaios de caracterização, cujos procedimentos foram realizados de acordo a NBR 17054 (ABNT, 2022). A tabela 3.1 apresenta os resultados da caracterização física do agregado miúdo natural. A curva granulométrica do agregado miúdo é apresentada na Figura 3.2.

Tabela 3.1: Composição Granulométrica da areia fina.

Peneiras mm	Areia fina	
	% Retido	% Retido acumulado
4,8	0	0
2,4	0,7	0,7
1,2	0,8	1,5
0,6	8,1	9,6
0,3	43,6	53,2
0,15	34,6	87,8
< 0,15	12,2	100
Total	100	-
Módulo de finura	1,53	
Diâmetro Máx mm	1,2	

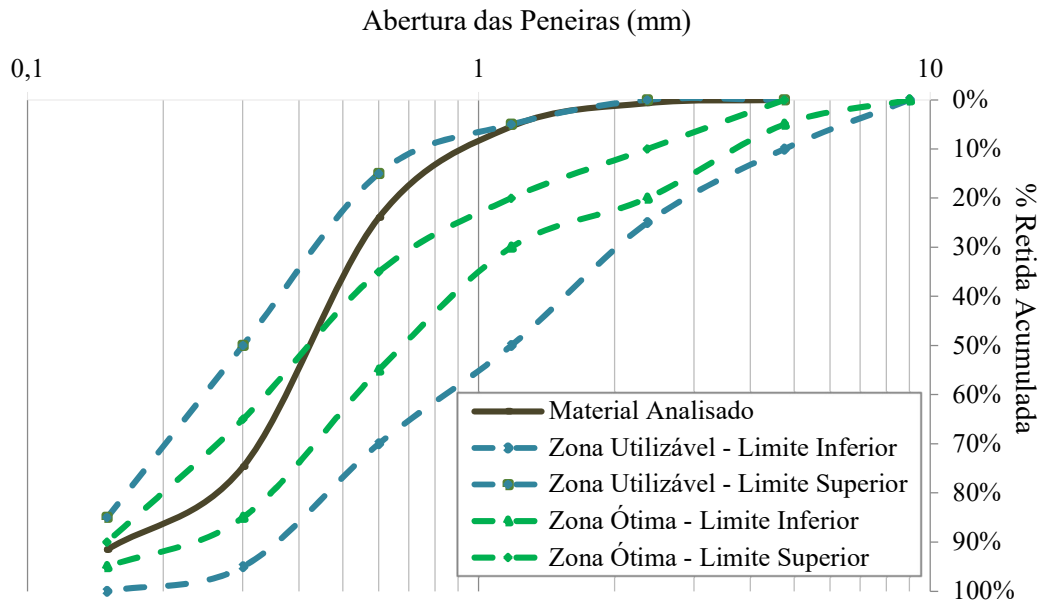


Figura 3.2: Curva granulométrica da areia fina.

Areia média natural

A areia média utilizada na produção do concreto é proveniente da cidade de Pelotas-RS e as suas características granulométricas são descritas de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022). A Tabela 3.2 demonstra a composição granulométrica da areia média). A curva granulométrica da areia média é apresentada na Figura 3.3.

Tabela 3.2: Composição Granulométrica da areia média.		
Peneiras mm	Areia Média	
	% Retido	% Retido acumulado
4,8	2	2
2,4	6,1	8,1
1,2	24,5	32,6
0,6	15,3	47,9
0,3	47,2	95,1
0,15	3,1	98,2
< 0,15	1,8	100
Total	100	-
Módulo de finura	2,83	
Diâmetro Máx mm	4,8	

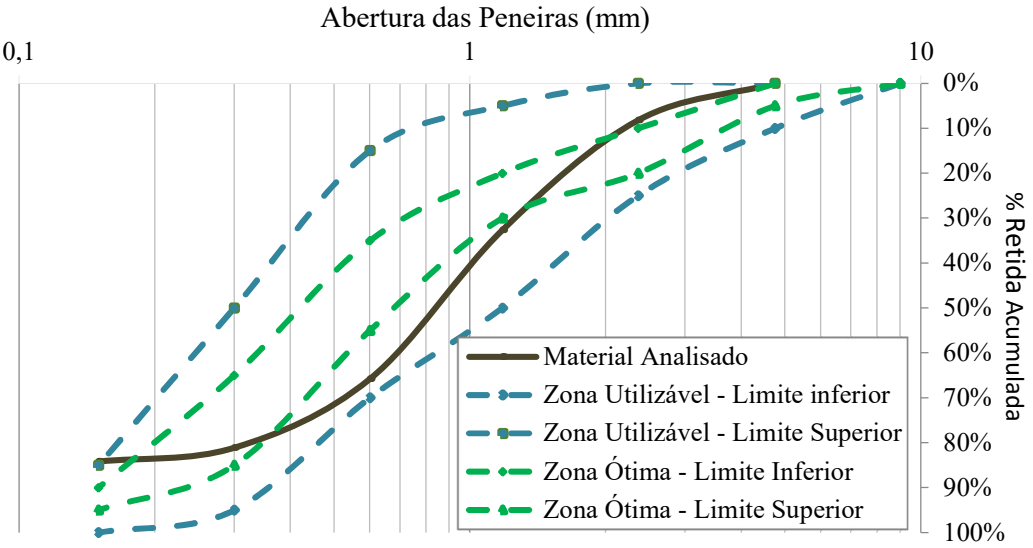


Figura 3.3: Curva granulométrica da areia média.

Agregado Graúdo

Para a pesquisa adotou-se a pedra brita 1 obtida na cidade de Capão do leão. A Tabela 3.3 apresenta os valores obtidos nos ensaios de caracterização, cujos procedimentos foram executados de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022). A curva granulométrica da brita 1 é apresentada na figura 3.4.

A caracterização física do material analisado demonstra uma distribuição granulométrica intermediária entre a Brita 0 e a Brita 1. Isso indica que esse material pode ser utilizado em aplicações que exigem agregados de granulometria controlada.

Tabela 3.3: Análise Granulométrica da brita 1.

Peneira mm	Brita 1	
	% Retido	% Retido acumulado
19	0	0
12,5	24,3	24,3
9,5	50,8	75,1
6,3	24,2	99,3
4,8	0	99,3
< 4,8	0	99,3
Total	99,3	-
Módulo de finura	6,71	
Diâmetro Máx mm	12,5	

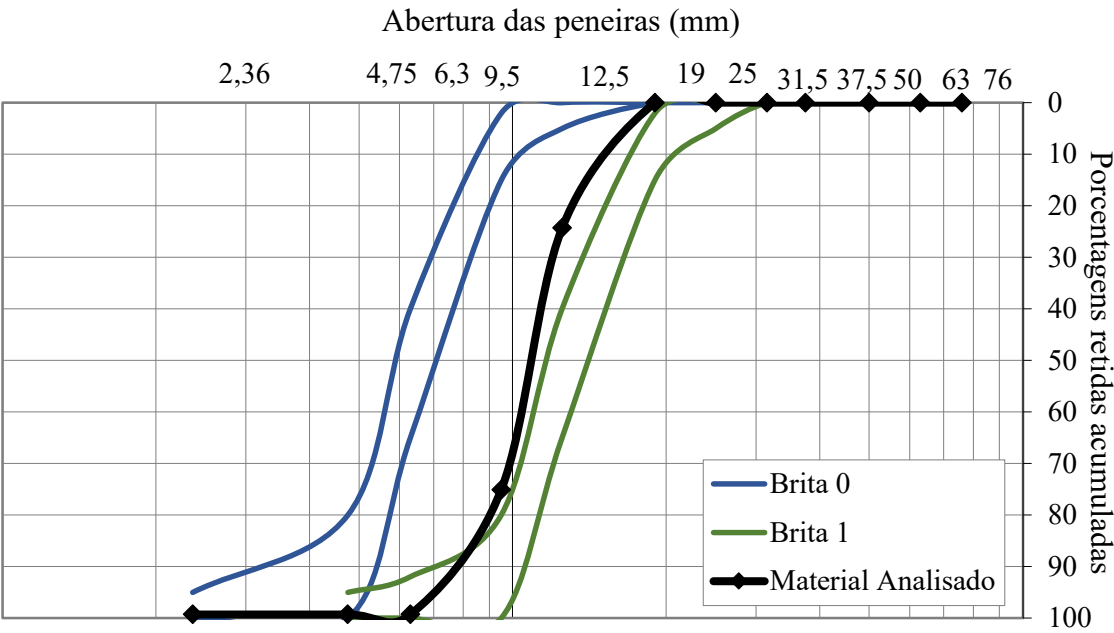


Figura 3.4: Curva granulométrica da brita 1.

Cinza de fundo

A Cinza de Fundo utilizada na produção dos corpos de prova é um resíduo gerado do processo da queima de carvão mineral do Polo Petroquímico de Triunfo (RS). A Tabela 3.4 apresenta a composição granulométrica, cujos procedimentos foram realizados de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022). A figura 3.5 apresenta a curva granulométrica da cinza de fundo. Nas figuras 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 nota-se que os materiais analisados estão dentro da zona considerada adequada para utilização.

Tabela 3.4: Composição Granulométrica da Cinza de fundo.

Peneiras mm	Cinza de fundo	
	% Retido	% Retido acumulado
4,8	0	0
2,4	4,6	4,6
1,2	16,3	20,9
0,6	20,3	41,2
0,3	34,7	75,9
0,15	16,9	92,8
< 0,15	7,2	100
Total	100	-
Módulo de finura	2,35	
Diâmetro Máx mm	2,4	

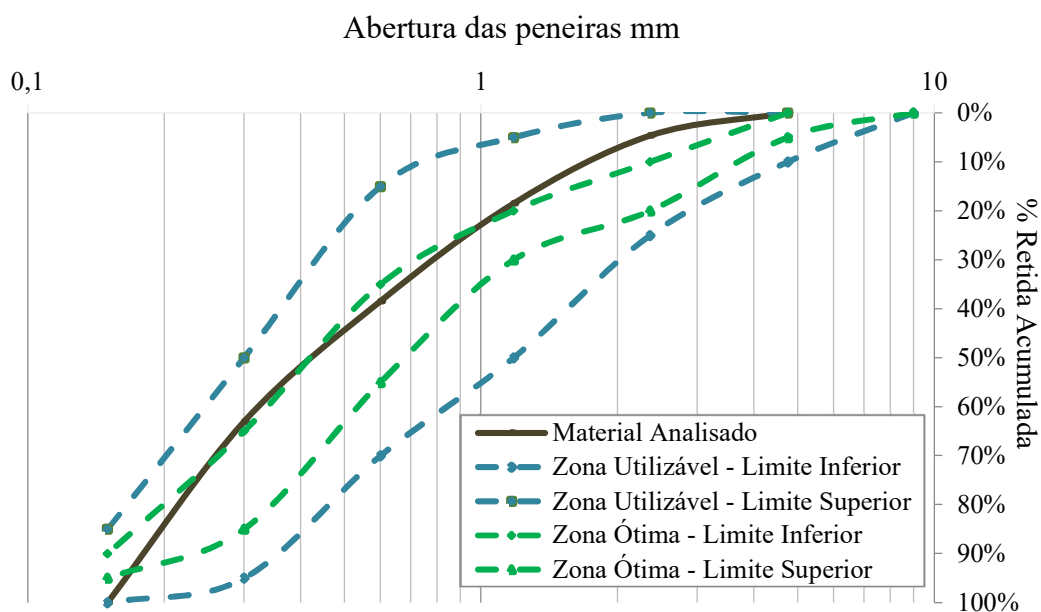


Figura 3.5: Curva granulométrica da cinza de fundo.

A cinza de fundo foi analisada por ensaios de fluorescência de raios - X por dispersão de energia (EDX) e difração de raios - X (DRX) no Laboratório de Raios - X Centro Multiusuário CMU/CCT/UDESC. A Tabela 3.5 apresenta os resultados obtidos no ensaio de fluorescência de raios - X (EDX).

Tabela 3.5: Caracterização Química da cinza de fundo.

Elementos	Teor (%)
SiO ₂	42,238
Al ₂ O ₃	29,378
Fe ₂ O ₃	18,474
K ₂ O	2,255
CaO	3,202
MnO	0,176
CuO	0,051
Rb ₂ O	0,032
SrO	0,067
TiO ₂	2,437
ZrO ₂	0,287
NbO	0,023
V ₂ O ₅	0,078
ZnO	0,081
P ₂ O ₅	0,298

Com base na tabela 3.5, observa-se uma predominância de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), que juntos representam mais de 90% da composição total. De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), esse teor elevado desses óxidos classifica a cinza de fundo como um material com potencial pozolânico, uma vez que supera o limite mínimo de 70% estabelecido pela norma.

A presença significativa de sílica (42,238%) indica um potencial pozolânico, sugerindo que a cinza de fundo pode reagir com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento, contribuindo para a densificação da matriz de concreto e, potencialmente, melhorando sua durabilidade. Entretanto, a confirmação da reatividade da cinza de fundo depende de ensaios específicos, como o teste de atividade pozolânica e análise calorimétrica.

O gráfico de difração de raios - X (DRX) obtido Figura 3.6 apresenta os valores de 2θ no eixo horizontal, representando os ângulos de incidência dos raios - X, e a intensidade de difração no eixo vertical, que reflete a quantidade de radiação difratada em cada ângulo.

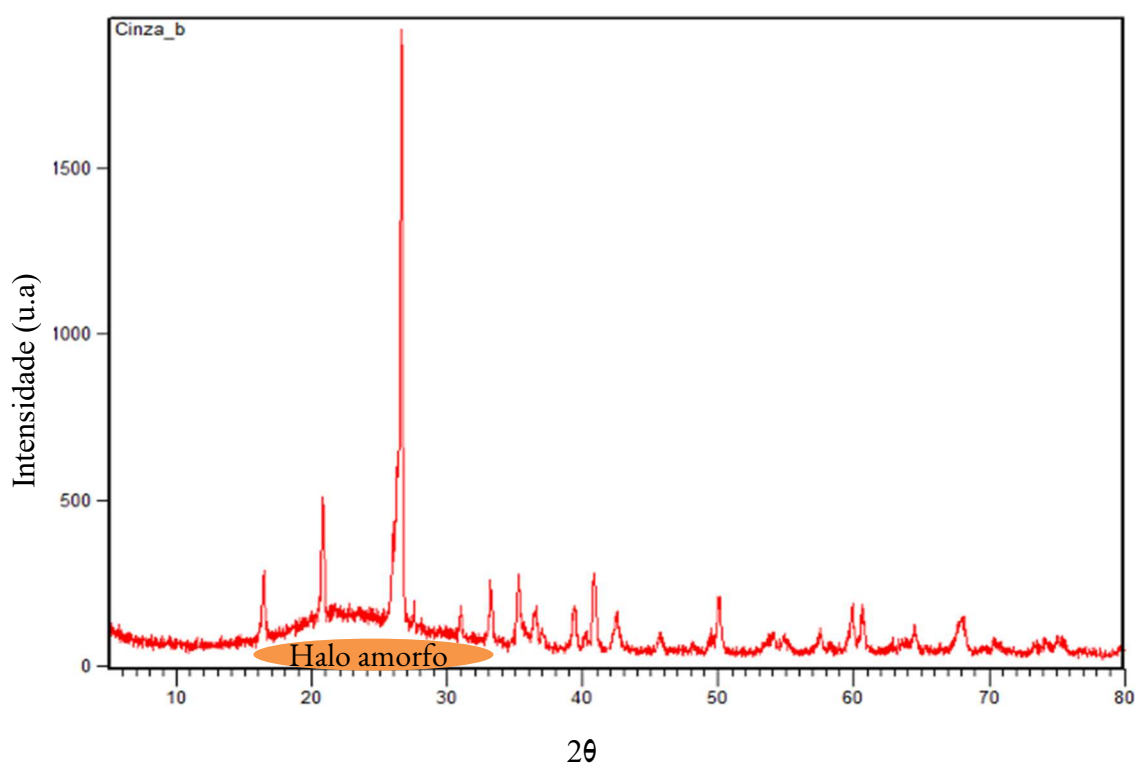


Figura 3.6: Difratograma da cinza de fundo.

A análise de difração de raios - X (DRX) da cinza de fundo revelou que o material é composto predominantemente por fases cristalinas. Os picos de difração observados são compatíveis com a

presença de óxidos de ferro (Fe_2O_3) e óxido de silício (SiO_2), indicando a predominância dessas fases minerais.

Além disso, foi identificada uma região amorfa, representada por uma elevação ampla e sem picos nítidos entre 15° e 35° (2θ) demonstrado pela formação do halo amorfo. Essa região ampla indica a presença de uma fase não cristalina ou amorfa. A análise dos dados indica que, apesar de o material ser predominantemente cristalino, a presença da fase amorfa pode influenciar propriedades como reatividade e comportamento mecânico do material.

Propriedades físicas da cinza de fundo: área superficial, volume de poros e tamanho de poros apresentados na tabela 3.6.

Tabela 3.6: Propriedades físicas da cinza de fundo

Propriedades	Cinza de fundo
Área superficial (BET) m^2/g	3,0058
Volume total de poros (BJH) cm^3/g	0,00966
Tamanho médio dos poros (BJH) $\text{\AA}$	123,277

Com base nas propriedades físicas da cinza de fundo, como a área superficial baixa (3,0058 m^2/g), o volume total de poros reduzido (0,00966 cm^3/g) e o tamanho médio dos poros (123,277 $\text{\AA}$), pode-se concluir que esse material possui características que favorecem a redução da permeabilidade e a melhoria da durabilidade do concreto. Embora a reatividade da cinza de fundo seja limitada devido à menor área superficial esse material pode contribuir para a diminuição da porosidade e aumentar a resistência à penetração de agentes agressivos, sendo mais eficaz quando combinada com outros materiais de maior reatividade, como o metacaulim.

Metacaulim

Para a caracterização química do metacaulim foi realizado o ensaio de fluorescência de raios - X por dispersão de energia (EDX) no laboratório do grupo de pesquisas NOVONANO da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). A Tabela 3.7 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 3.7: Caracterização Química do metacaulim.

Elementos	Teor (%)
SiO ₂	41,15
K ₂ O	2,33
CaO	0,082
Fe ₂ O ₃	16,61
MnO	0,37
Cu ₂ O	-
Rb ₂ O	-
SrO	0,021
Al ₂ O ₃	35,57
TiO ₂	2,84
ZrO ₂	0,59
Nb ₂ O ₅	0,19
V ₂ O ₃	0,14
ZnO	0,067

Com os resultados da tabela 3.7, verifica-se que o material contém altos teores de sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃), correspondendo a 41,15% e 35,57%, respectivamente. Esses dois componentes, somados ao óxido de ferro (Fe₂O₃) em 16,61%, resultam em um total de 93,33%, acima do limite de 70% exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2014) para caracterizar materiais como pozolânicos. Assim, o metacaulim pode ser considerado um material com elevado potencial para reações pozolânicas.

Além disso, outros óxidos, como TiO₂ (2,84%) e K₂O (2,33%), complementam sua composição, contribuindo para suas propriedades físicas e químicas no concreto. O teor baixo de CaO (0,082%), reforça o papel do metacaulim em consumir o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento, favorecendo a formação de uma matriz mais densa e resistente.

Propriedades físicas do metacaulim: área superficial, volume de poros e tamanho de poros apresentados na tabela 3.8.

Tabela 3.8: Propriedades físicas do metacaulim.

Propriedades	Metacaulim
Área superficial (BET) m ² /g	25,6354
Volume total de poros (BJH) cm ³ /g	0,17336
Tamanho médio dos poros (BJH) Å	241,937

A partir da tabela 3.8, conclui-se que este material possui características favoráveis para melhorar o desempenho do concreto. Sua alta área superficial ($25,6354 \text{ m}^2/\text{g}$) indica um potencial significativo para reações pozolânicas, contribuindo para a densificação da matriz cimentícia e o consumo de hidróxido de cálcio. O volume total de poros moderado ($0,17336 \text{ cm}^3/\text{g}$) sugere que o metacaulim pode reduzir a porosidade global, promovendo uma menor permeabilidade, enquanto o tamanho médio dos poros ($241,937 \text{ Å}$) indica que esse material possui poros eficazes em limitar a penetração de agentes agressivos, como íons cloreto.

3.1.1 Produção dos concretos

O preparo do concreto foi realizado numa betoneira intermitente de eixo inclinado. Para os ensaios foram moldados 16 corpos de prova cilíndricos ($\varnothing 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$) para cada traço de concreto produzido.

Doze traços de concreto foram produzidos no laboratório. Os concretos foram identificados como C0, C5, C10, C15, C20 e C30 com substituição de agregado miúdo por cinza de fundo nos teores de 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 % e 30%, respectivamente. Os concretos CMK0, CMK5, CMK10, CMK15, CMK20 e CMK30 foram produzidos com 5% de substituição de cimento por metacaulim e 0 %, 5 %, 10 %, 15%, 20% e 30% de substituição de agregado miúdo por cinza de fundo, respectivamente. Adotou-se o abatimento de $100 \pm 10 \text{ mm}$ e a relação água/aglomerante de 0,45 para todos os traços produzidos. O aditivo polifuncional com massa específica variando entre 1,14 e $1,20 \text{ g/cm}^3$ foi adicionado na produção dos corpos de provas conforme as concentrações necessárias para cada traço. A Tabela 3.9 apresenta o consumo de materiais por metro cúbico de cada traço de concreto produzido.

Tabela 3.9: Concretos Produzidos (unidade: kg/m^3).

Concreto	C0	C5	C10	C15	C20	C30	CMK0	CMK5	CMK10	CMK15	CMK20	CMK30
Cimento (CPV-ARI)	441	441	441	441	441	441	419	419	419	419	419	419
Metacaulim	-	-	-	-	-	-	22	22	22	22	22	22
Cinza de fundo	-	35	70	105	141	211	-	35	70	105	141	211
Areia fina	140	105	70	35	-	-	140	105	70	35	-	-
Areia média	565	565	565	565	564	494	565	565	565	565	564	494
Brita 1	1058	1058	1058	1058	1058	1058	1058	1058	1058	1058	1058	1058
Água	198	198	198	198	198	198	198	198	198	198	198	198
Aditivo (%)	0,21	0,20	0,21	0,24	0,27	0,21	0,21	0,29	0,37	0,20	0,21	0,21
Slump (mm)	100	100	95	95	95	100	95	95	100	95	95	100

Conforme a NBR 5738 (ABNT, 2016), os corpos de prova foram mantidos saturados com água e hidróxido de cálcio a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ até alcançar a idade para a realização dos ensaios. Os traços produzidos apresentam concentrações de cinza de fundo distintos com o objetivo de avaliar a influência desse mineral em propriedades relacionadas à durabilidade do concreto. A dosagem foi baseada no método do IPT/EPUSP (1992). A escolha desse método deve-se à possibilidade de realizar ajustes na incorporação de adições nos traços produzidos, bem como à adaptabilidade aos materiais utilizados.

3.1.2. Avaliação das propriedades dos concretos

Resistência à compressão

Dois corpos de prova de cada traço, foram avaliados através do ensaio de resistência à compressão para as idades de 7 dias, 28 dias, 90 dias e 180 dias conforme as especificações da NBR 5739 (ABNT, 2018).

Absorção de água por Capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade fornece informações relevantes para a análise de durabilidade do concreto, uma vez que concretos com baixa permeabilidade apresentam melhor resistência ao ataque químico.

O ensaio de absorção de água por capilaridade, foi realizado conforme as determinações da NBR 9779 (ABNT, 2012), que define a capacidade do concreto em absorver água devido à ascensão capilar. Para a realização do ensaio foram mantidos na estufa três corpos de prova de ($\varnothing 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$) de cada traço pelo período de 24 h e, após o seu resfriamento em temperatura ambiente, foram determinados os valores de massa seca. As amostras, então, foram mantidas em contato com uma lâmina d'água de $(5 \pm 1) \text{ mm}$. As pesagens foram realizadas em períodos de 3, 6, 24, 48 e 72 h. A absorção de água por capilaridade foi obtida através da equação 3.1

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{S} \quad (3.1)$$

Onde

- m_{sat} = massa do corpo de prova saturado (g);
- m_s = massa do corpo de prova seco (g);
- S = área da seção transversal (cm^2);

- C = absorção de água por capilaridade(g/cm²).

A Figura 3.7 demonstra a realização do ensaio de absorção de água por capilaridade.



Figura 3.7: Ensaio de absorção de água por capilaridade.

Determinação do coeficiente de migração de cloretos

Para determinar o coeficiente de migração de cloretos aparente em estado não-estacionário e a resistência à penetração de íons cloreto, foi necessário realizar cortes específicos nos corpos de prova. Utilizaram-se amostras cilíndricas de 200 mm, cortadas em segmentos de 50 mm de espessura, excluindo-se as extremidades de 25 mm de cada lado, conforme prática recomendada pelo IBRACON para evitar bordas que possam comprometer a precisão dos resultados. Esse procedimento segue a norma NT Build 492 (1999), que permite a determinação do coeficiente de migração de cloretos em regime não-estacionário. A Figura 3.8 apresenta amostras unidas ao tubo PVC e a manta de borracha.



Figura 3.8: Amostras de concreto unidas ao tubo de PVC e a manta de borracha.

No ensaio utilizou-se uma solução de 10 % de NaCl (cloreto de sódio) e 0,3 N de NaOH (hidróxido de sódio). A Figura 3.9 apresenta o esquema de ensaio prescrito pela norma NT Build 492 (1999).

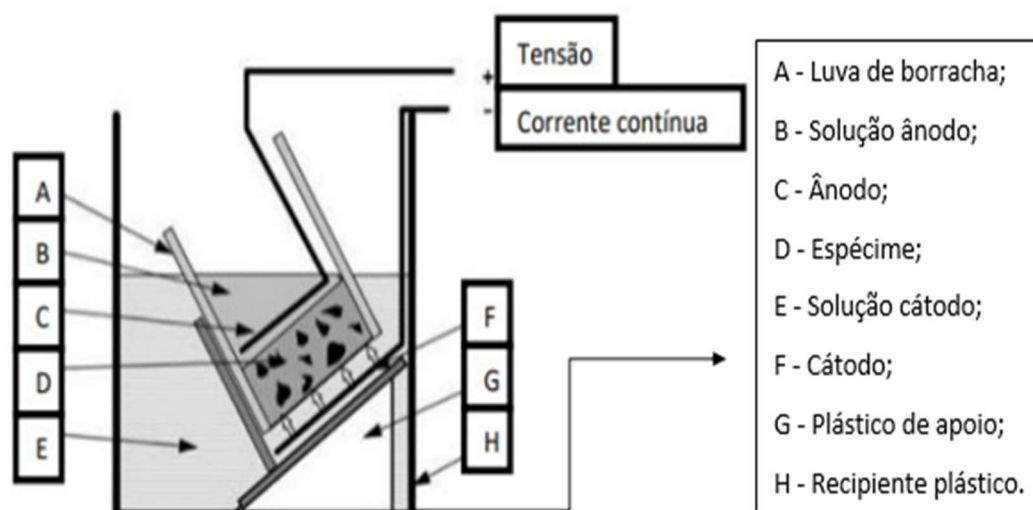


Figura 3.9: Ensaio prescrito pela norma NT Build 492 (1999).

Fonte: Adaptado de NT Build 492 (1999).

Após a montagem do aparato, foi aplicada uma tensão de 30 V, sendo o valor posteriormente ajustado conforme a corrente verificada de cada amostra. Com a tensão aplicada foram obtidas a tensão de ensaio e a duração do ensaio, conforme a Tabela 3.10.

Tabela 3.10: Duração e tensão do ensaio conforme a NT Build 492 (1999).

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

Fonte: Adaptado de NT Build 492 (1999).

Concluído o ensaio as amostras foram rompidas diametralmente e através da aspersão de nitrato de prata na concentração de 0,1 M foi determinada a profundidade da frente de penetração de cloretos no concreto. O nitrato de prata ao entrar em contato com o concreto com a presença de íons cloreto gera uma precipitação branca, decorrente da formação de cloreto de prata. A Figura 3.10 demonstra as amostras de concreto com aspersão de nitrato de prata.



Figura 3.10: Amostras de concreto com aspersão de nitrato de prata.

Conforme orientação da NT Build 492 (1999), foram realizadas sete medidas a cada 10 mm, sendo o resultado a média entre os valores. As profundidades de penetrações íons cloreto, medidas após serem submetidas à aspersão de solução indicadora de nitrato de prata, constituem um parâmetro indireto de avaliação da resistência à penetração de cloretos. Figura 3.11 apresenta a indicação da norma NT Build 492 (1999) para realizar a medição da penetração de cloretos das amostras produzidas.

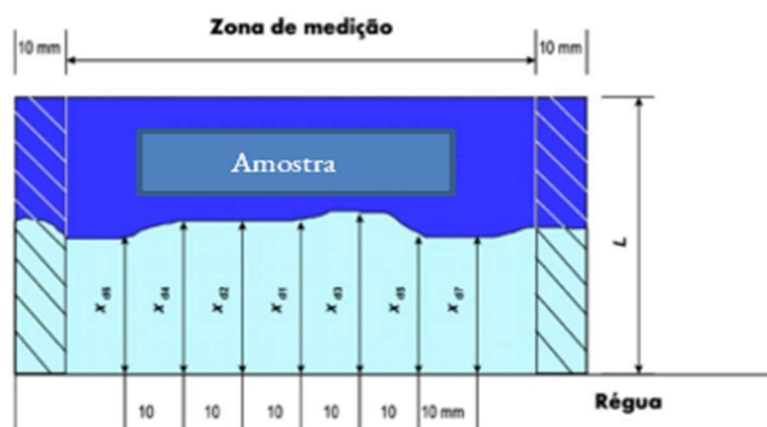


Figura 3.11: Profundidade de penetração de cloretos.

Fonte: Adaptado de NT Build 492 (1999).

Por fim, o coeficiente de migração de cloretos (D_{nssm}) foi determinado de acordo com a Equação (3.0):

$$D_{nssm} = \frac{0,0239 (273 + T)L}{(U - 2)t} (x_D - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T) L x_D}{U - 2}}) \quad (3.0)$$

Onde

- D_{nssm} = O coeficiente de migração em regime não estacionário ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$);
- T = A média entre as temperaturas iniciais e finais;
- U = O valor absoluto da tensão aplicada (V);
- L = A espessura da amostra (mm);
- T = A duração do ensaio (h);
- x_D = O valor médio da penetração de cloretos.

Conforme proposto por Nilsson *et al.* (1988) a classificação dos concretos quanto a difusividade pode ser verificada na Tabela 3.11.

Tabela 3.11: Difusividade do concreto.

D_{nssm} ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Difusividade do concreto
15	Alta
10 - 15	Moderada
5 - 10	Baixa
2,5 - 5	Muito Baixa
<2,5	Desprezível

Fonte: Nilsson *et al.*, 1988.

Velocidade de pulso ultrassônico

Para a verificação da velocidade de pulso ultrassônico dos concretos produzidos foram realizadas leituras com transdutores nas extremidades dos corpos de prova conforme orientações da NBR 8802 (2019). O ensaio foi realizado com dois corpos de prova saturados de cada traço nas idades 28, 90 e 180 dias. A velocidades de pulso ultrassônico obtida foi a média de seis leituras feitas com os transdutores em duas amostras de cada traço. A Tabela 3.12 apresenta a relação entre a velocidade de pulso e a qualidade dos concretos proposto por Neville (2012).

Tabela 3.12: Velocidade de pulso ultrassônico e qualidade dos concretos.

Velocidade de propagação da onda ultrassônica (m/s)	Qualidade do concreto
> 4500	Excelente
3500 a 4500	Bom
3000 a 3500	Regular
2000 a 3000	Ruim
<2000	Péssima

Fonte: Neville (2012).

O procedimento foi repetido para duas amostras de cada concreto à cada idade, utilizando o valor médio para análise. A Figura 3.12 apresenta o equipamento utilizado para determinar a velocidade de pulso ultrassônico dos concretos produzidos.



Figura 3.12: Aparelho utilizado no ensaio de velocidade de pulso ultrassônico.

Resistividade elétrica superficial

O método não destrutivo dos quatro elétrodos permite determinar a resistividade elétrica superficial dos concretos através da aplicação de uma corrente alternada. O ensaio de resistividade elétrica superficial foi realizado conforme AASHTO T 358-15 (2015).

Para a obtenção da resistividade elétrica superficial dos concretos produzidos foram colocados dois corpos de prova saturados de cada traço em contato com quatros eletrodos distanciados de 3,81cm. Cada amostra foi submetida a quatro leituras girando corpo de prova. A Figura 3.13 apresenta a sonda de quatro elétrodos utilizada para determinar a resistividade elétrica superficial do concreto.



A Figura 3.13: Sonda de quatro elétrodos

3.2 Análise probabilística da penetração de cloretos

A análise probabilística de penetração de cloretos nos concretos produzidos, foi realizada com base no modelo proposto por GjØrv (2015). A análise da penetração de cloretos é demonstrado na Equação (3.1).

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_c}{2 \sqrt{D(t)t}} \right) \right] \quad (3.1)$$

Onde

- $C(x, t)$ = A concentração de cloretos na profundidade x_c após um período t [% em relação a massa de cimento];
- C_s = A concentração de cloretos na superfície da estrutura [% em relação a massa de cimento];
- erf = A função de erro de Gauss;
- x_c = O cobrimento da armadura [mm] e t é a previsão de idade [anos];
- $D(t)$ = O coeficiente de difusão de cloretos no concreto Equação (3.2).

$$D(t) = \frac{D_0}{1 - \alpha} \left[\left(1 + \frac{t'}{t} \right)^{1-\alpha} - \left(\frac{t'}{t} \right)^{1-\alpha} \right] \left(\frac{t_0}{t} \right)^\alpha k_e \quad (3.2)$$

Onde

- $D(t)$ = O coeficiente de difusão de cloretos no concreto [mm^2/ano];
- D_0 = O coeficiente de difusão de referência [mm^2/ano] medido no instante t_0 [anos]. Neste trabalho adotou-se como D_0 os valores de D_{nssm} obtido experimentalmente para cada traço de concreto.
- t' = A idade do concreto quando exposto aos íons [anos];
- α = O fator de envelhecimento foi obtido para cada traço de concreto.
- k_e = O parâmetro que leva em conta o efeito da temperatura, como apresenta a Equação (3.3).

$$k_e = \exp \left[\frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + T} \right) \right] \quad (3.3)$$

Onde

- $\exp$ = A função exponencial;
- E_A = A ativação de energia para a difusão do cloreto [kcal/mol];
- R = A constante universal dos gases perfeitos;
- T = A temperatura [$^{\circ}\text{C}$].

A probabilidade de ocorrência da corrosão das armaduras, é determinada conforme a Equação (3.4).

$$P_f = P (C(x, t) \geq C_{CR}) \quad (3.4)$$

É importante destacar que este modelo matemático, embora útil, é uma simplificação que considera a penetração unidimensional de cloretos e incorpora parâmetros de entrada com certo grau de incerteza. Consequentemente, os resultados obtidos através desses cálculos podem não corresponder exatamente às condições observadas em estruturas reais expostas a ambientes com alta concentração de cloretos. Portanto, as probabilidades de corrosão derivadas desse modelo devem ser interpretadas como ponto de referência para a manutenção das estruturas ao longo da vida útil.

3.2.1 Probabilidade de corrosão

A análise probabilística utilizada para verificar a probabilidade de corrosão dos concretos produzidos foi o método de Monte Carlo. Esse método possibilita a análise simultânea de diferentes

parâmetros para a modelagem e estimativa da vida útil de estruturas de concreto. No ensaio foram gerados 10^7 valores para cada variável aleatória.

Para avaliar a vida útil dos concretos C0, C5, C10, C15, C20, C30, CMK0, CMK5 e CMK10, CMK15, CMK20 e CMK30 produzidos neste trabalho, foram utilizados os coeficientes de migração de cloretos como principal parâmetro de análise. O fator de envelhecimento (α) foi obtido experimentalmente para cada traço de concreto. A avaliação foi realizada considerando um cobrimento nominal de 50 mm, em conformidade com as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2023) para a classe de agressividade ambiental (CAA) IV. A Tabela 3.13 apresenta os parâmetros estatísticos das variáveis adotadas na análise probabilística dos concretos produzidos.

Tabela 3.13: Distribuição de probabilidade das variáveis adotadas na análise probabilística

Parâmetros	Unidade	Distribuição	Referência	Média	COV
Coeficiente de difusão (D_0)	m ² /s	Normal	Autor	D_{nssm}	0,1
Cobrimento nominal (x_c)	mm	Normal	NBR 6118 (2023)	50	0,1
Temperatura (T)	°C	Determinístico	INMET (2019)	18	-
Concentração Superficial de cloretos (C_s)	% ¹	Lognormal	<i>fib</i> Bulletin 76 (2015)	3,00	0,45
Fator de envelhecimento (α)	-	Normal	Autor	α	0,20
Concentração crítica (C_{cr})	% ¹	Normal	Angst <i>et al.</i> (2009)	0,4	0,15

Fonte: Autora.

¹Em relação à massa de cimento.

A concentração superficial de cloretos adotada na análise foi obtida a partir das recomendações do *fib* Bulletin 76 (2015), correspondente à classe de agressividade XS3, considerada equivalente à CAA IV, conforme a NBR 6118. A temperatura ambiental utilizada na avaliação probabilística foi baseada na média anual da cidade de Rio Grande - RS, fornecida pelo Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (INMET).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Resistência à compressão

A influência do teor de substituição de agregado miúdo por cinza de fundo no comportamento mecânico dos concretos produzidos, foi verificada através do ensaio de resistência à compressão axial, conforme prescrito pela NBR 5739 (ABNT, 2018). A Tabela 4.1 apresenta os resultados da resistência à compressão axial aos 7, 28, 90 e 180 dias. A Figura 4.1 apresenta os valores da resistência à compressão do concreto C0 (sem adição) e dos concretos com cinza de fundo para as idades de 7, 28, 90 e 180 dias. A Figura 4.2 apresenta a resistência à compressão do concreto CMK0 com adição de metacaulim e dos concretos com a combinação de cinza de fundo e metacaulim aos de 7, 28, 90 e 180 dias.

Tabela 4.1: Resultados da Resistência à Compressão (MPa).

Traços	7 dias	28 dias	90 dias	180 dias
C0	35,1	47,7	52,09	54,1
C5	33,5	47,9	53,7	54,8
C10	36,2	50,3	55,4	56,3
C15	41,6	50,7	58,72	63,81
C20	38,2	47,3	60,52	61,56
C30	37,57	48,10	52,6	57,71
CMK0	37,1	48,8	54,07	56,79
CMK5	35,9	47,6	55,98	61,23
CMK10	38	53,9	62,85	64,35
CMK15	36,9	46,75	57,37	58,97
CMK20	49,33	59,64	60,63	61,79
CMK30	41,47	52,00	61,23	62,72

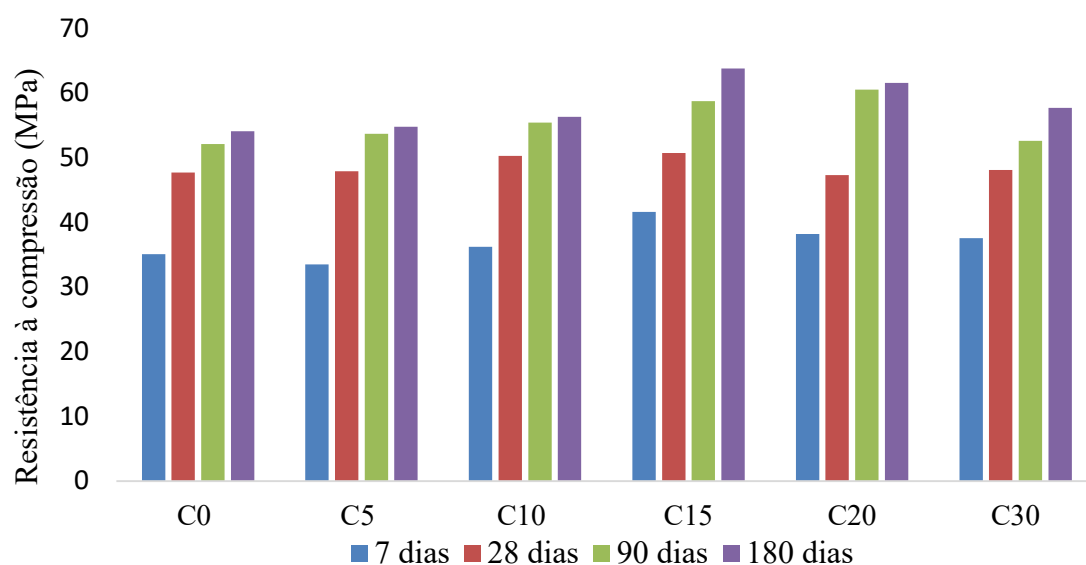


Figura 4.1: Resistência à compressão do concreto C0 (sem adição) e dos concretos com cinza de fundo.

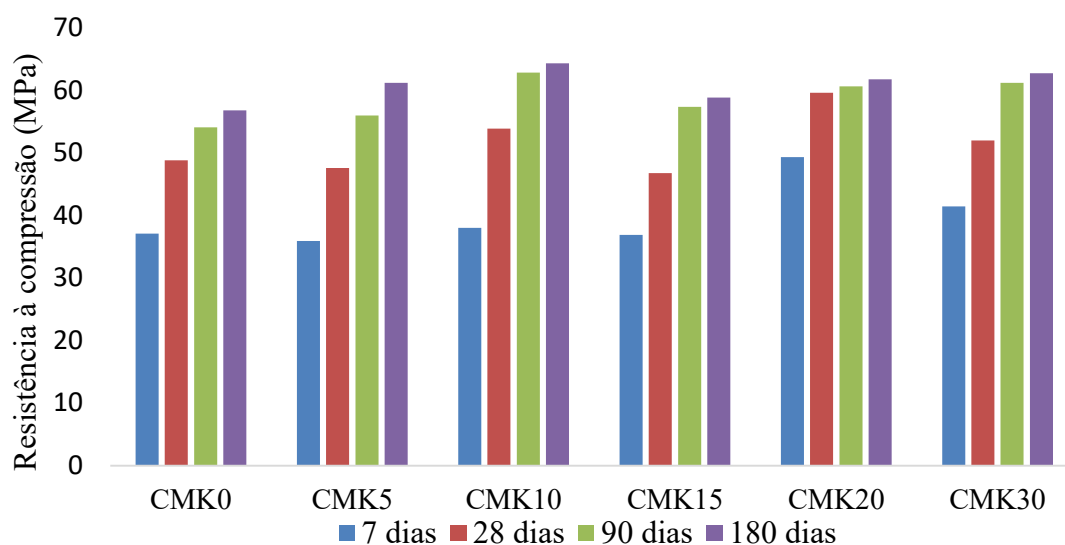


Figura 4.2: Resistência à compressão do concreto CMK0 com adição de metacaulim e dos concretos com a combinação de cinza de fundo e metacaulim.

Diante dos resultados apresentados, percebe-se que os concretos apresentaram patamares similares de resistência aos 7 e 28 dias. Essa pequena variação em termos de resistência mecânica era esperada devido à adoção de percentuais pequenos de substituições. Embora a diferença seja pequena, percebe-se que a dosagem CMK10, com adição de metacaulim, apresentou a maior resistência aos 90 e 180 dias. O comportamento apresentado por este concreto pode ser justificado pelo refinamento dos poros e densificação da matriz cimentícia ocasionada pela presença de adição pozolânica (MEHTA e MONTEIRO, 2014). A reação pozolânica é eficiente no preenchimento de vazios capilares, aumentando a resistência mecânica e a impermeabilidade da pasta endurecida (HOPPE FILHO *et al.*, 2017).

A adição de 5 % de cinza de fundo no concreto acarretou resistência à compressão muito próxima do concreto sem adição aos 28 e 90 e 180 dias. Desta forma, acredita-se que uma menor adição de cinza de fundo não tenha sido suficiente para alterar a estrutura do concreto e melhorar significativamente a sua resistência mecânica. Os concretos com menores níveis de substituição de cinza de fundo, tendem a apresentar resultados de resistência à compressão similares aos concretos produzidos sem adições, principalmente, em idades de cura menores, como também observado por (WONGKEO *et al.*, 2012).

Os concretos CMK10 e CMK20, mostraram aumentos na resistência à compressão em todas as idades avaliadas 7, 28, 90 e 180 dias. O concreto CMK10 apresentou resistência de 64,35 MPa aos 180 dias, um valor superior ao concreto com cinza de fundo C20, que atingiu 61,56 MPa no mesmo período. Esses resultados indicam que a combinação de metacaulim e cinza de fundo promove uma

maior densidade e coesão na matriz cimentícia, resultando em maior capacidade de resistir a esforços mecânicos.

Cabe destacar que os maiores valores de resistência à compressão foram observados nos concretos produzidos com adições. Tais resultados encontram-se de acordo com o esperado, pois, conforme alguns autores a incorporação de adições minerais alteram a microestrutura do concreto, melhorando assim a resistência mecânica (SINGH e SIDDIQUE, 2015).

4.2. Absorção de água por capilaridade

Os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade realizados aos 28, 90 e 180 dias podem ser verificado na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Resultados de absorção de água por capilaridade (g/cm²)

Traços	28 dias	90 dias	180 dias
C0	0,69	0,44	0,37
C5	0,37	0,32	0,26
C10	0,33	0,24	0,19
C15	0,23	0,20	0,17
C20	0,20	0,19	0,16
C30	0,18	0,16	0,14
CMK0	0,32	0,18	0,16
CMK5	0,31	0,27	0,21
CMK10	0,22	0,21	0,14
CMK15	0,12	0,11	0,10
CMK20	0,14	0,12	0,11
CMK30	0,24	0,20	0,18

Figura 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 representam uma medição direta da quantidade de massa de água absorvida por unidade de área durante um determinado período tempo para os concretos produzidos.

Os concretos que utilizam cinza de fundo, como C5, C10, C15, C20 e C30, evidenciam uma tendência de redução da absorção capilar com o passar do tempo, refletindo uma melhora na durabilidade e impermeabilidade do concreto. O concreto C5 apresenta uma queda consistente na absorção ao longo dos dias, indicando uma microestrutura mais densa e menos permeável. Essa tendência é ainda mais acentuada no concreto C10, que demonstra uma redução mais expressiva. Conforme o teor de cinza de fundo aumenta, os concretos subsequentes, como C15, C20 e C30, seguem essa

mesma melhoria, com absorções capilares ainda menores, consolidando a eficácia da adição de cinza de fundo na melhoria das propriedades de durabilidade do concreto.

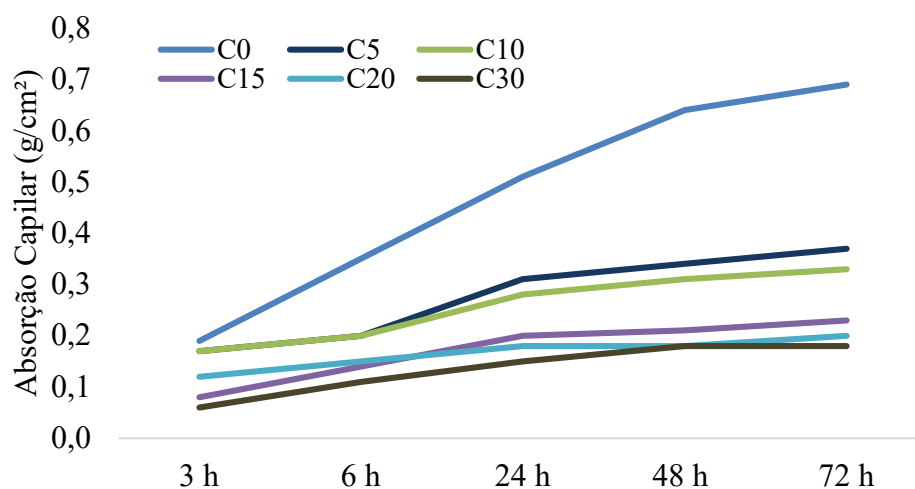


Figura 4.3: Absorção de água por capilaridade do concreto C0 (sem adição) e dos concretos com adição de cinza de fundo aos 28 dias.

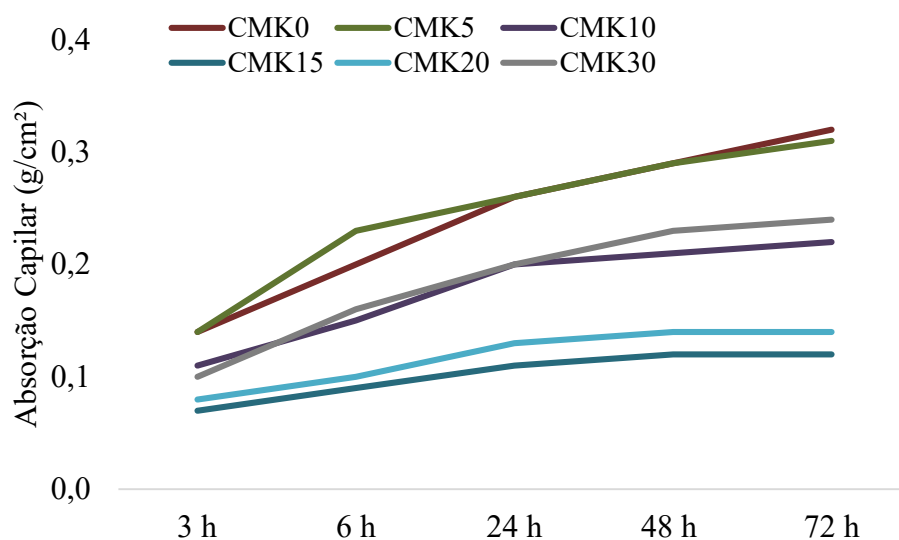


Figura 4.4: Absorção de água por capilaridade do concreto CMK0 com adição de metacaulim e dos concretos com a combinação de cinza de fundo e metacaulim aos 28 dias.

O concreto C0, que não contém adições minerais, apresenta valores de absorção capilar mais elevados que os outros concretos. Aos 28 dias, a absorção é de 0,69 g/cm², reduzindo para 0,44 g/cm² aos 90 dias e chegando a 0,37 g/cm² aos 180 dias. Embora haja uma diminuição progressiva com o passar do tempo, os valores continuam altos, indicando uma porosidade relativamente elevada.

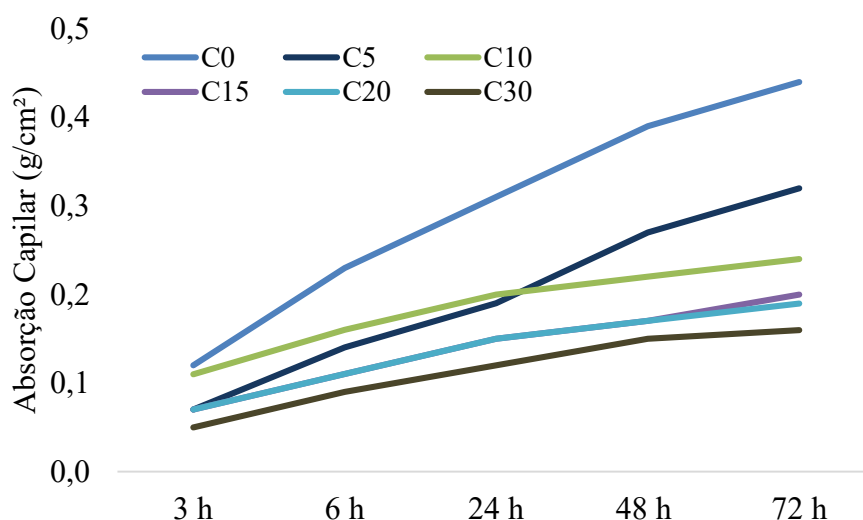


Figura 4.5: Absorção de água por capilaridade do concreto C0 (sem adição) e dos concretos com adição de cinza de fundo aos 90 dias.

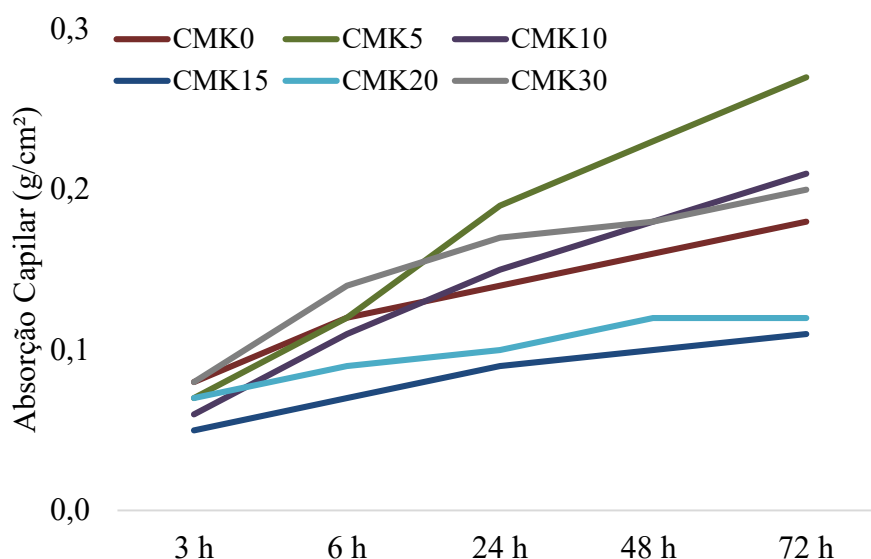


Figura 4.6: Absorção de água por capilaridade do concreto CMK0 com adição de metacaulim e dos concretos com a combinação das adições de cinza de fundo e metacaulim aos 90 dias.

A comparação entre C10 (0,19 g/cm² aos 180 dias) e CMK10 (0,14 g/cm² aos 180 dias) demonstra que a combinação de metacaulim e cinza de fundo tem um efeito sinérgico na redução da absorção capilar. O traço CMK15, com 5% de metacaulim e 15% de cinza de fundo, destaca-se como o concreto de menor absorção capilar entre todas as misturas, com valores de 0,10 g/cm² aos 180 dias. Isso pode ser atribuído tanto à alta reatividade do metacaulim, que promove uma matriz cimentícia mais densa e menos permeável como as propriedades física da cinza de fundo.

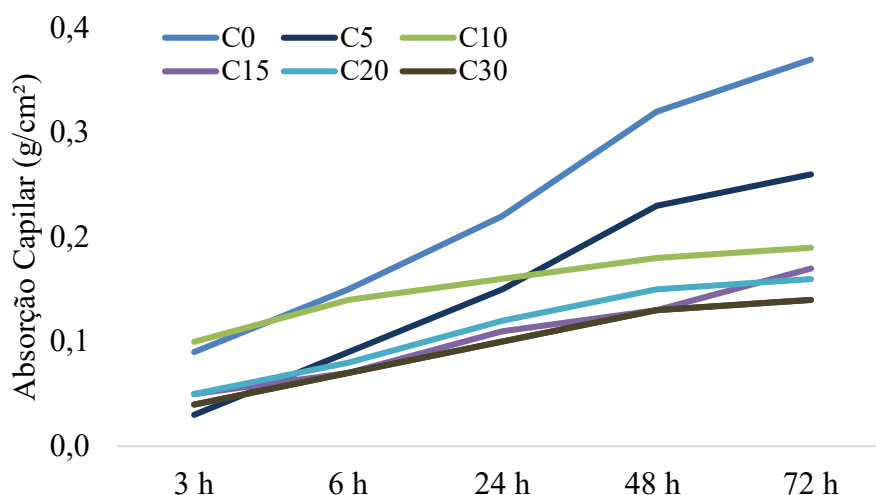


Figura 4.7: Absorção de água por capilaridade do concreto C0 (sem adição) e dos concretos com adição de cinza de fundo aos 180 dias.

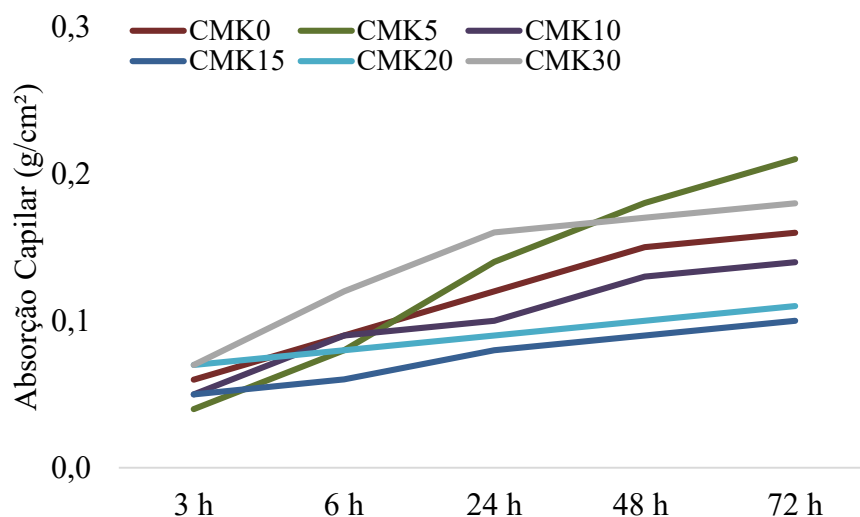


Figura 4.8: Absorção de água por capilaridade do concreto CMK0 com adição de metacaulim e dos concretos com a combinação das adições de cinza de fundo e metacaulim aos 180 dias

De forma geral, os traços que combinam cinza de fundo e metacaulim apresentam os melhores desempenhos, especialmente os traços CMK15 e CMK20, que possuem as menores absorções capilares entre todos os concretos analisados. Isso indica que os concretos com adição de cinza de fundo e metacaulim têm desempenho superior em termos de absorção capilar em comparação com os concretos apenas com a adição de cinza de fundo, confirmando que a combinação desses materiais resulta em uma maior durabilidade e menor permeabilidade do concreto. Khodabakhshian *et al.* (2020) sugerem que essa redução na absorção se deve ao refinamento da matriz porosa proporcionado por essas adições.

4.3. Coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário

As resistências à penetração de íons cloreto dos concretos produzidos foram avaliadas, nas idades de 28, 90 e 180 dias, através da realização de ensaios acelerados de migração de cloretos, em estado não estacionário, em conformidade com a norma NT Build 492 (1999). A Tabela 4.3 apresenta os resultados de migração de cloretos. A Figura 4.9 apresenta os valores dos coeficientes de migração do concreto C0 (sem adição) e dos concretos com adição de cinza de fundo aos 28, 90 e 180 dias. A Figura 4.10 demonstra o concreto CMK0 com adição de metacaulim e dos concretos com a combinação de cinza de fundo e metacaulim. aos 28, 90 e 180 dias.

Tabela 4.3: Resultados de migração de cloretos D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m²/s).

Traços	28 dias	90 dias	180 dias
C0	7,47	3,60	2,90
C5	7,91	3,14	2,68
C10	7,54	2,65	2,50
C15	7,02	2,43	1,69
C20	6,16	1,97	1,12
C30	4,83	1,47	0,87
CMK0	4,35	2,97	1,30
CMK5	3,85	2,21	0,88
CMK10	3,29	1,66	0,47
CMK15	3,87	1,38	0,75
CMK20	2,71	0,96	0,54
CMK30	2,52	1,35	0,46

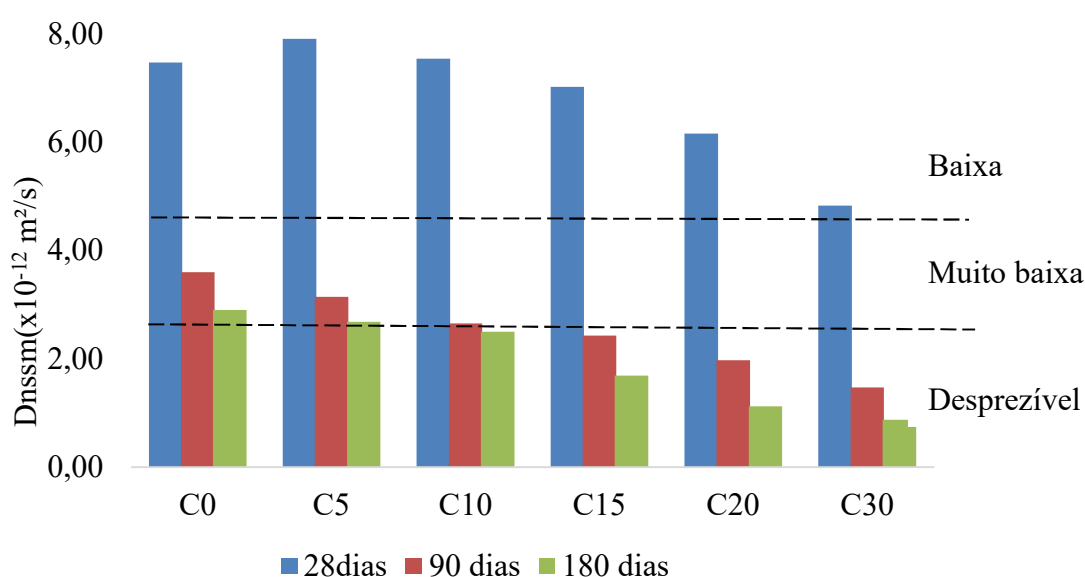


Figura 4.9: Coeficiente de migração de cloretos do concreto C0 (sem adição) e dos concretos com adição de cinza de fundo.

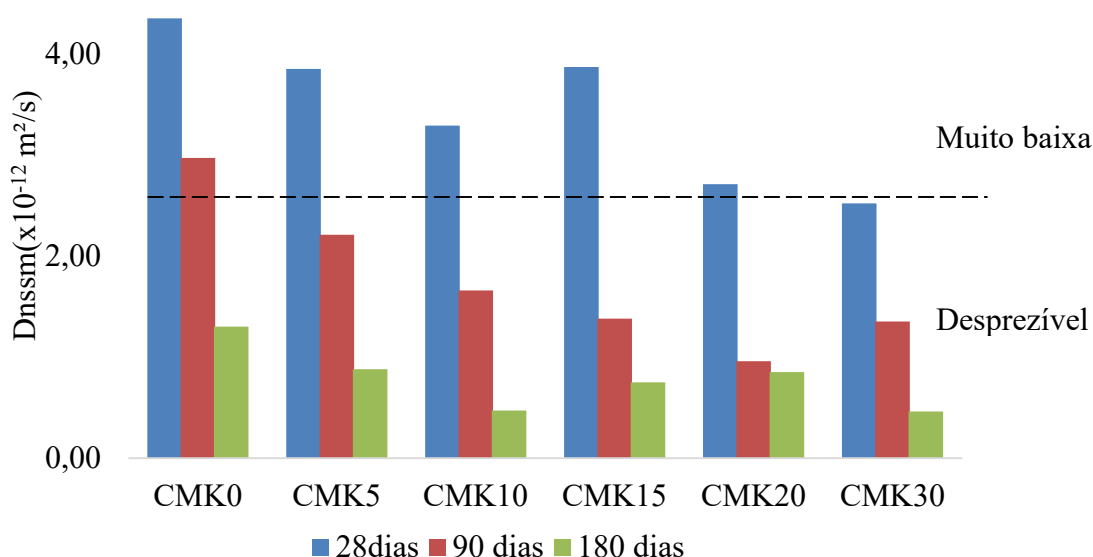


Figura 4.10: Coeficiente de migração do concreto CMK0 com adição de metacaulim e dos concretos com a combinação das adições de cinza de fundo e metacaulim.

A análise dos concretos C0 a C30, que utilizam cinza de fundo como adição mineral em teores crescentes de 5% a 30%, revela uma redução na migração de cloretos à medida que o teor de cinza de fundo aumenta. Essa redução demonstra a eficácia da cinza de fundo em melhorar a durabilidade do concreto, diminuindo sua permeabilidade. O concreto C30 apresenta uma migração de cloretos de $0,87 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ aos 180 dias, uma redução considerável em comparação com o traço C0, que atinge $2,90 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ no mesmo período, representando uma redução de aproximadamente 70%. Esse comportamento está de acordo com os estudos de Mangi *et al.* (2019), que destacam que a cinza de fundo atua como um refinador de poros, promovendo uma microestrutura mais densa.

Por outro lado, os concretos que combinam metacaulim e cinza de fundo mostram uma melhora ainda mais expressiva em termos de resistência à penetração de cloretos, especialmente nas idades mais avançadas. O concreto CMK30, que contém 5% de metacaulim e 30% de cinza de fundo, apresenta o melhor desempenho entre todos os traços analisados, com uma migração de cloretos de apenas $0,46 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ aos 180 dias.

Constatou-se também que a evolução da idade dos concretos implicou na redução dos coeficientes de migração de íons cloreto em todos os concretos, demonstrando um incremento na resistência do concreto à penetração de íons cloreto ao longo do tempo. Nos traços que incorporam adições de metacaulim e cinza de fundo, essa tendência é ainda mais pronunciada.

Em resumo, a cinza de fundo reduz a penetrabilidade de cloretos em todos os traços analisados, sendo os concretos com maiores teores de cinza de fundo, como o C30, os que apresentam melhores desempenhos. No entanto, os concretos produzidos com metacaulim e cinza de fundo, principalmente o traço CMK30, que combinam os benefícios da cinza de fundo com as propriedades reativas do metacaulim, resultando em um concreto ainda mais resistente à penetração de cloretos.

Na Tabela 4.4, são apresentados os fatores de envelhecimento obtidos experimentalmente para diferentes traços de concreto, assim como os coeficientes de difusão de cloretos medidos aos 28, 90 e 180 dias. Observa-se que, à medida que os traços incorporam maiores teores de adições minerais de cinza de fundo, há uma redução no coeficiente de difusão e um aumento no fator de envelhecimento. A figura 4.11 apresenta o fator de envelhecimento dos concretos.

Tabela 4.4: Fator de envelhecimento (α) e os coeficientes de migração de cloretos.

Traço	Coef. Difusão (28 dias)	Coef. Difusão (90 dias)	Coef. Difusão (180 dias)	Fator de Envelhecimento (α)	R ²
C0	7,47	3,6	2,9	0,521	0,9774
C5	7,91	3,14	2,68	0,604	0,9459
C10	7,54	2,65	2,5	0,626	0,8988
C15	7,02	2,43	1,69	0,750	0,985
C20	6,16	1,97	1,12	0,922	0,9984
C30	4,83	1,47	0,87	0,931	0,9945
CMK0	4,35	2,97	1,3	0,613	0,8477
CMK5	3,85	2,21	0,88	0,758	0,9155
CMK10	3,29	1,66	0,47	0,995	0,8995
CMK15	3,87	1,38	0,75	0,882	1
CMK20	2,71	0,96	0,54	0,869	0,9997
CMK30	2,52	1,35	0,46	0,874	0,9135

O concreto de referência (C0), sem adições minerais, apresentou o menor fator de envelhecimento ($\alpha = 0,521$), indicando uma menor capacidade de redução da difusão de cloretos ao longo do tempo. Conforme as adições de cinza de fundo foram introduzidas nas misturas, esse fator aumentou de forma significativa. O traço C5, com 5% de cinza de fundo, teve um fator de envelhecimento de 0,604, enquanto o traço C30, com 30% de cinza de fundo, apresentou um valor de 0,931, refletindo uma maior eficiência na melhoria das propriedades duráveis do concreto com o aumento dessa adição.

Comparando os traços que utilizam exclusivamente cinza de fundo (C0 a C30) com aqueles que combinam metacaulim e cinza de fundo (CMK0 a CMK30), observa-se que as misturas que

combinam cinza e fundo e metacaulim apresentaram, em geral, fatores de envelhecimento mais elevados. O traço CMK10 com 5% de metacaulim e 10% de cinza de fundo, obteve um α de 0,995, superior ao traço C30, que obteve 0,931. Isso sugere que a combinação de metacaulim e cinza de fundo é particularmente eficaz na evolução das propriedades do concreto.

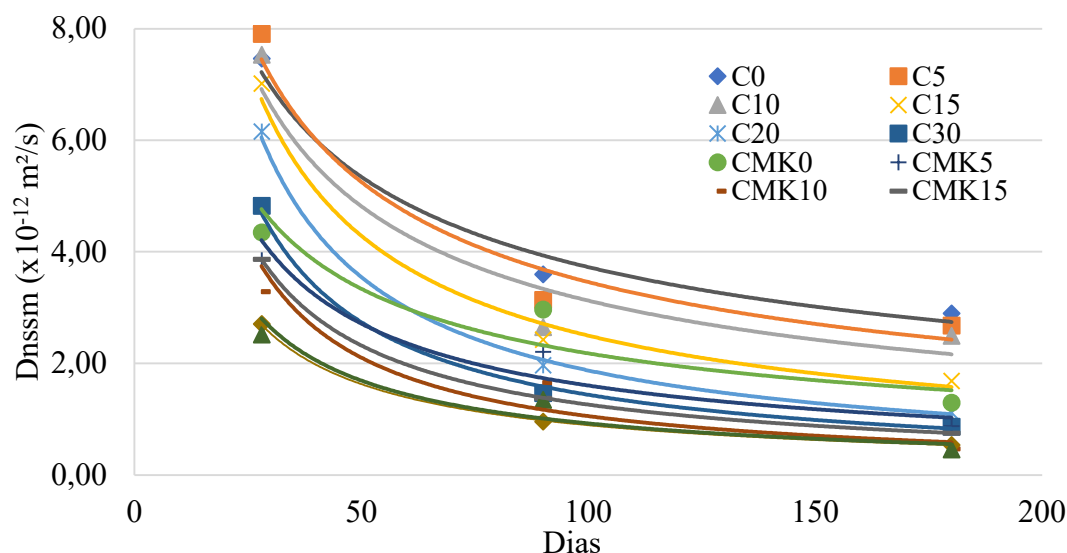


Figura 4.11: Fator de envelhecimento dos concretos.

Em resumo, o fator de envelhecimento apresentado na figura 4.11 demonstra aumenta com o teor de adições minerais, sendo mais acentuado nas misturas que incluem metacaulim. Esses resultados indicam que a incorporação dessas adições promove uma significativa melhoria na durabilidade do concreto ao longo do tempo, tornando-o mais resistente à penetração de cloretos.

4.4. Velocidade de pulso ultrassônico

As velocidades do pulso ultrassônico VPU foram avaliadas nas idades de 28, 90 e 180 dias por meio de ensaio não destrutivo de ultrassom que permite a passagem de uma onda acústica através de um corpo de prova de concreto, possibilitando a avaliação de forma indireta de propriedades do concreto NBR 8802 (ABNT, 2019). A Tabela 4.5 apresenta os valores médios das 3 medições realizadas em cada corpo de prova.

Tabela 4.5: Velocidade de pulso ultrassônico (m/s).

Traços	28 dias	90 dias	180 dias
C0	5204	5207	4937
C5	4811	4791	4857
C10	4952	4979	4916
C15	4990	5012	4995
C20	5072	5106	5016
C30	5124	5107	5130
CMK0	5263	5297	5008
CMK5	5091	5169	5085
CMK10	5048	5186	5031
CMK15	5047	5051	5060
CMK20	5070	5071	5084
CMK30	5198	5056	5092

A Figura 4.12 apresenta a velocidade de pulso ultrassônico dos concretos produzidos para as idades de 28, 90 e 180 dias.

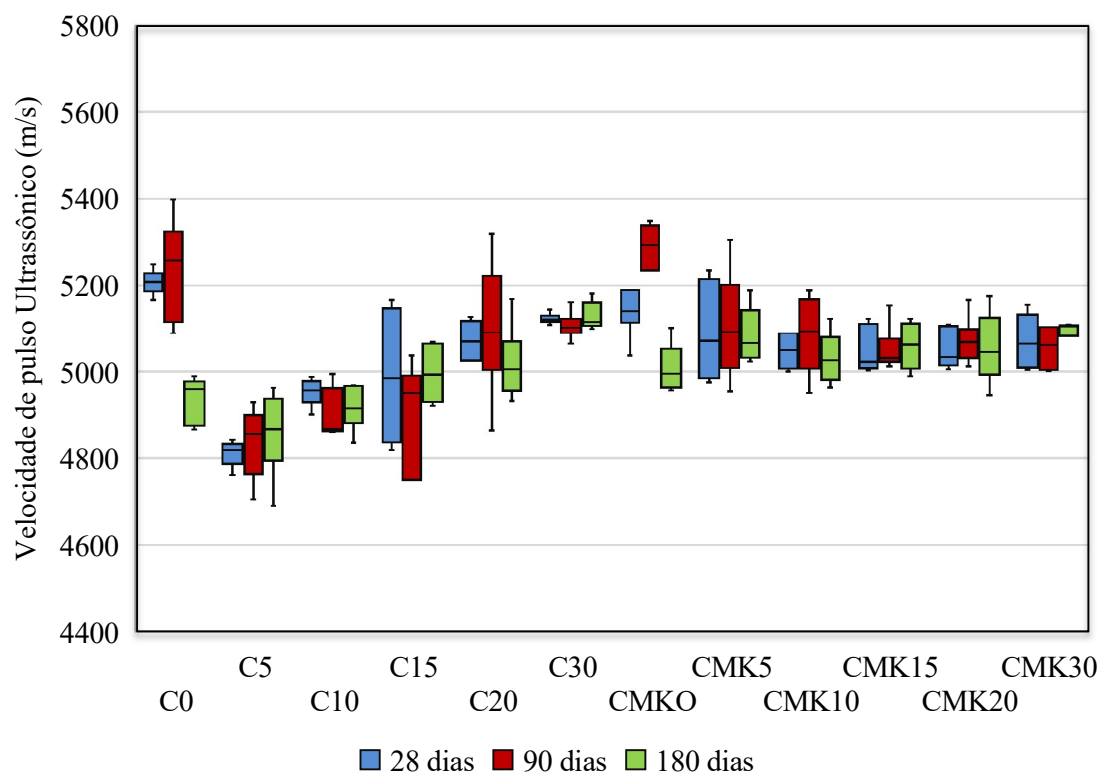


Figura 4.12: Velocidade de pulso ultrassônico dos concretos produzidos.

Ao comparar as misturas C15, C20 e C30, nota-se um aumento gradual na velocidade de pulso ultrassônico VPU com o teor de cinza de fundo. A mistura C20 apresentou uma VPU de 5072 m/s aos

28 dias e aumentou para 5106 m/s aos 90 dias, permanecendo em 5016 m/s aos 180 dias. A mistura C30, que contém o maior teor de cinza de fundo, demonstrou uma VPU de 5124 m/s aos 28 dias, 5107 m/s aos 90 dias, e manteve-se em 5130 m/s aos 180 dias.

Os concretos contendo metacaulim e cinza de fundo (CMK5, CMK10, CMK15, CMK20 e CMK30) apresentam resultados de VPU que se destacam pela maior estabilidade e consistência ao longo do tempo. O concreto CMK10, com 5% de metacaulim e 10% de cinza de fundo, demonstra valores de VPU que se mantêm estáveis em torno de 5000 m/s nas idades de 28, 90 e 180 dias. A estabilidade dos valores de VPU pode ser atribuída à alta reatividade do metacaulim, conforme apontado por (KHODABAKHSHIAN *et al.*, 2020).

Um aspecto importante a ser observado no gráfico é a variação dos valores VPU ao longo do tempo. Para a maioria das misturas analisadas, há um aumento nos valores de VPU entre 28 e 90 dias, o que reflete a progressão do processo de hidratação e a densificação da matriz cimentícia. No entanto, entre 90 e 180 dias, alguns concretos mostram uma leve queda nos valores, podendo ser explicado pela formação de microfissuras internas devido a retrações térmicas ou à variação de umidade, como sugerido por como sugerido por (LI *et al.*, 2020).

Comparando os valores de velocidade de pulso ultrassônico dos concretos com substituição parcial de cinza de fundo, metacaulim e sem adições com os valores de velocidade de pulso ultrassônico dados conforme Neville (2016), nota-se que a qualidade do concreto pode ser considerada excelente até mesmo entre os menores valores obtidos. A classificação dos concretos indica que a qualidade dos traços analisados com cinza de fundo, metacaulim e sem adições foi excelente em relação à homogeneidade, uniformidade e outras características do concreto que afetam diretamente a durabilidade e a vida útil.

4.5. Resistividade elétrica superficial

Os valores de resistividade elétrica foram obtidos através da média de 4 medições realizadas em corpo de prova. A Figura 4.13 apresenta os resultados de resistividade elétrica em função dos tipos de concretos produzidos na idade de 180 dias.

Ao analisar o comportamento dos concretos nota-se que a resistividade do traço C0 (sem adição) é menor em comparação com os traços que possuem adições, indicando uma maior propensão à corrosão. Este valor está abaixo do limite crítico de 20 k Ω .cm, implicando em um maior risco de falha por penetração de cloretos Shi *et al.* (2021). Nos concretos C 5, C 10, C 15, C 20 e C30 com incorporação de cinza de fundo nos teores de 5 %, 10 %, 15 %, 20 % e 30% respectivamente verifica-

se uma elevação na resistividade elétrica conforme aumentou-se o teor de cinza de fundo demonstrando a influência dessa adição na redução dos poros da matriz do concreto.

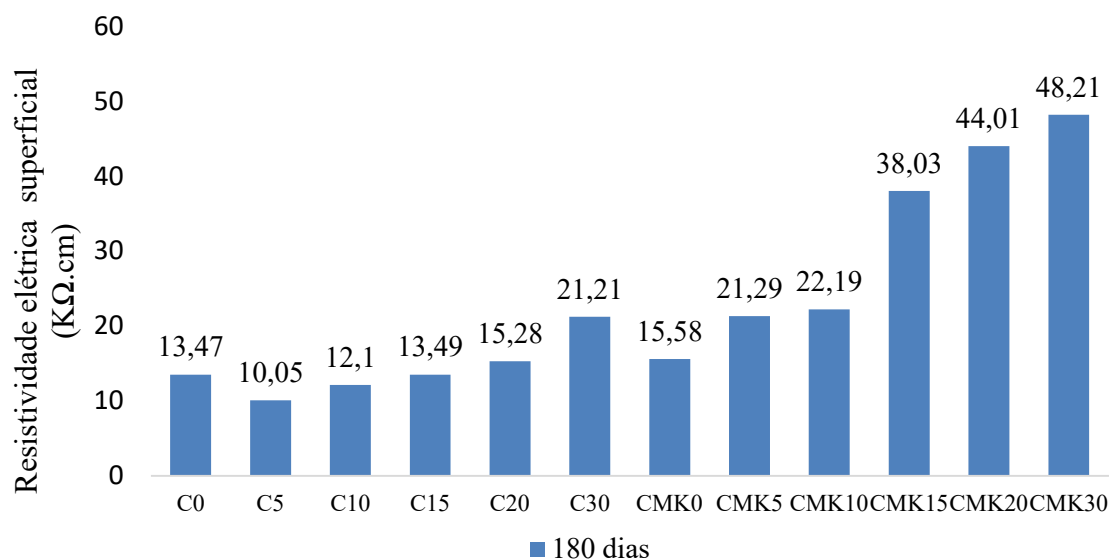


Figura 4.13: Resistividade elétrica superficial dos concretos produzidos.

O traço C5, com 10,05 kΩ.cm, tem uma resistividade ligeiramente menor que o concreto C0, podendo ser atribuído ao baixo percentual de adição de cinza de fundo, resultando em menor impacto na matriz do concreto. No entanto, a partir do traço C10 (12,1 kΩ.cm) até o C30 (21,21 kΩ.cm), ocorre um aumento gradual na resistividade, sugerindo que maiores teores de cinza de fundo proporcionam uma matriz mais densa e menos permeável, melhorando a resistência à penetração de íons cloreto. O concreto C30 destaca-se por exibir a maior resistividade entre os traços com cinza de fundo, sendo mais de 50% superior à resistividade do C0, evidenciando a influência da cinza de fundo em melhorar a durabilidade do concreto.

Nota-se, que os concretos CMK15, CMK20 e CMK30 com adições de metacaulim e cinza de fundo demonstram resistividades superiores em comparação aos outros traços. O concreto CMK30 apresentou o maior desempenho com resistividade elétrica superficial de 48,21 kΩ.cm, enquanto o concreto com maior resistividade elétrica C 30 com adição de cinza de fundo obteve 21,21 kΩ.cm. A presença de metacaulim, em conjunto com a cinza de fundo, é a principal responsável pela elevação na resistividade conforme aponta os estudos que associam maiores resistividades com menor probabilidade de corrosão (KHEDR e ABOU-ZEID, 2020).

Os resultados de resistividade elétrica superficial dos concretos demonstram que a combinação de metacaulim e cinza de fundo, aumenta a resistividade elétrica do concreto, melhorando sua

durabilidade e reduzindo o risco de corrosão em ambientes agressivos. Essa análise confirma a importância das adições minerais para a longevidade das estruturas de concreto, principalmente em condições ambientais agressivas.

4.6. Correlação entre resistividade elétrica e o coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário.

Na figura 4.14 é possível verificar através dos resultados correlacionados de resistividade elétrica superficial e de coeficiente de migração de cloretos dos concretos produzidos que a resistividade dos traços seguiu uma tendência inversa à dos coeficientes de migração de cloretos. O coeficiente de determinação $R^2 = 0,5111$ indica que existe uma correlação moderada entre as duas variáveis analisadas. Isso sugere que outros fatores além da resistividade elétrica também podem influenciar a taxa de difusão, mas ainda assim a resistividade desempenha um papel importante na explicação dessa variabilidade.

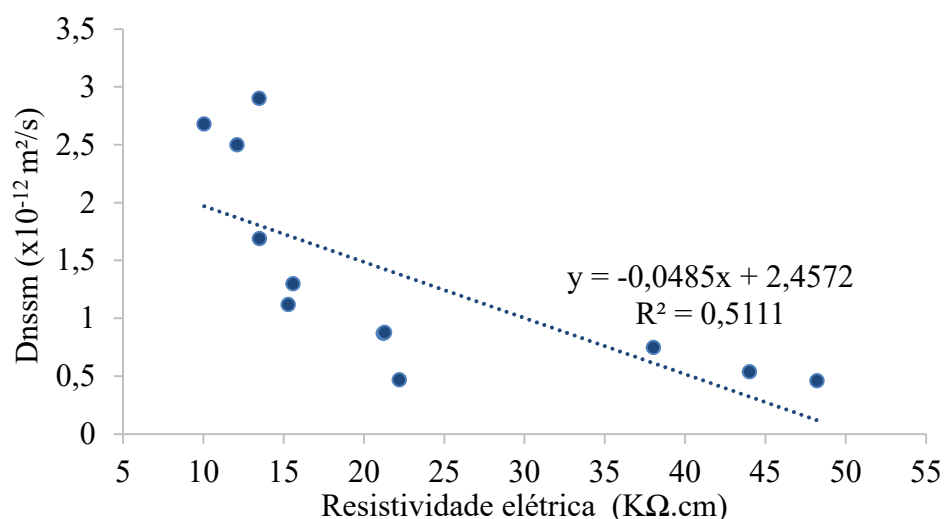


Figura 4.14: Correlação entre os resultados de resistividade elétrica superficial e coeficiente de migração de cloretos.

Os traços com cinza de fundo (C5, C10, C15, C20, C30) mostram uma melhoria tanto na resistividade elétrica quanto na difusividade de cloretos, conforme o teor de adição de cinza de fundo aumenta, chegando a 21,21 kΩ.cm no C30. Ao observar o comportamento dos concretos com a combinação de cinza de fundo e metacaulim, nota-se uma melhoria ainda mais pronunciada nas propriedades de durabilidade do concreto em comparação ao concreto de referência C0.

A presença do metacaulim, além da cinza de fundo, tem um efeito sinérgico na redução da porosidade e na formação de uma matriz cimentícia mais densa. Isso se reflete nos elevados valores de resistividade elétrica superficial observados nessas misturas. A resistividade elétrica superficial

do CMK10 (5% de metacaulim e 10% de cinza de fundo) é de 22,19 k Ω .cm, superando o valor do traço C30 (apenas com cinza de fundo), que apresenta resistividade elétrica superficial de 21,21 k Ω .cm. Esse comportamento se intensifica à medida que aumenta o teor de cinza de fundo nas misturas, como verificado no concreto CMK30, que atinge uma resistividade elétrica superficial de 48,21 k Ω .cm, quase quatro vezes maior que o valor do concreto de referência C0.

Além disso, a difusividade de cloretos também é menor nas misturas com metacaulim e cinza de fundo. A correlação inversa entre resistividade elétrica superficial e coeficiente de difusão, como mostrado no gráfico anterior, é reforçada com a introdução do metacaulim. Os concretos com cinza de fundo e metacaulim apresentam coeficientes de difusão menores, indicando que a adição combinada desses dois materiais reduz a permeabilidade do concreto a níveis mínimos, retardando a penetração de íons cloreto e diminuindo o risco de corrosão.

4.7. Resultados das simulações.

Os resultados apresentados na Figura 4.15 e 4.16, obtidos através do modelo probabilístico, mostram a evolução da probabilidade de falha ao longo do tempo de despassivação para diferentes traços de concreto. A curva correspondente ao concreto de referência C0 (sem adição) revelou a maior probabilidade de falha, atingindo cerca de 50% aos 50 anos. Esses dados indicam que o concreto C0 possui uma durabilidade reduzida e uma maior suscetibilidade à corrosão, destacando sua vulnerabilidade em comparação com os demais traços analisados.

Os concretos com adição de cinza de fundo (C5, C10, C15, C20 e C30) apresentaram redução na probabilidade de falha ao longo do tempo. Em particular, o concreto C30, que contém 30% de cinza de fundo, apresentou a menor probabilidade de falha entre todos os traços com cinza de fundo, mostrando uma probabilidade quase nula até cerca de 40 anos e menos de 5% aos 50 anos. Esses resultados evidenciam que a adição de cinza de fundo ao concreto resulta em uma matriz mais densa, reduzindo a permeabilidade.

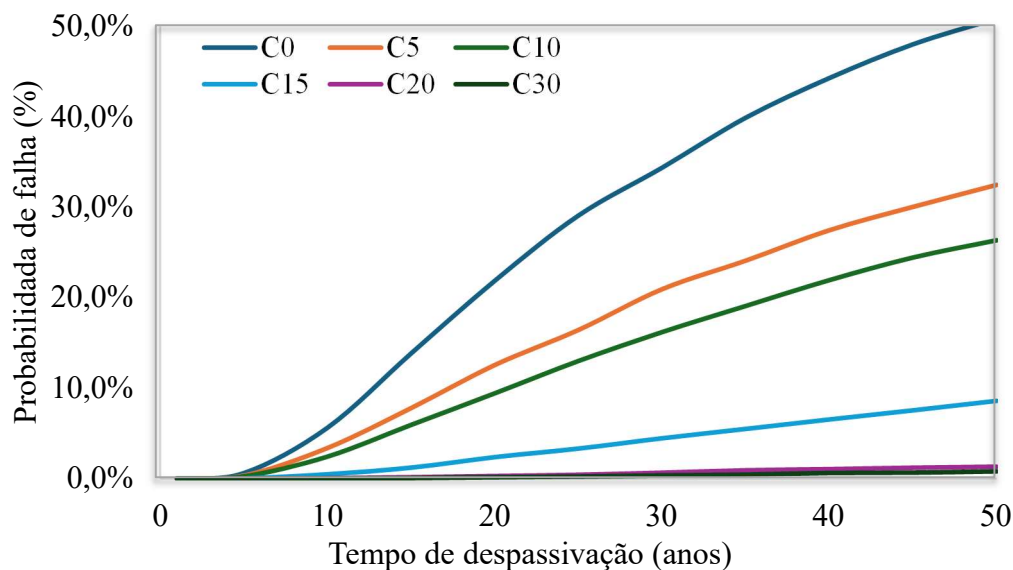


Figura 4.15: Probabilidade de falha do concreto C0 (sem adição) e dos concretos com adição de cinza de fundo.

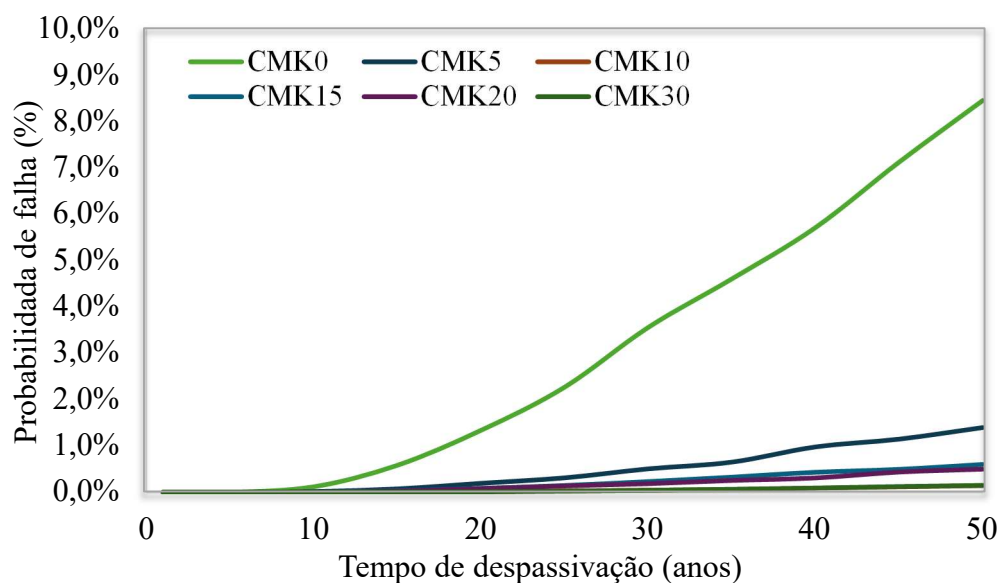


Figura 4.16: Probabilidade de falha do concreto (CMK0) com adição de metacaulim e dos concretos com adição de cinza de fundo e metacaulim.

Nota-se que as dosagens com metacaulim e cinza de fundo (CMK5, CMK10, CMK15, CMK20, CMK30) apresentam desempenhos superiores em relação à durabilidade e resistência à penetração de cloretos. Entre essas misturas, o CMK30 se destaca, com a menor probabilidade de falha ao longo do tempo, praticamente constante e próxima de 0% durante todo o período de 50 anos, evidenciando que a combinação de metacaulim e cinza de fundo, em teores equilibrados, proporciona

excelente proteção contra a despassivação das armaduras. Isso sugere que o aumento no teor de metacaulim e cinza de fundo pode beneficiar a durabilidade, reforçando a importância dessas adições para estruturas expostas a ambientes agressivos.

O modelo probabilístico simplificado empregado foi crucial para avaliar de forma quantitativa a durabilidade das diferentes misturas de concreto. Ao incorporar variáveis como a penetração de cloretos, o modelo permitiu prever a vida útil das estruturas ao longo do tempo e evidenciou a influência das adições de cinza de fundo e metacaulim no aumento da durabilidade ao longo dos 50 anos analisados. Cabe destacar que, embora o presente estudo tenha demonstrado reduções na probabilidade de falha com o uso de cinza de fundo e metacaulim, é essencial considerar as especificidades de cada aplicação para garantir a máxima durabilidade.

A combinação de resultados experimentais, como os obtidos através do ensaio de migração de cloretos, com o modelo probabilístico, demonstrou a importância de adotar adições, como cinza de fundo e metacaulim, para maximizar a durabilidade das estruturas em ambientes agressivos, promovendo construções mais duráveis e com menor impacto ambiental.

5. CONCLUSÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo avaliar o impacto da substituição parcial de areia natural por cinza de fundo nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20% e 30%, bem como a substituição de cimento Portland por metacaulim na proporção de 5%, com foco na melhoria do potencial de durabilidade das estruturas expostas à ação de agentes de degradação. Com base nos ensaios realizados, foram observadas influências dessas adições nas propriedades do concreto. Entre os principais destaques, estão:

- Apartir da composição química da cinza de fundo, podemos observar que ela é composta majoritariamente pelos seguintes óxidos: o óxido de sílica (SiO_2), com 42,24%; o óxido de alumínio (Al_2O_3), com 29,38%; e o óxido de ferro (Fe_2O_3), com 18,47%. Esses três componentes são predominantes na cinza de fundo e desempenham um papel fundamental nas propriedades da cinza de fundo.
- Apesar de a análise de difração de raio - X ter indicado uma quantidade menor de material amorfo nas amostras de cinza de fundo, essa reatividade do material, foi suficiente para melhorar a resistência à compressão, reduzir a permeabilidade e aumentar a durabilidade do concreto. Nos traços com maiores teores de cinza de fundo, como CMK10, CMK20 e CMK30, o desempenho foi superior, reforçando que, mesmo com uma menor proporção de fase amorfa, as cinzas de fundo proporcionaram ganhos importantes na qualidade do concreto, especialmente em relação à sua capacidade de resistir à ação de agentes de degradação.
- A análise da resistência à compressão revela que os concretos contendo metacaulim e cinza de fundo apresentaram desempenho superior em comparação aos outros tipos de concretos. Esse resultado é atribuído à combinação sinérgica do efeito filler proporcionado pela cinza de fundo e à alta reatividade do metacaulim, que resultou em uma matriz cimentícia mais coesa, elevando a resistência do concreto.
- As misturas com adição de cinza de fundo e metacaulim apresentaram as menores taxas de absorção de água por capilaridade ao longo do tempo. Essa diminuição da absorção de água por capilaridade indica uma maior resistência à penetração de água e substâncias agressivas. Os resultados sugerem que as adições de cinza de fundo e metacaulim aprimoram as propriedades impermeabilizantes do concreto, tornando-o mais durável.
- Os concretos CMK10, CMK20 e CMK30, apresentaram os menores valores de migração de cloreto ao longo do tempo, com o concreto CMK30 alcançando uma redução de aproximadamente 84% em relação ao concreto convencional C0 aos 180 dias. Esses dados indicam que a

combinação de metacaulim e cinza de fundo proporciona aumento na resistência do concreto à ação de agentes de degradação, reduzindo a vulnerabilidade à corrosão das armaduras e aumentando a vida útil das estruturas.

- A velocidade de pulso ultrassônico também demonstrou que os concretos com as adições de cinza de fundo e metacaulim possuem uma estrutura interna mais homogênea e menos porosa. A estabilidade dos valores ao longo do tempo confirma que essas misturas têm uma menor tendência à formação de fissuras e defeitos internos. A sinergia entre o metacaulim e a cinza de fundo contribuiu para uma matriz cimentícia mais coesa, resultando em melhor desempenho nas propriedades mecânicas e de durabilidade.
- A análise dos concretos com diferentes teores de cinza de fundo revelou que o aumento da porcentagem de cinza tem um impacto positivo nas propriedades do concreto. Os concretos com teores de 20% e 30% de cinza de fundo, tanto nos concretos (C20 e C30) quanto nos concretos (CMK20 e CMK30), se destacaram em relação aos outros traços, apresentando os melhores desempenhos em resistência à compressão, absorção capilar e migração de cloretos.
- A presença do metacaulim nos traços CMK potencializou ainda mais os benefícios proporcionados pela cinza de fundo. O metacaulim contribui para uma melhor formação da matriz cimentícia, aumentando a densidade e impermeabilidade do concreto. Essa combinação sinérgica entre cinza de fundo e metacaulim proporcionou um desempenho superior em relação aos concretos que utilizaram apenas cinza de fundo.
- O modelo probabilístico aplicado revelou uma redução contínua na probabilidade de falha dos concretos à medida que o teor de cinza de fundo foi aumentado, ao longo de um período de 50 anos. Observou-se que o concreto contendo 30% de cinza de fundo apresentou uma probabilidade de falha próxima de zero ao final desse período, destacando o impacto positivo da cinza de fundo no aumento da vida útil e da durabilidade das estruturas de concreto.

Sugestões para trabalhos futuros.

- Conduzir ensaios de durabilidade em condições agressivas, ataque por sulfato para avaliar como a cinza de fundo contribui para a longevidade do concreto.
- Analisar a cinza de fundo com outros métodos, a fim de ampliar o entendimento do comportamento desse material.

6. REFERÊNCIAS

- ADOGIANNIS, E. **Evaluation of chloride penetration resistance of metakaolin concrete by means of a diffusion – Binding model and of the k-value concept.** Cement and Concrete Composites, Vol. 63, 2015, 1-7 p.
- AHMAD, Z. **Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control.** Oxford: Elsevier, 2006.
- ALEXANDER M, BALLIM Y, STANISH K. **A framework for the use of durability indices in performance-based designs and specifications for reinforced concrete structures.** Mater Struct 41:921–936, 2008.
- AL-SWAIDANI, A. M., KHALEEL, O. R., & ALIYAN, S. D. **Influence of using metakaolin and nano metakaolin on mechanical properties of concrete.** Construction and Building Materials, 2016.
- AMES. **Estudo da confiabilidade estrutural no dimensionamento de vigas de concreto armado submetidas à flexão simples,** 2019.
- ANDRADE, C. **Testing and modelling chloride penetration into concrete.** Construction and Building Materials, 2013.
- ANDRADE, T. **Tópicos sobre durabilidade do concreto.** In: Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo, IBRACON, 2005.
- ANDREA, R. **Electrical resistivity as a durability performance indicator for concrete structures.** Journal of Building Physics, 2011.
- ANGST, U.M., “**Predicting the time to corrosion initiation in reinforced concrete structures exposed to chlorides**”, Cement and Concrete Research, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de Estrutura de concreto – procedimento.** Rio de Janeiro, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: **Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Determinação da Composição Granulométrica.** NBR NM 248. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2015 (corrigida em 2016).
- AZEVEDO, A. R., SILVA, S. M., & SANTOS, M. F. **Influence of metakaolin and fly ash on the mechanical and durability properties of concrete.** Materials Science and Engineering: A, 812, 2021.

- AZEVEDO, A. R., SILVA, S. M., & SANTOS, M. F. **Influence of metakaolin and fly ash on the mechanical and durability properties of concrete.** Materials Science and Engineering: A, 812, 2021.
- BADIMUENA, M. L. **Determinação do índice de confiabilidade para classes de estruturas e estados limites.** Revista de Engenharia Civil, 2017.
- BADOGIANNIS, E., KAKALI, G., DIMOPOULOU, G., CHANIOTAKIS, E., & TSIVILIS, S. **Performance of metakaolin-enhanced concrete subjected to chloride attack.** Cement and Concrete Composites, 2015.
- BECK, A. T. **Confiabilidade Estrutural.** São Carlos: EESC-USP, 2014.
- BECK, A. T. **Confiabilidade e segurança das estruturas.** Rio de Janeiro, Elsevier, 2019.
- BENTZ, D. P., LI, Z., & PELTZ, M. A. (2020). **Properties and Performance of Concrete with Supplementary Cementitious Materials.** Journal of Cement and Concrete Research, 132, 1-16.
- BERTOLINI, L., ELSENER, B., PEDEFERRI, P., & PAPADAKIS, V. **Corrosion of steel in concrete: Prevention, diagnosis, repair.** Wiley-Blackwell, 2019.
- BERNDT, M. L. **Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate.** Construction and Building Materials, 2009.
- BIGOLIN, A. **Avaliação da utilização de cinzas de fundo de caldeiras na fabricação de concreto.** Revista Engenharia Civil, 2013.
- CAMACHO, J. B. **The influence of ion chloride on concretes made with sulfate-resistant cements and mineral admixtures.** Construction and Building Materials, Vol. 70, 2016.
- CASCUDO. **Inspeção e diagnóstico de estruturas de concreto com problema de corrosão da armadura,** 2005.
- CASCUDO, O. **Durabilidade do concreto: mecanismos, controle e métodos de investigação.** IBRACON, 1997.
- CASTRO, **Confiabilidade estrutural de pilares existentes de concreto armado: Influência da perda de armadura de aço e da idade do concreto,** 2019.
- CAMACHO, P., CLIMENT, M. A., VIQUEIRA, E., & DE VERA, G. **Effect of fly ash on chloride binding and corrosion rate of steel in concrete.** Cement and Concrete Research, 2014.
- CHEEWAKET, T. **Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year results under marine site.** Construction and Building Materials, Vol. 37, 2012.
- CHEAH, C. B., PART, W. C., & WONG, H. S. **Mechanical and durability properties of mortars containing coal bottom ash as partial replacement of sand.** Construction and Building Materials, 2022.

- C. JATURAPITAKKUL, R. CHEERAROT. **Desenvolvimento de cinzas pesadas como material pozolânico.** J. Mater. Civ. Eng., 15 (fevereiro) (2003), pp. 48 – 53.
- COHEN, M. D., PAREDES, J., & BLASIUS, A. **Compressive strength, drying shrinkage and chemical resistance of concrete incorporating coal bottom ash as partial or total replacement of sand.** Journal of Building Engineering, 2016.
- CRISTINA ARGIZ., AMPARO MORAGUES., ESPERANZA MENENDEZ. **Use of ground coal bottom ash as cement constituent in concretes exposed to chloride environments.** Journal of Cleaner Production. Journal of Building Engineering, 2018.
- DINIZ, S. M. C. **Aplicação de métodos de confiabilidade no projeto estrutural de edificações.** Revista Engenharia Estrutural, 2006.
- DJERBI, A., BONNET, S., KHELIDJ, A., & BAROGHEL-BOUNY, V. **Influence of cracks on the diffusion of chloride in concrete.** Cement and Concrete Research, 2008.
- E.G. MOFFATT, M.D.A. THOMAS. **Performance of 25-year-old silica fume and fly ash lightweight concrete blocks in a harsh marine environment.** Cem. Concr. Res, 2018.
- E. MEN'ENDEZ, A.M. ALVARO, ' M.T. HERN' ANDEZ, J.L. Parra, **New methodology for assessing the environmental burden of cement mortars with partial replacement of coal bottom ash and fly ash,** J. Environ. Manage, 2019.
- FERREIRO. **Projeto e Especificação de Estruturas de Concreto Marinho,** Estruturas de Concreto. Marinho Elsevier, 2016.
- FERREIRA, R. M. **Diferenças entre ensaios acelerados e naturais na avaliação da penetração de cloretos em concreto estrutural.** Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2019.
- FIGUEIREDO, Enio Pazini; MEIRA, Gibson Rocha. **Corrosão das armaduras das estruturas de concreto.** Mérida, México: ALCONPAT Internacional, 2013.
- GJØRV, O. E. **Projeto de durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade.** Trad.: Leda Maria Marques Dias Beck. São Paulo, Oficina de Textos, 2015.
- GHAFOORI, N., & BUCHOLC, J. J. **Properties of high-calcium dry bottom ash concrete.** ACI Materials Journal, 1996.
- GUO, Y., ZHANG, X., & LIU, J. **Effects of metakaolin and fly ash on the mechanical properties and durability of concrete.** Construction and Building Materials, 287, 2021.
- HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** Tese (Livre Docente), Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993.
- HELENE, P. R. L. **Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto.** Pini, 2011.

- HOPPE FILHO, J. et al. **Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (parte II): índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP), difração de raios X (DRX) e termogravimetria (TG/DtG).** Matéria, 2017.
- H. KURAMA, M. KAYA. **Uso de cinzas de combustão de carvão em mistura de concreto** Constr. Construir. Mate, 2008.
- IANTAS. **Estudo da confiabilidade estrutural de sapatas submetidas a cargas centradas dimensionadas**, 2021.
- I.M. MARTINS, A. GONÇALVES. **Propriedades de durabilidade e resistência do concreto contendo cinzas de fundo de carvão.** Int. RILEM Conf. Mater. Sci., 2010.
- ISAIA, G. C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura.** 280p. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.
- JAYARANJAN, M. L. D., Van Hullebusch, E. D., Annachhatre, A. P. **Reuse options for coal fired power plant bottom ash and fly ash.** Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2014.
- KAZI TAMANNA., SUDHARSHAN N., RAMAN., MASLINA JAMIL., ROSZILAH HAMID. **Coal bottom ash as supplementary material for sustainable construction: A comprehensive review.** Journal of Building Engineering, 2013.
- KHAN, M. N. N., & LYNSDALE, C. J. **Performance of pulverized fuel ash in suppressing concrete expansion due to acid and sulfate attack.** Journal of Cleaner Production, 2016.
- KANNAN, V., AWOYERA, P. O., & RAMACHANDRA MURTHY, A. **"Synergistic effect of metakaolin and fly ash in improving mechanical properties and durability of concrete."** Journal of Building Engineering, 2023.
- KHEDR, M. A., & ABOU-ZEID, A. E. **The role of pozzolanic materials on the durability and corrosion resistance of concrete.** Construction and Building Materials, 2020.
- KHEDR, M. E., & ABOU-ZEID, A. S. **Evaluation of the durability performance of concrete incorporating silica fume and metakaolin.** Construction and Building Materials, 265, 2020.
- KHODABAKHSHIAN, A., MIRMIRAN, A., & KARGAR, Z. **"Mechanical properties, durability, and environmental evaluation of rubberized concrete incorporating steel fiber and metakaolin at elevated temperatures."** Journal of Cleaner Production, 257, 2020.
- KIM E LEE. **Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete.** Journal of Building Engineering, 2011.
- KIM e LEE. **Hydration kinetics of high-strength concrete with untreated coal bottom ash for internal curing.** Journal of Building Engineering, 2018.
- LESSA, J. P. L.; JUNIOR, E. T. L.; LIMA, F. B. **Confiabilidade estrutural aplicada à análise da resistência de lajes maciças em edifícios de concreto armado.** In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA CONTECC', 2018.

- LI, H., XIE, P., & ZHANG, L. **Electrochemical chloride extraction from concrete: Mechanisms and effects on steel corrosion.** Cement and Concrete Research, 2020.
- LI, Y., WANG, H., & ZHANG, J. **Durability performance of concrete with high-volume metakaolin and fly ash.** Journal of Cleaner Production, 276, 2010.
- LI, W., Long, C., & Tam, V. W. Y. **"Microstructure and durability of recycled aggregate concrete with different mixing approaches."** Resources, Conservation and Recycling, 2020.
- MADSEN H, KRENKS S, LIND N. **Methods of structural safety** prentice-hall, Englewood cliffs, 1986.
- MAGALHÃES, F. C.; REAL, M. V.; SILVA FILHO, L. C. P.; PINHEIRO, L. C. P. **Avaliação do nível de segurança estrutural de pilares de concreto armado através de metodologia numérica.** Scientia Plena, Sergipe, v.11, n. 8, ago. 2015.
- MANGI, S. A., JAMALUDDIN, N., WAN IBRAHIM, M. H., & ZAWAWI, N. A. **Strength and durability properties of bottom ash concrete.** Journal of Engineering Science and Technology, 2019.
- MCDONALD, P. J. **The effects of surface tension and capillarity on moisture transport in porous materials.** Journal of Physics D: Applied Physics, 1998.
- MEDEIROS, MARCELO HENRIQUE FARIAS DE; ANDRADE, JAIRO JOSÉ DE OLIVEIRA; HELENE, PAULO. **Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto.** In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** São Paulo: Ibracon, 2011.
- MEDEIROS-JUNIOR, R. A., LIMA, M. G., SILVA, C. J., & GALDINO, A. G. **Influence of marine environment on chloride penetration into concrete.** Construction and Building Materials, 2015.
- MEDINA, E. A. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio.** Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011.
- MEIRA, GIBSON ROCHA. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: Fundamentos, diagnóstico e prevenção.** João Pessoa: Editora IFPB, 2017.
- MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Pini, 1994.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais – 3ª edição.** Ed.: IBRACON, 2008.
- MEHTA, P. K., & MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Sustentável: Microestrutura e Propriedades com ênfase no Desenvolvimento Sustentável.** IBRACON, 2006.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** HAS-PARYK, N. P. (Ed. Trad.). 2ª Ed. São Paulo, Ibracon, 2014.
- MELCHERS, R. E.; BECK, A. T. **Structural Reliability Analysis and Prediction.** Hoboken, 2018.

- MOHAMMAD. **Recycled coal waste ash as sustainable materials for replacing cement in cementitious compounds.** Journal of Building Engineering, 2022.
- M. SHEKARCHI, A. BONAKDAR, M. BAKHSHI, A. MIDAADI, B. MOBASHE. **Transport properties of concrete mixed with metakaolin.** Build Mater, 24 (2010).
- MOTA, L. C. S.; FERREIRA, R. H. C.; FIGUEIRA, S. L.; MONTEL, A. L. B.; D'OLIVEIRA, M. C. P. E. **Avaliação dos efeitos da adição de carvão ativado residual ao concreto.** In.: 59º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – 59CBC2017, Bento Gonçalves-RS, 2017.
- S.A. MANGI, M.H. WAN IBRAHIM, N. JAMALUDDIN, M.F. ARSHAD, S. SHAHIDAN. **Performances of concrete containing coal bottom ash with different fineness as a supplementary cementitious material exposed to seawater,** Eng. Sci. Technol. an Int. J, (2019).
- SANTOS, R. C. **Durabilidade das Estruturas de Concreto: Conceitos e Avaliação.** IBRACON, 2012.
- SINGH. **Durability properties of concrete made with high volumes of low-calcium coal bottom ash as a replacement of two types of sand.** J. Mater, 2016.
- SINGH, M., & ARYA, R. **Effect of metakaolin on mechanical properties and permeability of concrete under chloride exposure.** Construction and Building Materials, 2019.
- S. MINDESS, JF YOUNG, D. DARWIN. **Concreto.** Prentice Hall, Nova Jersey, EUA (2002).
- S. PYO, H.-K. KIM. **Fresh and hardened properties of ultra-high performance concrete incorporating coal bottom ash and slag powder.** Constr. Build. Mater, 2017.
- SURYAVANSHI, A. K., & TIN, S. S. **Influence of water-cement ratio on the chloride permeability and microstructure of cement paste.** Cement and Concrete Research, 2000.
- NEVILLE, ADAM M. **Tecnologia do concreto. 2º edição.** Porto Alegre: Bookm, 2013.
- NEVILLE, ADAM M. **Propriedades do concreto. 5º edição.** Porto Alegre: Bookm, 2015.
- NOGUEIRA, C.G.; LEONEL, E.D.; CODA, H.B. **Corrosion time initiation modelling considering uncertainties.** In: International symposium on uncertainty quantification and stochastic modeling, Maresias, São Sebastião, 2012.
- N. SINGH, M. M, S. ARYA. **Utilização de cinzas residuais de carvão em agregados de concreto reciclado à base de concreto auto-adensável misturado com metacaulim.** Resour. Conserva Reciclar, (2019).
- OBERSCHHELP, C., PFISTER, S., RAPTIS, C. E., & HELLWEG, S. **Global emission hotspots of coal-fired power generation.** Nature Sustainability, 2019.
- OTIENO, M.B.; BEUSHAUSEN, H.D.; ALEXANDER, M.G. **Modelling corrosion propagation in reinforced concrete structures - A critical review.** Cement & Concrete Composites, v.33, n.2, p.240-245, 2010.

- OŽBOLT, J., LI, Y., & KOŽAR, I. **Modelling of chloride penetration into cracked concrete**. Cement and Concrete Composites, 2010.
- PANG, X., & LI, Z. **Effect of wetting-drying cycles on chloride penetration and durability of concrete structures in marine environments**. Ocean Engineering, 2016.
- PARK, S., JUNG, W., & KIM, S. **Effect of crack width on chloride diffusion coefficients of concrete by steady-state migration tests**. Construction and Building Materials, 2012.
- PELLIZZER, R. **Vida útil das estruturas de concreto armado: Teoria e Prática**. IBRACON, 2019.
- PEREIRA, V. G. A. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: Influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.
- PEREIRA, L. A., OLIVEIRA, L. S., & VIEIRA, P. N. **The influence of metakaolin on the durability and mechanical properties of concrete exposed to chloride environments**. Journal of Materials in Civil Engineering, 34(6), 2022.
- PING. **Coal bottom ash as constituent binder and aggregate replacement in cementitious and geopolymers composites**. Journal of Building Engineering, 2022.
- PING, Y., ZHAO, B., & ZHANG, Q. (2022). **Advances in bottom ash utilization in construction: A comprehensive review**. Construction and Building Materials, 2022.
- PINTAN, N. M. et al. **Pathological manifestations and the study of corrosion present on bridges of the city of Recife**. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, v. 20, p. 11893 – 11907, 2015. RA Khan, A. Ganesh. J. Construir. Mate. Estrutura, 2016.
- PINTO, R. C. A. **Avaliação da durabilidade de estruturas de concreto: Penetração de cloretos e métodos de ensaio**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 2016.
- POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de PósGraduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- PRATA, V. S. **Confiabilidade de lajes maciças de concreto armado em estruturas portuárias**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2017.
- PYO, S. & KIM, G. **Ecological concerns and the choice of sustainable materials in construction**. Journal of Sustainable Building, 2017.
- RAGAB, A. M., WAHBA, H. A., & RASHAD, A. M. **Durability of concrete structures in marine environment**. Journal of Engineering and Applied Science, 2016.
- RAMEZANIANPOUR, A. A., KHAZALI, M. H., & VOSOUGHI, P. **Effect of steam curing cycles on strength and durability of SCC: A case study in precast concrete**. Construction and Building Materials, 2011.

- RIBEIRO, D. V.; CASCUDO, O. **Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto**. In: **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto – Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. Rio de Janeiro, Elsevier, 2018.
- REZENDE, L., RODRIGUES, A., & PEREIRA, S. **Impacto ambiental e sustentabilidade nas construções**. Revista Engenharia Ambiental, 2012.
- RIZZON, J. E. **Permeabilidade e durabilidade de concretos de alta resistência**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.
- ROCHA, A. A. K. **Desempenho de argamassas para concretos autoadensáveis com baixos teores de cimento portland**, 2020.
- ROGOFF, M. J., ROSS, D. E. **The future of recycling in the United States**. Waste Management e Research, 2016.
- SAFEHIAN, H., RAMEZANIANPOUR, A. A., & BASSAM, S. A. **The effect of different marine zones on durability of concrete: A review**. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013.
- SAFIUDDIN, M., ISLAM, M. N., & BEGUM, S. **Effect of supplementary cementitious materials on the durability of concrete: A review**. Construction and Building Materials, 170, 207-222, 2018.
- SAGRILO, L. V. S. **Análise da confiabilidade estrutural utilizando os métodos analíticos FORM e SORM**. Tese de Doutorado em Engenharia, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1994.
- SAHMARAN, M., & LI, V. C. **Influence of microcracking on water absorption and sorptivity of ECC**. Materials and Structures, 2007.
- SANTOS, A. R., OLIVEIRA, J. P., COSTA, M. A. **"Influence of chloride penetration on the durability of reinforced concrete structures."** Journal of Materials Science Research, 2018.
- S.B. PARK, Y. IL JANG, J. LEE, B.J. LEE. **An experimental study on the hazard assessment and mechanical properties of porous concrete utilizing coal bottom ash coarse aggregate in Korea**. J. Hazard. Mater, 2009.
- SCRIVENER, K., SNELLINGS, R., & LOTHENBACH, B. **Supplementary cementitious materials**. In A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials. 2019.
- SHI, C., JIMÉNEZ, A. F., & PALOMO, A. (2012). **New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement**. Cement and Concrete Research, 2012.
- SHI, C., KRIVENKO, P. V., & ROY, D. M. **Advances in Science and Technology of Metakaolin-Containing Concretes**. Materials and Structures, 2021.
- SHI, X. **Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: an overview**. Construction and Building Materials, Vol. 30, 2012.

- SHI, X., WANG, Y., & ZHANG, L. **Performance of concrete with high-volume fly ash and metakaolin: A review.** Construction and Building Materials, 266, 2021.
- SILVA, P. A., RODRIGUES, F. C., ALMEIDA, D. R. **"Mechanisms of chloride transport in concrete structures exposed to marine environments."** Construction and Building Materials, 2020.
- SILVA, M. G. Cimentos portland com adições minerais. In: ISAIA G. C. (Ed). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** São Paulo: IBRACON, v.1, capítulo 23, p. 761-793, 2007.
- SINGH, M., SIDDIQUE, R. **Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete.** Resour. Conserv. Recycl. 72, 20–32, 2023.
- SINGH E SIDDIQUE. **Compressive strength, drying shrinkage and chemical resistance of concrete incorporating coal bottom ash as partial or total replacement of sand.** Journal of Building Engineering, 2015.
- SINGH, M., CHAWLA, N., & SIDDIQUE, R. **Coal bottom ash as partial replacement of fine aggregate in concrete.** Journal of Cleaner Production, 2016.
- SIQUEIRA, G., SILVA, F., & OLIVEIRA, M. **Reaproveitamento de resíduos industriais na construção civil.** Revista Sustentabilidade em Debate, 2012.
- SONG, H. W., PACK, S. W., NAM, S. H., JANG, J. G., & SARASWATHY, V. **Influence of permeability on chloride diffusion in concrete structures exposed to marine environments.** Cement and Concrete Composites, 2019.
- SUDHEER KUMAR., KANISH KAPOOR., SP SINGH., VAIBHAV SHARMA. **A review on the properties of natural and recycled coarse aggregates concrete made with different coal ashes.** Journal of Building Engineering, 2022.
- STREICHER, P. E., & ALEXANDER, M. **A chloride conduction test for concrete.** Cement and Concrete Research, 1994.
- SKORONSKI, E., SOUZA, D. H., SANTOS, S., CESINO, J. C., GHISLANDI, M. G. **Avaliação das propriedades físicas de revestimentos cerâmicos produzidos com resíduo da indústria cerâmica cinza pesada de carvão mineral,**2015.
- TANG, L., NILSSON, L. O., & BASHEER, P. A. M. **Resistance of concrete to chloride ingress: Testing and modelling,** 2019.
- THOMAS, M. D. A., & MAGEE, B. R. **Performance of Concrete with Various Supplementary Cementitious Materials.** Journal of Construction and Building Materials, 2021.
- TREJO, D. **Corrosion-resistant concrete: chloride transport, resistivity, and polarization resistance.** Journal of Materials in Civil Engineering, 2017.
- TUUTTI, K. **Corrosion of Steel in Concrete.** Stockholm, Swedish Cement and Concrete, 1982.

- TUUTTI, K. **Service life models for concrete structures.** In: **Proceedings of the International Conference on Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading (CONSEC'96)**, Sapporo, Japan, E&FN Spon, London, 1996.
- VALDES, J., MEJIA, L., & LARA-BOCANEGRA, A. **Factors influencing chloride diffusion in concrete structures: Cement type, mineral admixtures, and environmental conditions.** Construction and Building Materials, 2017.
- VILASBOAS, José Márcilio Ladeia. **Durabilidade das edificações de concreto armado.** TCC (Graduação) - Curso de (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologia Ambiental no Processo Produtivo), Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.
- WALLY., MAGALHÃES., SILVA FILHO. **Conceitos e aspectos da abordagem com base no desempenho na avaliação da durabilidade de estruturas de concreto armado expostas a ambientes agressivos,** 2020.
- WEERDT, K. **Towards the understanding of chloride profiles in marine exposed concrete, impact of leaching and moisture content.** Construction and Building Materials, v. 120, p. 418 – 431, 2016.
- W. WONGKEO; P. THONGSANITGAM; K. PINRAKSA; A. Chaipanich, **strength Compressive, strength flexural and thermal conductivity of autoclaved concrete block made with waste ash as cement replacement material,** 2012.
- WEI, Y., SERPELL, R., & ROTIMI, J. O. **Coal ash as coarse aggregate in concrete.** International Journal of Engineering Research, 1994,
- WILLIAMS, S. R., & ROBERTS, C. D. **Variations in properties of coal bottom ash and its influence on concrete performance.** Journal of Materials in Civil Engineering, 21(5), 2009.
- ZHANG, Z., LI, Y., & SUN, W. **Chloride diffusion and binding capacity of cement-based materials under various exposure environments: A comprehensive review.** Construction and Building Materials, 2021.
- ZHANG, Y., WANG, X., LIU, Y., & XU, J. **Influence of Supplementary Cementitious Materials on the Durability and Performance of Concrete.** Construction and Building Materials, 2023.
- ZHANG, Y., SUN, W., & CHEN, H. **Effect of cracks on chloride penetration and service life of reinforced concrete structures.** Cement and concrete research, 2017.
- ZHAO, G., WANG, H., & ZHAO, Y. **Effect of metakaolin on chloride binding capacity in concrete: A comparative study.** Cement and Concrete Composites, 2020.

Apêndices

APÊNDICE A-1- Os resultados dos ensaios realizados.

	Resistência à compressão				Absorção de água por capilaridade			Coeficiente de Migração			Velocidade de Pulso Ultrassônico			Resistividade Elétrica superficial
	(MPa)				(g/cm ²)			D _{nssm} (x 10 ⁻¹² m ² /s)			(m/s)			(kΩ.cm)
Traços	7 dias	28 dias	90 dias	180 dias	28 dias	90 dias	180 dias	28 dias	90 dias	180 dias	28 dias	90 dias	180 dias	180 dias
C0	35,1	47,7	52,09	54,1	0,69	0,44	0,37	7,47	3,6	2,9	5204	5207	4937	13,47
C5	33,5	47,9	53,7	54,8	0,37	0,32	0,26	7,91	3,14	2,68	4811	4791	4857	10,05
C10	36,2	50,3	55,4	56,3	0,33	0,24	0,19	7,54	2,65	2,5	4952	4979	4916	12,1
C15	41,6	50,7	58,72	63,81	0,23	0,2	0,17	7,02	2,43	1,69	4990	5012	4995	13,49
C20	38,2	47,3	60,72	61,56	0,2	0,19	0,16	6,16	1,97	1,12	5072	5106	5016	15,28
C30	37,57	48,1	52,6	57,71	0,18	0,16	0,14	4,83	1,47	0,87	5123	5107	5130	21,21
CMK0	37,1	48,8	54,07	56,79	0,32	0,18	0,16	4,35	2,97	1,3	5263	5297	5008	15,58
CMK5	35,9	47,6	55,98	61,23	0,31	0,27	0,21	3,85	2,21	0,88	5091	5169	5085	21,29
CMK10	38	53,9	62,85	64,35	0,22	0,21	0,14	3,29	1,66	0,47	5048	5186	5031	22,29
CMK15	36,9	46,75	57,37	58,87	0,12	0,11	0,1	3,87	1,38	0,75	5047	5051	5060	38,03
CMK20	49,33	59,64	60,63	61,79	0,14	0,12	0,11	2,71	0,96	0,54	5050	5071	5084	44,01
CMK30	41,47	52,00	61,23	62,72	0,24	0,2	0,18	2,52	1,35	0,46	5070	5056	5092	48,21